

Trabajo Fin de Grado  
Ingeniería Civil

Estudio del ensayo Single-Lap en materiales  
compuestos de impresión 3D

Autor: Pablo Rossi Garrido

Tutor: María Teresa Aranada Romero

Israel García García

**Dpto. de Mecánica de Medios Continuos y  
Teoría de Estructuras  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería**

Sevilla, 2023





Trabajo Fin de Grado  
Ingeniería Civil

# **Estudio del ensayo Single-Lap en materiales compuestos de impresión 3D**

Autor:

Pablo Rossi Garrido

Tutores:

María Teresa Aranda Romero

Israel García García

Profesor titular

Dpto. de Mecánica de los Medios Continuos y Teoría de Estructuras

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2023



Trabajo Fin de Grado: Estudio del ensayo Single-Lap en materiales compuestos de impresión 3D

Autor: Pablo Rossi Garrido

Tutor: María Teresa Aranda Romero

Israel García García

El tribunal nombrado para juzgar el Trabajo Fin de Grado arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2023

El Secretario del Tribunal





# Agradecimientos

---

Quisiera comenzar dándole las gracias a mi madre y a mi hermano por apoyarme durante todos estos años y estar a mi lado en los buenos y malos momentos. También a María José por acompañarme y ser un pilar fundamental en estos últimos tres años de estudio y esfuerzo, sin ella todo este proceso no habría sido el mismo.

Por supuesto no pueden faltar en estos agradecimientos mis amigos de la carrera, todos y cada uno de ellos con los que he pasado horas de estudios en la biblioteca, comidas en los laboratorios y trabajos en el sótano, gracias a ellos este largo camino ha sido muchísimo más ameno y divertido.

Me gustaría agradecer la ayuda de los profesionales del departamento de LERM José Ramón, Antonio, Miguel y Carlos.

Por último y no por ello menos importante agradecer a mis tutores Teresa e Israel por su encomiable ayuda y atención durante este trabajo de investigación.

*Pablo Rossi Garrido*

*Sevilla, 2023*







La fabricación aditiva, o como también es conocida (Impresión 3D), ha supuesto un avance en la producción industrial, ya que permite convertir modelos digitales en objetos sólidos en tres dimensiones de forma sencilla, además de poder crearlos con diversos materiales, siendo los más usados los termoplásticos. A pesar de las ventajas que tiene este tipo de fabricación como: rapidez de fabricación, disminución del coste y la posibilidad de crear objetos complejos, tiene una desventaja que son las propiedades mecánicas del material. Por ello, en algunos casos se utiliza como material base los materiales compuestos reforzados con microfibras o fibras largas.

Este trabajo tiene como objetivo el evaluar como las interfases estructuradas, fabricadas gracias a estas técnicas, pueden mejorar la calidad de una unión adhesiva en materiales compuestos. Así, se va a usar la impresora 3D MarkTwo de la empresa Markforged para la fabricación de dos tipos de probetas: planas y estructuradas. Dichas probetas se imprimirán en Onyx (Nylon reforzado con microfibras de carbono) y reforzadas en fibra de vidrio. Una vez que se han obtenido las probetas, se ensayarán a tracción para determinar su rigidez a cortadura y analizar la diferencia entre ambas.



# Abstract

---

Additive manufacturing, also known as 3D printing, it has represented an advance in industrial production, since it allows digital models to be converted into solid three-dimensional objects. In addition, it allows for the creation of objects using various materials, with thermoplastics being the most commonly used. Despite the advantages that this type of manufacturing has such as: speed of manufacturing, reduced cost, and the possibility of creating complex objects, it has a disadvantage which is the mechanical properties of the material. This can be alleviated by using composite materials for 3D printing, reinforcing with microfibers or long fibers.

This work aims to evaluate how structured interface can improve the mechanical performance of an adhesive joint. The Mark Two 3D printer from the Markforged company will be used to manufacture two types of test specimens: flat and structured. These specimens will be printed in Onyx (Nylon reinforced with carbon microfibers) and reinforced with fiberglass. Once the specimens have been obtained, they will be tested in traction to determine their shear stiffness and analyze the difference between both specimens.

# Índice

---

<b>Agradecimientos</b>	<b>viii</b>
<b>Resumen</b>	<b>xi</b>
<b>Abstract</b>	<b>xiii</b>
<b>Índice</b>	<b>xiv</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>xvii</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>xix</b>
<b>Notación</b>	<b>xxiii</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
1.1 Motivaciones	1
1.2 Objetivos	1
1.3 Estructuración del documento	2
<b>2 Interfases Estructuradas y Ensayo Single Lap-Joint</b>	<b>11</b>
2.1 Interfases estructuradas	11
2.2 Single-Lap Joint	12
2.3 Factores A Tener En Cuenta	14
2.4 Otros Tipos De Uniones Simples	15
<b>3 Procesos De Fabricación Aditiva</b>	<b>16</b>
3.1 Ventajas e inconvenientes	16
3.2 Tipos de procesos de fabricación aditiva	17
3.3 Aplicaciones de los procesos de fabricación aditiva	21
<b>4 Impresora Mark Two</b>	<b>22</b>
4.1 Funcionamiento de la impresora 3D	22
4.2 Materiales que se van a usar	24
4.3 Software usado para la modelización	24
4.4 Aplicación de la impresora	25
<b>5 Diseño Y Errores De Impresión</b>	<b>29</b>
5.1 Diseño de las probetas	29
5.2 Modelización y configuración de las probetas	31
5.3 Imperfecciones durante la impresión	33
5.3.1 Calibración	33
5.3.2 Impresión de la fibra continua de vidrio	34
<b>6 Ensayo Y Resultados</b>	<b>36</b>
6.1 Maquinaria	36
6.2 Preparación de las probetas	37
6.3 Tacos de Onyx	39
6.4 Resultados	39
6.5 Posibles mejoras	43
6.6 Tipos de Rotura	47
<b>7 Conclusiones</b>	<b>50</b>

<i>7.1 Probetas iniciales</i>	50
<i>7.2 Probetas con mejoras</i>	51
<i>7.3 Fabricación aditiva</i>	51
<b>Referencias</b>	<b>52</b>





# ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 4.2 Propiedades del Onyx.....	24
Tabla 4.1 Propiedades de la Fibra de Vidrio .....	24
Tabla 6.1 Fuerza, desplazamiento y tensión máxima de las probetas planas .....	41
Tabla 6.2 Fuerza, desplazamiento y tensión máxima de las probetas estructuradas.....	41
Tabla 6.3 Medidas de las probetas planas y estructuradas.....	41
Tabla 6.4 Media, desviación y error relativo de PE y PP .....	42
Tabla 6.5 Fuerza, desplazamiento y tensión cortante máxima de PS1 .....	45
Tabla 6.6 Fuerza, desplazamiento y tensión cortante máxima de PS2 .....	45
Tabla 6.7 Medidas de las probetas estructuradas simétricas .....	45
Tabla 6.8 Media, desviación y errores relativos de PS1 y PS2 .....	46
Tabla 6.9 Intervalos de confianza de las cuatro tipologías de probetas .....	47



# ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 2.1 Estructura interna de Nacre formada por diversas capas [1] .....	11
Figura 2.2 Interfases estructuradas presentes en la naturaleza [3].....	12
Figura 2.3 Propagación de la grieta en el ensayo de cortadura [26] .....	13
Figura 2.4 Momento asociado a carga excéntrica durante el ensayo [26].....	13
Figura 2.5 Diferentes tipos de rotura adhesiva [18] .....	14
Figura 3.1 Proceso de fabricación mediante modelado por deposición fundida (FDM) [11].....	17
Figura 3.2 Proceso de fabricación por estereolitografía (SLA) [12].....	18
Figura 3.3 Proceso de fabricación mediante sinterizado selectivo por láser (SLS) [13] .....	18
Figura 3.4 Proceso de fabricación por procesamiento digital de luz (DLP) [14].....	19
Figura 3.5 Proceso de fabricación por deposición de energía directa (DED) [15] .....	20
Figura 3.6 Proceso de fabricación mediante fusión por haz de electrones (EBM) [16] .....	20
Figura 3.7 Proceso de fabricación por impresión Multijet (MJP) [17].....	21
Figura 4.1 Impresora Mark Two fabricando una probeta estructurada .....	22
Figura 4.2 Caja sellada donde se introduce el Onyx .....	23
Figura 4.3 Onyx dentro de la caja de sellado.....	23
Figura 4.4 Rollo de fibra de vidrio de 150 cm <sup>3</sup> .....	24
Figura 4.5 Menú principal programa online Eiger de Markforged.....	25
Figura 4.6 Menú de configuración del programa online Eiger de Markforged .....	26
Figura 4.7 Pestañas de la parte derecha del menú de configuración del programa Eiger de Markforged .....	27
Figura 4.8 Menú de configuración XRAY del programa Eiger de Markforged.....	28
Figura 5.1 Probeta plana vista frontal .....	29
Figura 5.2 Probeta plana vista en planta .....	29
Figura 5.3 Probeta estructurada cara A .....	30
Figura 5.4 Probeta estructurada cara B .....	30
Figura 5.5 Dimensiones probetas planas y estructuradas .....	30
Figura 5.6 Configuración probetas Eiger.....	32
Figura 5.7 Configuración XRAY de las probetas plana, estructurada cara A y cara B respectivamente.....	32
Figura 5.8 Imperfecciones generadas en el extremo izquierdo de una probeta plana .....	33
Figura 5.9 Imperfecciones generadas en la zona de solape de una probeta estructurada .....	33
Figura 5.10 Proceso para comenzar la calibración de la impresora Mark Two .....	33
Figura 5.11 Láminas metálicas para la calibración de la impresora .....	34
Figura 5.12 Simulación 2D impresión de la fibra en una de las capas de la impresora obtenida en el menú XRAY .....	34
Figura 5.13 Impresión de la fibra en una de las capas de la probeta cara A.....	34

Figura 5.14 Campana para proteger a las probetas de la humedad.....	35
Figura 5.15 Imagen de todas las probetas planas y estructuradas para el ensayo de single-lap joint.....	35
Figura 6.1 Máquina de funcionamiento estático INSTRON 4482 .....	36
Figura 6.2 Mordazas para poder realizar el ensayo de fuerza .....	37
Figura 6.3 Parte A y B del material adhesivo que se va a usar .....	37
Figura 6.4 Probetas después de la unión del solape .....	38
Figura 6.5 Probetas guardadas herméticamente durante el proceso de curado.....	38
Figura 6.6 Probeta antes de comenzar con el ensayo Single-Lap Joint .....	39
Figura 6.7 Resultados probetas estructuradas (PE) ensayo Single-Lap .....	40
Figura 6.8 Resultados probetas planas (PP) ensayo Single-Lap .....	40
Figura 6.9 Rotura de algunas probetas estructuradas durante el ensayo .....	43
Figura 6.10 Probetas con interfase estructurada simétrica de 1 mm y 2 mm de amplitud respectivamente.....	43
Figura 6.11 Espesor del adhesivo epoxi de las probetas estructuradas simétricas de 1 mm de amplitud.....	44
Figura 6.12 Espesor del adhesivo epoxi de la probeta simétrica de 2 mm de amplitud.....	44
Figura 6.13 Resultados fuerza-desplazamiento PS1 .....	45
Figura 6.14 Resultados fuerza-desplazamiento PS2.....	46
Figura 6.15 Intervalos de confianza de las cuatro tipologías de probetas .....	47
Figura 6.16 Diferentes tipologías de fallos adhesivos [26] .....	47
Figura 6.17 Solape de probetas estructuradas después de someterlas al ensayo de cortadura.....	48
Figura 6.18 Solape de probetas planas después de someterlas al ensayo de cortadura .....	48
Figura 7.1 Cara B (arriba) y Cara A (abajo) de las probetas estructuradas .....	50





# Notación

---

PE	Probeta Estructurada
PP	Probeta Plana
PS1	Probeta Simétrica 1 mm de amplitud
PS2	Probeta Simétrica 2 mm de amplitud
e	Espesor





# 1 INTRODUCCIÓN

---

**E**n este primer capítulo, se explicarán los motivos por los cuales se ha decidido realizar este trabajo de investigación donde, probetas de materiales compuestos impresas con impresora 3D serán sometidas al ensayo Single-lap joint. También se indicarán cuáles son los objetivos que se persiguen en este trabajo, además, de detallar los diferentes capítulos con los que se va a estructurar el presente documento.

## 1.1 Motivaciones

Durante muchos años, en la gran mayoría de industrias los procesos de fabricación se caracterizaban en hacer que el material se adaptase al molde, y así poder obtener la forma deseada. Luego se aplica un proceso de fabricación sustractiva, es decir, fresado, mecanizado, moldeo por inyección, con el objetivo de eliminar material sobrante, y así poder obtener el acabado deseado.

En la actualidad este tipo de procesos tradicionales están siendo reemplazados por la fabricación aditiva, la cual es usada en múltiples sectores, como la industria sanitaria, aeronáutica o automotriz entre otras. A pesar de la variedad de procesos de fabricación aditiva, todos comienzan de la misma manera, modelando el objeto a través de un software CAD, para luego obtener el modelo digital en formato STL. Dicho archivo es leído por la impresora para poder imprimir el objeto. Este proceso ofrece una serie de ventajas con respecto a los procesos tradicionales como: reducción de los costes de producción, capacidad de imprimir formas complejas (flexibilidad) y disminución de los tiempos de producción.

La fabricación aditiva permite el uso de distintos tipos de materiales, aunque los más usados son los termoplásticos. La principal desventaja de estos materiales son sus propiedades mecánicas, las cuales no son óptimas, para ello aquí se usa la opción de reforzarlo con fibras. En este caso, el material plástico que se va a usar en este trabajo es el Onyx, que es esencialmente Nylon reforzado con microfibras de carbono.

Como se ha indicado anteriormente, existen muchos procesos de fabricación aditiva, los cuales serán discutidos más adelante en este documento. Además, se indicará el proceso que ha sido usado para este trabajo de investigación.

La otra motivación por la cual se ha decidido realizar este trabajo, es la fuente de inspiración que suponen las estructuras internas presentes en la naturaleza, las cuales presentan millones de años de evolución, lo que hacen que se combinen buenas propiedades mecánicas con ligereza, como es el caso de los huesos.

Por ejemplo, estudios realizados en nácar, revelan como su estructura, compuesta de geometrías complejas lo dotan de una gran resistencia a la fractura. Esto plantea la comparación entre interfaces estructuradas e interfaces planas, de forma que se puedan analizar la mejora en la resistencia de su unión, de las primeras frente a las segundas.

Para caracterizar estas uniones, el ensayo single lap joint o ensayo de cortadura es comúnmente utilizado, sometiendo las probetas a tracción que permiten evaluar la resistencia de la unión entre los materiales utilizados en la impresión 3D, comparando las uniones planas y estructuradas.

## 1.2 Objetivos

El objetivo de este trabajo es someter a dos tipologías de probetas fabricadas mediante impresión 3D al ensayo Single-lap joint. Para la impresión de las probetas se usará la Impresora 3D Mark Two. Durante el proceso de impresión se usará Onyx con un refuerzo de fibra de vidrio.

Para la realización del ensayo las probetas se pegarán a través de una zona de solape cuyas dimensiones al igual que el resto de las dimensiones de la probeta serán definidas a partir de la Norma [8]. Las dos tipologías de probeta tendrán geometría rectangular, con la salvedad que unas presentarán una zona de solape con interfase plana y otras con interfase estructurada.

Este ensayo nos permitirá obtener la resistencia de la unión, para luego poder comparar entre ambas tipologías cual obtiene un mejor comportamiento. A priori aquellas probetas con interfase estructurada deberían tener una resistencia mayor.

Otro aspecto que analizar de este ensayo es observar el comportamiento de la fisura a través de la zona de solape con interfase estructurada, a priori la grieta debería ir pasando por todos los dientes. A diferencia de lo que ocurre con las probetas con interfase plana donde el tipo de rotura es completamente plana.

Una vez que todas las probetas han roto también resulta interesante analizar los diferentes tipos de rotura que se han producido en la unión.

### 1.3 Estructuración del documento

El documento se va a organizar en siete capítulos, cuyos contenidos se explican a continuación.

**Capítulo 2:** Interfases estructuradas y ensayo single lap. En este capítulo se expondrán los motivos del estudio de las interfases estructuradas. Además, se explicará el ensayo al que van a ser sometidas las probetas.

**Capítulo 3:** Procesos de fabricación aditiva. En este capítulo se comentarán los diferentes procesos de fabricación aditiva que existen, así como las ventajas e inconveniente de usar este tipo de procesos y cuáles son sus aplicaciones.

**Capítulo 4:** Impresora Mark Two. En este capítulo se explicará cómo funciona la impresora y todo el proceso a realizar desde que se modela la probeta en CAD hasta que se imprime.

**Capítulo 5:** Modelización, diseño y errores de impresión. En este capítulo se muestran los diferentes diseños que se han realizado hasta obtener el diseño final. También se mostrarán algunas imperfecciones generadas por la impresora y que hay que hacer para minimizar dichas imperfecciones.

**Capítulo 6:** Ensayo y resultados. En este capítulo se explicará el tipo de ensayo que se va a realizar a la probeta, además de los resultados finales obtenidos.

**Capítulo 7:** Conclusiones. En este capítulo se comentarán las conclusiones obtenidas tras haber obtenido los resultados del ensayo a tracción.





# 2 INTERFASES ESTRUCTURADAS Y ENSAYO SINGLE LAP-JOINT

Tal y como se ha explicado en la introducción de este documento una de las motivaciones de este trabajo de investigación es el estudio de las interfases estructuradas a través de ensayos single lap mediante probetas fabricadas con impresión 3D, es por ello que en este capítulo se comentarán estos dos aspectos.

## 2.1 Interfases estructuradas

En los últimos años se han hecho estudios sobre las estructuras internas presentes en la naturaleza, lo cual ha permitido descubrir cómo tras años de evolución y desarrollo, elementos como los huesos, la madera, exoesqueletos de animales han conseguido a través de estructuras más simples generar otras más complejas, dotándolos de unas propiedades mecánicas mucho mejores y a su vez más ligeras [2].

La naturaleza tiene la capacidad de generar compuestos con diferentes propiedades mecánicas a partir de elementos más simples, además del poder de adaptación que estos presentan en función de sus necesidades [2].

Por ejemplo, se han realizados estudios exhaustivos en un material llamado Nacre, el cual está compuesto de un 95% de aragonita y un 5% de proteínas. Las investigaciones efectuadas sobre este material se deben a su estructura interna formada por distintas capas (ver Figura 2.1). Estas capas dotan al Nacre de una gran capacidad de disipación de energía por su microestructura, que promueven la formación de múltiples microgrietas sin conectar. La presencia de multitud de interfases desconectas a nivel microestructural ejerce de barrera para la propagación de una grieta que adquiera magnitud a nivel macro, dotando al material de una gran tenacidad a la fractura, a pesar de la fragilidad de sus constituyentes de forma independiente.

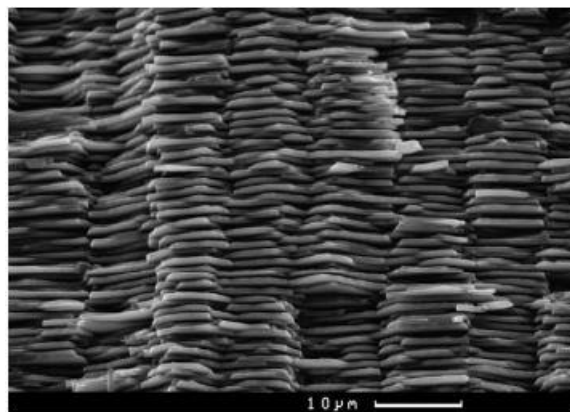


Figura 2.1 Estructura interna de Nacre formada por diversas capas [1]

Lo que se pretenden hacer es intentar imitar el comportamiento de estas estructuras internas para así obtener materiales ligeros y a su vez de gran resistencia y tenacidad. No obstante, esta tarea representa un desafío considerable, ya que no es fácil replicar los compuestos y estructuras generados por la naturaleza. A pesar de las dificultades, se han logrado algunos avances en esta dirección [2].

A través de los procesos de fabricación aditiva o también conocidos como impresión 3D, se han impreso probetas de material compuesto con diferentes geometrías y patrones, generando así interfases triangulares y sinusoidales caracterizadas por una amplitud de onda  $A$ , longitud de onda  $\lambda$  y un espesor  $t$  [19][20].

Otros trabajos se han centrado en el uso de métodos numéricos para poder estudiar los diversos mecanismos físicos que se generan en las interfases estructuradas, generando mejoras en su comportamiento mecánico frente a las interfases lisas [21]. Por ejemplo, se han realizado modelos de zona cohesiva, los cuales permiten entender cómo se comportan las fracturas de las uniones adhesivas en los distintos escenarios posibles [22]. La importancia de este modelo numérico yace en la posibilidad de imitar el comportamiento de la fractura en la interfase, permitiendo así analizar los patrones de ésta [3].

En la Figura 2.2 se pueden observar diversas microestructuras presentes en la naturaleza. La primera de ellas es la del pico del pájaro carpintero cabecirrojo, donde se puede apreciar como la interfase de la estructura es ondulada. Los estudios realizados sobre la estructura a nivel macroscópico, microscópico y nanoscópico del pico del pájaro carpintero suponen un posible avance hacia el diseño de herramientas que requieran de una gran capacidad para absorber energía [23]. La segunda microestructura es la de la tortuga laúd, la cual presenta una interfase triangular con un ángulo de  $30^\circ$  aproximadamente, dotando a su caparazón de la flexibilidad necesaria para sumergirse a profundidades mayores de 1000 m lo que supone presiones de más de 10 MPa [24]. La tercera imagen corresponde a la microestructura del caparazón de los ammonites.

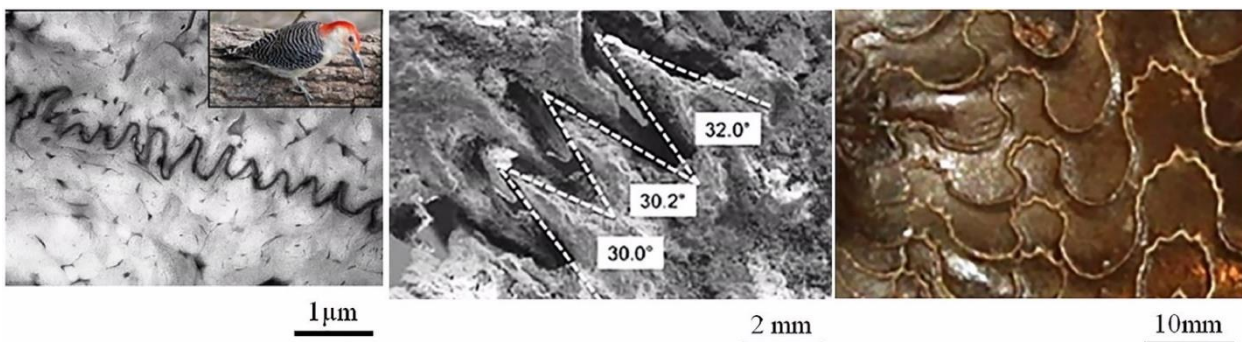


Figura 2.2 Interfases estructuradas presentes en la naturaleza [3]

En definitiva, en los últimos años se han realizado diferentes investigaciones para poder comprender de forma más exhaustiva el comportamiento de las interfases estructuradas y así poder mejorar los diferentes diseños en cuanto a la capacidad de aguantar el daño se refiere. La mayoría de estos estudios se han hecho con materiales metálicos o con polímeros [19, 20] y solo algunos se han realizado con materiales compuestos. En este trabajo de investigación todas las probetas han sido fabricadas con material compuesto (Onyx reforzado con fibra de vidrio).

En este estudio de interfases estructuradas se compararán interfases de superficie plana con otras que presenten patrones estructurales, en este caso trapecios, generando así rugosidades a nivel estructural. Dichas estructuras van a ser creadas a partir de procesos de fabricación aditiva, lo cual supone un avance en cuanto a rapidez y precisión de ejecución sobre todo si se trata de fabricar piezas de pequeño tamaño [2].

Para evaluar la utilidad de este tipo de interfases, se usará el ensayo Single-lap. Una vez que hayan sido fabricadas las probetas, éstas serán ensayadas para posteriormente poder realizar una comparativa entre ambos tipos de superficies, con la finalidad de demostrar que el hecho de tener una superficie rugosa aumenta la resistencia a cortadura de la unión.

## 2.2 Single-Lap Joint

En este apartado se explicará de forma más detallada en que consiste este método también llamado ensayo de cortadura simple. El ensayo Single-lap joint consiste en traccionar los extremos de dos probetas unidas a través de una zona de solape, con lo que obtendremos el valor de carga última que es capaz de soportar. La unión se puede realizar mediante adhesivo, remaches, soldadura, tronillos o pasadores, en función del uso que se le quiera

dar, en este caso usaremos un adhesivo epoxi. Este tipo de uniones son de las más comunes hoy en día, siendo usadas cada vez más en los controles de calidad, debido en cierto modo a su facilidad de ejecución.

La utilidad de usar un adhesivo epoxi para la unión se debe a que a nivel microscópico cuando esta trabaje a cortadura se formarán grietas con un ángulo de  $45^\circ$  con respecto a la dirección de aplicación de la carga. Estas irán aumentando hasta llegar a la interface con los adherentes y debido a la mayor tenacidad de estos, la grieta no seguirá aumentando hasta llegar a un modo I, sino que cambiará su trayectoria y comenzará a desarrollarse en modo II, lo cual permite obtener una mayor tenacidad. Este cambio en la trayectoria de la grieta se puede observar mejor en la Figura 2.3.

Este comportamiento a nivel microscópico provoca que a nivel macro cuando la unión se está rompiendo podamos ver como poco a poco se va fisurando, sobre todo en las uniones con interfase estructurada, donde la grieta debería propagarse por los dientes.

El hecho de usar este ensayo permite que las cargas se distribuyan mejor a lo largo de la zona de solape, impidiendo que se generen concentración de tensiones, además que mejora la ligereza [4].

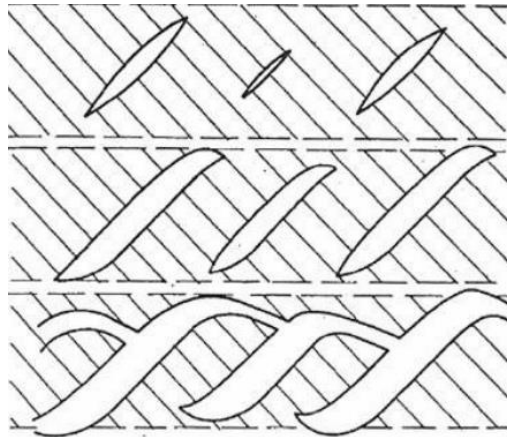


Figura 2.3 Propagación de la grieta en el ensayo de cortadura [26]

Un factor que considerar a la hora de realizar este ensayo es evitar o reducir en la medida de lo posible que la carga que se le va a aplicar a la probeta tenga una cierta excentricidad, ya que esto generará un momento que a su vez inducirá unas tensiones de tracción perpendiculares a la zona de solape, disminuyendo así la resistencia [26]. Este concepto se puede ver mejor en la Figura 2.4.

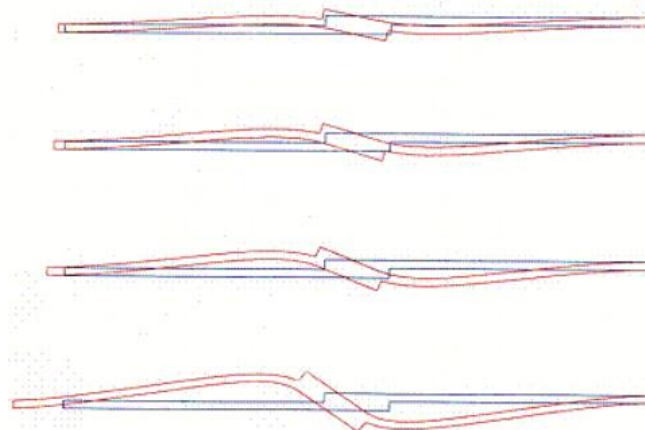


Figura 2.4 Momento asociado a carga excéntrica durante el ensayo [26]

## 2.3 Factores A Tener En Cuenta

Uno de los principales problemas que presenta este método es que la resistencia en la zona de solape va a variar en función de diferentes factores como por ejemplo la longitud de la zona de solape, el adhesivo que se va a usar o incluso el espesor de material adherente [4]. A continuación, se comentarán alguno de los efectos de estos factores.

- **Espesor del adhesivo:** según estudios realizados, un mayor espesor del adhesivo en la zona de solape produce más imperfecciones, dando lugar a una menor resistencia de ésta [4].
- **Longitud de la zona de solape:** hasta un cierto punto, a medida que la longitud de solape crece la resistencia también lo hace [6].
- **Rigidez del adherente con respecto al adhesivo:** a mayor rigidez menor deformación y, por lo tanto, la distribución de las tensiones será más uniforme en la zona de solape.
- **Curado del adhesivo:** este es otro factor a tener en cuenta ya que los coeficientes de dilatación térmica del adhesivo y de los adherentes son distintos, pudiendo generarse tensiones residuales.

Otro efecto que también afecta a la resistencia de la zona de solape según estudios realizados es como de bien se hayan preparado ambas zonas antes de ser unidas entre sí. Para ello es conveniente lijar bien de forma que se genere mayor rugosidad. Una vez que se haya lijado hay que limpiar bien con acetona [6].

Un aspecto con el que hay que tener cuidado es el calor, ya que esto podría disminuir la resistencia en el solape de ambas probetas [6].

Tras haber realizado en el ensayo las probetas pueden romper por la zona de solape de diferentes formas. Dichas formas de rotura se pueden dividir en dos grupos:

- **Rotura cohesiva:** en este caso lo que se puede ver es que en las zonas de solape de ambas probetas ha quedado adhesivo (Figura 2.5 b). En este tipo de rotura es difícil saber dónde empieza y termina la grieta [5].
- **Rotura adhesiva:** en este caso se puede ver como una de las zonas de solape tiene adherida todo el adhesivo y la otra no (Figura 2.5 a), debido a que se produce una deformación plástica. Con respecto a la anterior aquí sí que se puede ver donde empieza la fisuración [5].
- **Rotura en el sustrato:** en este caso se produce una rotura del material en vez del solape, esto se debe a una mayor fuerza del solape con respecto al material (Figura 2.5 c).



Figura 2.5 Diferentes tipos de rotura adhesiva [18]



## 2.4 Otros Tipos De Uniones Simples

- **Remachadas:** este tipo de unión consiste en realizar mediante un taladro agujeros en las zonas que van a ser unidas y pasar a través de ellos un vástago de diámetro  $d$ , con cabeza esférica. Este será calentado mientras se estampa en el otro extremo otro vástago. Una vez que se enfrían estos se contraen y comprimen las chapas.

Normalmente los remaches están hechos de diversos materiales en función del tipo de material que se quiera unir y de la resistencia que se quiera obtener. Estos materiales pueden ser hierro dulce, acero, aluminio, cobre, etc [28].

- **Uniones a tope:** es una de las más usadas, para efectuar este tipo de unión hay que situar las dos chapas en un mismo plano para luego ser soldadas entre sus bordes. Hay que intentar que la soldadura penetre lo mejor posible y así conseguir una mejor transición entre las chapas que se van a soldar [29].
- **Atornilladas:** para este tipo de unión es necesario realizar orificios en las zonas de las chapas que se van a unir, para luego pasar a través de ellas un vástago de cabeza hexagonal y cuyo extremo presenta una zona roscada. Una vez que se ha pasado el vástago, por el otro extremo se colocan una arandela y una tuerca la cual se irá apretando hasta que ambas chapas queden bien apretadas [28].

## 3 PROCESOS DE FABRICACIÓN ADITIVA

Como se ha indicado anteriormente, en este capítulo se comentaran las ventajas e inconvenientes de la fabricación aditiva así como, los diferentes procesos de fabricación aditiva que existen, destacando cuál de estos procesos se va a usar para la realización de este trabajo. Por último, se expondrán algunos sectores donde se usa este tipo de fabricación.

La fabricación aditiva es un proceso por el cual se puede obtener un objeto en 3 dimensiones, a partir de la superposición de capas de material. El diseño de dicho objeto es introducido en la impresora a partir de un modelo digital realizado en CAD.

El hecho de combinar varias piezas para así poder obtener el resultado deseado es la gran diferencia entre la fabricación aditiva y la sustractiva, la cual obtiene el producto final eliminando material de partida.

### 3.1 Ventajas e inconvenientes

Las ventajas de la fabricación aditiva son las siguientes [9]:

- **Mayor fabricación de piezas internamente:** a veces las empresas tienen que subcontratar a otras para la fabricación de determinadas piezas, lo que hace que dependan de las herramientas y maquinarias de otros. Además, esto implica un aumento en el coste de producción, disminución de tiempo de entrega y posibles problemas de calidad en las piezas. Es por ello que el avance en la fabricación aditiva ha supuesto una gran ventaja en las empresas, a la hora de no depender de otras, y poder fabricar sus propias piezas. De esta forma también permite a la empresa proteger sus secretos comerciales y sus innovaciones.
- **Reducción de los costes de producción:** la impresión 3D permite a los fabricantes ahorrar grandes sumas de dinero con respecto a los procesos mecanizados. Para muchas de las empresas apostar por estos procesos de fabricación aditiva les supone un retorno de la inversión casi inmediato.
- **Libertad y complejidad en los diseños:** el uso de impresoras 3D, permiten a través del software CAD diseñar infinidad de objetos con geometrías complejas, las cuales no serían posibles en procesos de mecanizados.
- **Rapidez en los plazos de entrega:** el tiempo que se tarda desde que se obtiene el diseño hasta que se obtiene el objeto es muy poco en comparación con los procesos de fabricación sustractiva. Por lo tanto, el periodo de tiempo que conlleva la fabricación de una pieza se reduce considerablemente.
- **Control en la cadena de suministro:** gracias a la impresión 3D la empresa puede controlar toda la cadena de suministro, lo cual les permite reducir la dependencia de empresas externas.
- **Capacidad de innovación:** el hecho de apostar por los procesos de fabricación aditiva permite a las empresas centrarse en la innovación del producto, además de poder ir resolviendo aquellos problemas que se presenten. Con la impresión 3D las empresas no tienen que sufrir las limitaciones innecesarias que provocan los procesos de fabricación sustractiva.

Los inconvenientes de la fabricación aditiva son los siguientes [9] [10]:

- **Costes de producción a gran escala:** uno de los problemas que tiene la fabricación aditiva es cuando la producción de piezas se realiza en grandes cantidades, ahí el coste se hace muy grande. Desde el punto de vista económico es mejor cuando la producción es pequeña.

- **Costes en producciones sencillas:** cuando la pieza a construir es muy simple, el coste de usar un proceso de fabricación aditiva es mayor con respecto a los procesos de producción tradicionales.
- **Limitaciones en la producción:** unos de las grandes desventajas de la impresión 3D por ahora es la fabricación de piezas de gran tamaño. Aun así, los fabricantes de impresoras siguen trabajando para solventar este problema.
- **Coste de material:** los materiales usados en la impresión 3D suelen costar más que los usados en otros procesos, esto es debido al tedioso proceso que se debe aplicar a los materiales para poder usarlos en los procesos de fabricación aditiva.
- **Anisotropía:** un problema que presentan los objetos fabricados con impresión 3D es que la pieza en función de cómo haya sido impresa puede no tener las mismas propiedades mecánicas en todas sus dimensiones. Por ejemplo, el hecho de imprimir las capas a 45° con respecto a la fuerza que se va a ejercer mejora su resistencia.
- **Repetibilidad:** durante un proceso de fabricación aditiva es complicado garantizar que las piezas fabricadas sean exactamente iguales, esto es debido a dos factores, el primero es la anisotropía y el segundo la gran variedad de parámetros que se pueden cambiar durante el proceso.
- **Estándares:** a nivel industrial es muy importante estar seguro de que las piezas cumplen con los estándares establecidos. Problemas con la anisotropía o la capacidad de asegurar la repetibilidad en el proceso de producción dificulta el establecimiento de unos estándares. A pesar de que se sigue trabajando en ello, todavía no se han conseguido unos estándares fijos.

### 3.2 Tipos de procesos de fabricación aditiva

A pesar de que este trabajo de investigación ha sido realizado con un único proceso de fabricación aditiva es importante conocer los diversos procesos que existen [9]:

1. **Modelado por deposición fundida (FDM):** este proceso también conocido como fabricación con filamento fundido (FFF), consiste en la extrusión de un hilo termoplástico capa a capa sobre una placa para así poder dar forma al objeto, como se muestra en la Figura 3.1.

Este tipo de proceso tiene la ventaja de reducir costes, fabricación de piezas con mayor resistencia y ligereza, además de dotarlas de cierta tolerancia al calor. Como principal desventaja es el fenómeno de anisotropía que pueden tener las piezas.

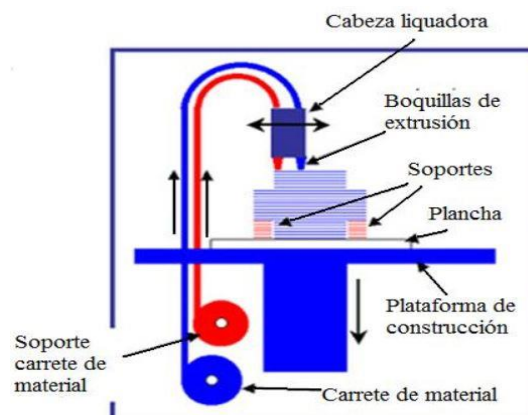


Figura 3.1 Proceso de fabricación mediante modelado por deposición fundida (FDM) [11]

2. **Inyección de aglutinante:** en este proceso la pieza se crea con material en polvo, el cual se deposita en la placa de impresión, capa a capa hasta obtener el objeto en 3D. Tras imprimir cada capa de material, se usa un adherente líquido de forma que el polvo se pegue, adquiriendo forma sólida para así poder empezar con la siguiente capa.

Sus ventajas son la precisión, velocidad y reducción de costes, esto se debe a que la maquinaria tiene diversos cabezales por los que inyecta aglutinante. Su desventaja es la reducción en la resistencia de la pieza con respecto a otros procesos de fabricación aditiva en metal.

3. **Estereolitografía (SLA):** la metodología de este proceso es el curado de un plástico líquido sensible a la luz para la fabricación de la pieza. Se expone cada capa a un láser ultravioleta, permitiendo endurecer las capas de forma rápida. Una vez que la capa ha sido curada, se adhiere a la siguiente hasta obtener la pieza. Este proceso puede ser observado de forma gráfica en la Figura 3.2.

Este tipo de proceso se caracteriza por su precisión, detalle, complejidad y coste del equipo. Su principal problema es que las piezas de mayor tamaño podrían deformarse, además los objetos fabricados con este proceso carecen de resistencia.

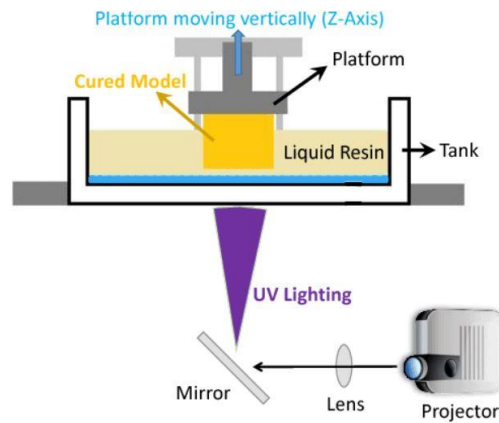


Figura 3.2 Proceso de fabricación por estereolitografía (SLA) [12]

4. **Sinterizado selectivo por láser (SLS):** durante este proceso se usan láseres para poder adherir el material, el cual viene en forma de polvo, y así poder obtener el objeto final. La impresora 3D apunta con el láser a puntos concretos donde esté el lecho de polvo, tal y como se puede ver en la Figura 3.3.

Como ventajas hay que destacar su precisión y resistencia igual en todas las direcciones. Sus inconvenientes son las costosas maquinarias y su mantenimiento, además de la necesidad de contar con personal cualificado.

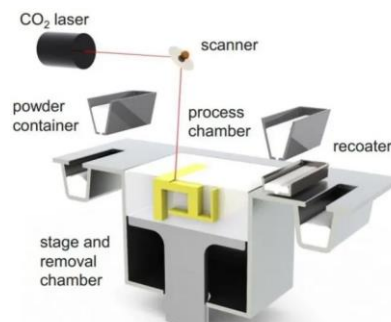


Figura 3.3 Proceso de fabricación mediante sinterizado selectivo por láser (SLS) [13]

5. **Sinterizado de metal por láser (DMLS):** este proceso tiene un funcionamiento similar al anterior (SLS), con la diferencia de que este funde por completo las partículas de polvo.

Los principales puntos a favor de este tipo de procesos son: la estabilidad de las propiedades mecánicas, la amplia disponibilidad de materiales y la repetibilidad a la hora de fabricar las piezas. Sus puntos negativos son la dificultad en la adquisición y control de la maquinaria, por lo tanto, se requiere de personal cualificado.

6. **Fabricación con filamento fundido de metal:** en este proceso se parte de un polvo metálico adherido con plástico el cual se aplica capa por capa hasta crear la pieza. Después la pieza se limpia con una solución de aglomerante y se aglutina en un horno, de esta forma se quema el aglutinante de plástico y las partículas de polvo metálico se unen.

Las principales ventajas de este tipo de proceso son la gran disposición de material, la reducción de los costes, la precisión y, por último, el uso de polvo aglomerante debido a su facilidad en el uso y seguridad. El pequeño inconveniente que tiene este tipo de procesos es que las piezas fabricadas no son completamente macizas por lo tanto su densidad no está completa y son más ligeras.

7. **Procesamiento digital de luz (DLP):** este tipo de proceso es muy parecido al SLA. La gran diferencia es que el DLP cura cada capa de material con una fuente de luz proyectada, obsérvese la Figura 3.4.

Los puntos a favor que tiene es la velocidad y la capacidad de fabricar productos complejos con gran precisión. Los puntos en contra son el olor que desprende cuando la impresora está funcionando y el problema asociado a la deformación en las piezas de gran tamaño.

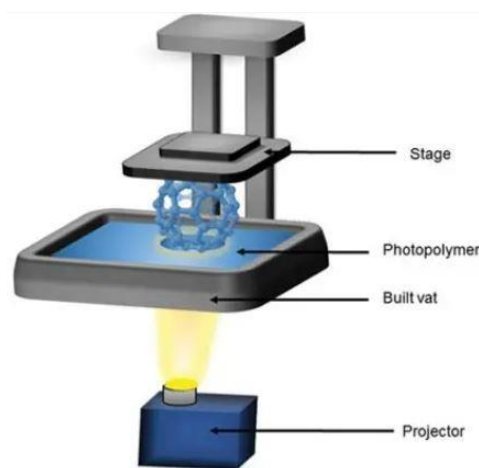


Figura 3.4 Proceso de fabricación por procesamiento digital de luz (DLP) [14]

8. **Deposición de energía directa (DED):** para este proceso las piezas son fabricadas con hilos metálicos o metal en polvo y un láser. La impresora tiene una boquilla situada en un brazo biónico multieje, esto permite que el material pueda ser depositado en cualquier ángulo (ver Figura 3.5). Tras haber depositado el material, éste se funde con un haz de electrones.

Sus dos principales ventajas son la posibilidad de fabricar piezas metálicas de gran tamaño y poder reparar piezas existentes. Los problemas de este proceso es el alto coste de la maquinaria, contratar a personas cualificadas para el uso de la maquina y contar con unas salas específicas para el uso del material en polvo.

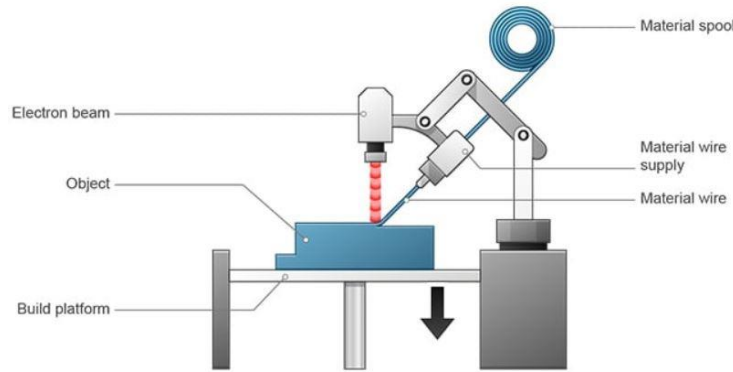


Figura 3.5 Proceso de fabricación por deposición de energía directa (DED) [15]

9. **Fusión por haz de electrones (EBM):** todo el proceso se realiza en una cámara de vacío, donde el metal en polvo es fundido capa a capa mediante un haz de electrones de gran energía, guiados por un campo magnético, obsérvese la Figura 3.6.

Sus ventajas más importantes son la velocidad de fabricación, así como su precisión y alta resistencia de las piezas fabricadas. Como principal inconveniente se necesita a personal cualificado para la manipulación de la impresora.

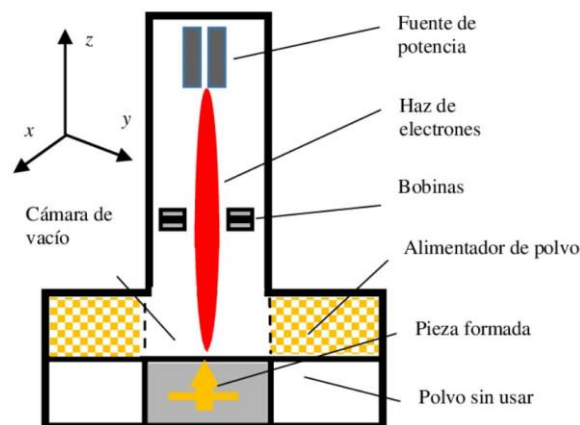


Figura 3.6 Proceso de fabricación mediante fusión por haz de electrones (EBM) [16]

10. **Impresión Multijet (MJP):** este proceso también es conocido como inyección de material (MJ), ya que se depositan gotas de material fotorreactivo en la forma de cada capa. Para poder solidificar el material se usa luz ultravioleta. En la Figura 3.7 se puede ver gráficamente las fases de este proceso.

La principal ventaja es la posibilidad de fabricar piezas con varios materiales y colores. Por el contrario, la resistencia y durabilidad de las piezas son bajas.

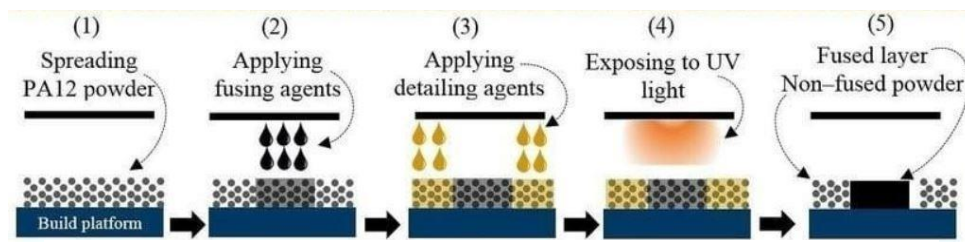


Figura 3.7 Proceso de fabricación por impresión Multijet (MJP) [17]

### 3.3 Aplicaciones de los procesos de fabricación aditiva

A continuación, se expondrán las distintas aplicaciones que tiene la fabricación aditiva en diferentes sectores hoy en día [9].

1. **Sector energético:** en este sector se usa la impresión 3D para fabricar piezas de forma que la construcción y mantenimiento de los aerogeneradores sea más rápido, simple y eficiente.
2. **Sector de la maquinaria industrial:** en este tipo de sectores se fabrican herramientas personalizadas con impresión 3D. Además, el uso de este tipo de procesos les permite lanzar al mercado de forma más rápida piezas para diferentes tipos de sistemas de maquinaria industrial.
3. **Sector sanitario:** gracias a la impresión 3D, los fabricantes de dispositivos y equipos médicos fabrican desde hebillas para torniquetes hasta equipos de protección individual para el COVID-19.
4. **Sector aeronáutico:** el uso de procesos de fabricación aditiva les permite imprimir piezas resistentes y ligeras para aviones y cohetes, además de poder fabricar herramientas a un costo reducido y con mayor rapidez.
5. **Sector educativo:** desde muchas universidades se están usando los procesos de fabricación aditiva para la formación de futuros científicos, ingenieros y fabricantes.
6. **Sector científico:** a través de la impresión 3D las diferentes empresas científicas fabrican piezas que luego se usarán en sistemas de automatización de laboratorios.
7. **Sector dental:** a partir de los procesos de fabricación aditiva se fabrican modelos para prótesis o dentaduras postizas.
8. **Sector militar:** el uso de la fabricación aditiva ha permitido a los Ejércitos de Tierra y Aire poder desarrollar los trabajos en I+D de forma más rápida, además de poder imprimir piezas de vital importancia que luego serán usadas en ubicaciones que se encuentran a una cierta distancia.

# 4 IMPRESORA MARK TWO

**E**n este capítulo se va explicar todo el proceso a realizar desde que se diseña la probeta mediante software CAD hasta que se pasa a la impresora, para luego fabricar la probeta. También se comentará el funcionamiento de la impresora, y de su programa que permite configurar cómo se quiere imprimir la pieza, desde la orientación de las capas hasta el material con el que se va a fabricar.

## 4.1 Funcionamiento de la impresora 3D

En este apartado se va a explicar de forma escueta como hay que usar la impresora y cuáles son sus opciones más importantes. Para el uso de este tipo de impresora es muy importante que el usuario lea el manual facilitado por la empresa Markforged.

Antes de encender la máquina y ponerla en funcionamiento, es importante estar seguros de que hay material suficiente para imprimir la pieza, ya que si no hay material suficiente la impresora seguirá imprimiendo la pieza sin el material. En el caso de que el material sea nuevo no hay problema, si el material ya ha sido usado hay que pesarlo e introducir la medida en la máquina.

Otro paso muy importante antes de empezar a imprimir es comprobar que la máquina está bien calibrada, ya que, si no lo está pueden producirse errores en la impresión. Estas imperfecciones generadas en la pieza se comentarán con más detalle en el próximo capítulo.

En cuanto a los materiales, es fundamental tener en cuenta dos aspectos. En primer lugar, el material Onyx debe estar guardado en unas condiciones óptimas, de no ser así pierde parte de sus propiedades. El segundo aspecto al que hay que prestar atención es al cargar la fibra de vidrio, la cual es muy frágil, es importante asegurarse que no esté doblada en ninguna zona.

La impresora consta de dos cabezales una para la extrusión del material termoplástico, Onyx en este caso y otro para la fibra de vidrio. Antes de imprimir es importante preparar bien la cama donde se va a depositar el material, para ello hay que añadir un pegamento, de esta forma se asegura que la pieza quede bien fabricada. En la Figura 4.1 se puede observar la impresora Mark Two mientras fabrica una probeta.



Figura 4.1 Impresora Mark Two fabricando una probeta estructurada

Una vez que se ha terminado de fabricar la pieza hay que remover el material con una espátula y luego limpiar el adhesivo que ha quedado en la cama de la impresora.



## 4.2 Materiales que se van a usar

Para la realización de este trabajo se van a usar los siguientes dos materiales.

- **Onyx:** uno de los principales problemas del uso de termoplásticos son sus propiedades mecánicas, las cuales no son muy buenas. Por ello, se usan materiales compuestos. Sin embargo, en piezas con geometrías complejas no siempre es factible incluir filamentos de fibra continua, especialmente en zonas donde el ángulo de la trama tiende a cambiar abruptamente (normalmente coincidiendo con zonas que presentan concentradores de esfuerzos como esquinas, muescas, etc.). Este es el caso del Onyx, el cual está formado por un termoplástico, el Nylon y reforzado con unas microfibras de carbono, dotándolo de una mayor resistencia. Su color es negro y como se ha comentado antes es muy importante que el paquete donde llega esté bien sellado. Posteriormente se guarda en una caja sellada para reducir la humedad lo máximo posible debido a que este material es hidrófilo, es decir cuando entra en contacto con la humedad sus propiedades mecánicas se reducen. En la figura 4.2 se puede ver la caja donde se guarda el Onyx.



Figura 4.2 Caja sellada donde se introduce el Onyx

El Onyx viene en paquetes de 800 cm<sup>3</sup> y el cabezal tiene que adquirir una temperatura de 260° para que pueda ser extruido. En la Figura 4.3 se puede ver el material Onyx dentro de la caja de sellado, también se pueden ver en el fondo de esta unas bolsas para absorber la humedad que quede en el interior.



Figura 4.3 Onyx dentro de la caja de sellado

- **Fibra de vidrio:** el uso de las fibras es una parte importante de este trabajo, ya que permite reforzar la pieza, para así aumentar aún más sus propiedades mecánicas. Estas fibras irán rellenando los huecos que deja el Onyx. Las diferentes formas de llenado se explicarán más adelante. Entre las diferentes propiedades que tiene este tipo de material destacan su gran resistencia mecánica, buen aislamiento térmico y eléctrico, además de su ligereza. Por ejemplo, si se compara con un material como el acero su resistencia es mayor. Para este trabajo se han usado rollos de fibra de vidrio de 150 cm<sup>3</sup>, dichos rollos se pueden observar con más claridad en la Figura 4.4.

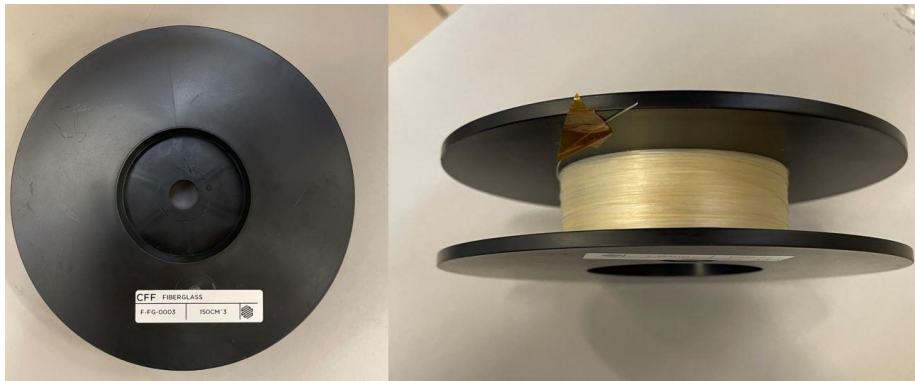


Figura 4.4 Rollo de fibra de vidrio de 150 cm<sup>3</sup>

Las propiedades de los materiales que se acaban de comentar se ven reflejados en las Tablas 4.1 y 4.2.

Continuous Fiber	Fiberglass
Tensile Strength (MPa)	590
Tensile Modulus (GPa)	21
Tensile Strain at Break (%)	3.8
Flexural Strength (MPa)	200
Flexural Modulus (GPa)	22
Flexural Strain at Break (%)	1.1
Compressive Strength (MPa)	140
Compressive Modulus (MPa)	21
Compressive Strain at Break (%)	—
Heat Deflection Temp (°C)	105
Izod Impact - notched (J/m)	2600
Density (g/cm <sup>3</sup> )	1.5

Tabla 4.2 Propiedades de la Fibra de Vidrio

Composite Base	Onyx
Tensile Modulus (GPa)	2.4
Tensile Stress at Yield (MPa)	40
Tensile Stress at Break (MPa)	37
Tensile Strain at Break (%)	25
Flexural Strength (MPa)	71
Flexural Modulus (GPa)	3.0
Heat Deflection Temp (°C)	145
Flame Resistance	—
Izod Impact - notched (J/m)	330
Surface Resistance (Ω)	—
Density (g/cm <sup>3</sup> )	1.2

Tabla 4.1 Propiedades del Onyx

### 4.3 Software usado para la modelización

En este trabajo se ha usado el programa Civil 3D de Autocad para modelizar las probetas, aunque se podrían haber usado muchos otros, por ejemplo, CATIA o SolidWorks. En concreto, dentro del programa Civil 3D, se ha trabajado con el espacio de trabajo facilitado por el programa llamado Modelado 3D.

Este entorno permite a través de la polilínea crear elementos rectangulares y formas poliédricas, lo cual es perfecto para el diseño de las probetas. Una vez diseñada, el propio Civil 3D da la opción de extruir dotando al diseño de una forma en tres dimensiones. Una vez que se ha finalizado la pieza, se exporta en formato STL de forma que se pueda exportar al programa de la impresora, del cual se hablará en el siguiente apartado.

En cuanto al diseño detallado de las probetas, así como sus dimensiones se expondrán en el siguiente capítulo.

## 4.4 Aplicación de la impresora

La empresa Markforged facilita de forma gratuita su aplicación on-line Eiger, el cual sirve para realizar los pasos intermedios desde que se modeliza la probeta hasta que se imprime. A través de este programa, es posible seleccionar el tipo de material con el cual se va a fabricar la probeta, si queremos reforzarla con algún material y qué material sería. También se puede elegir el patrón de llenado del refuerzo, orientación de las capas y otras opciones que se explicarán en detalle a lo largo de este trabajo.

El primer paso, una vez que se entra en el programa, consiste en crear una carpeta personal donde se irán metiendo los diferentes diseños realizados. Para ello, en la pestaña ubicada en la parte superior derecha, está la opción de *Create Folder*. Una vez dentro de la carpeta, arriba a la derecha se encuentra la pestaña de *Import STL*, el cual nos permite importar todos los archivos STL generados con Civil 3D. En la Figura 4.5 se puede ver el menú principal de Eiger con las pestañas de *Create Folder e Import STL*.

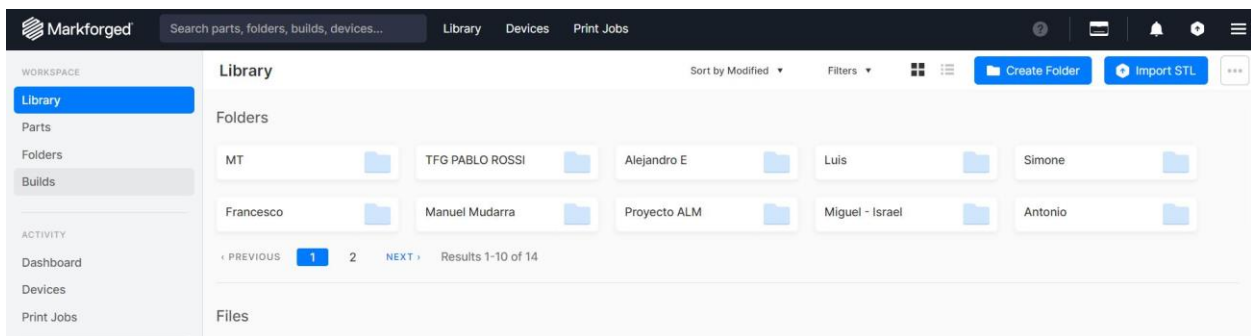


Figura 4.5 Menú principal programa online Eiger de Markforged

Después de haber importado los archivos, ya se pueden abrir. Tras abrir una de las probetas modeladas en la parte izquierda de la pantalla aparece información de la probeta, como su dimensión, el tiempo estimado de impresión, peso final de la pieza, volumen de material plástico y fibra utilizados. También se muestra el costo de fabricar la pieza.

En la pestaña *Versions* aparece un registro de todas las modificaciones que se han ido realizando en la pieza y en *Print Jobs* se puede ver cuantas veces se ha impreso la misma pieza.

Por último, en la parte superior aparecen los *Warnings*. Éstos son las recomendaciones que el programa hace sobre la pieza, indicando por ejemplo que tal y como está configurada la pieza quizás tenga algunos problemas de acabado. Al fin y al cabo, son solo recomendaciones las cuales hay que tener en cuenta, pero no van a imposibilitar la impresión.

Lo que si va a impedir que la impresora imprima es si aparece algún mensaje en *Error*. En ese caso hay que leer el mensaje que nos da y ver cómo se puede modificar la probeta para que se pueda fabricar. Durante todo el trabajo nunca ha aparecido ningún mensaje de error y por lo tanto todas y cada una de las piezas han podido ser impresas con normalidad. En la Figura 4.6 se puede ver la ventana del menú de configuración de Eiger, con las pestañas que se acaban de comentar y con aquella que se comentarán a continuación.

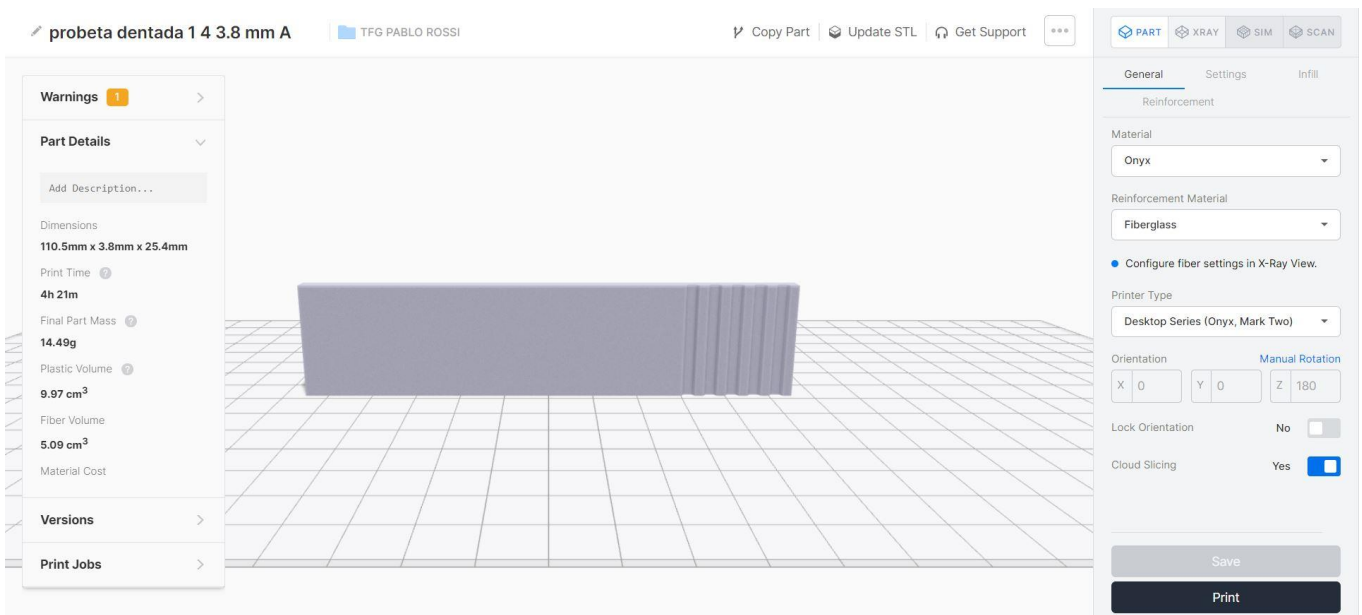


Figura 4.6 Menú de configuración del programa online Eiger de Markforged

En la parte derecha de la ventana aparecen todos aquellos parámetros que pueden ser modificados por el usuario. Los cuales se irán comentando poco a poco.

- **General:** este primer menú permite la elección del material con el cual se va a imprimir la probeta en este caso se usará Onyx. Luego podemos elegir si queremos añadir fibra de refuerzo, en este caso se añade fibra de vidrio tal y como se ha comentado en el capítulo anterior.

Luego debemos seleccionar el tipo de impresora que se va a usar en este caso Mark Two. Por último, podemos elegir la orientación con la que se va a imprimir la pieza. Dicha orientación se puede ir cambiando, variando los valores numéricos o también está la opción de ir girando la pieza con el ratón hasta encontrar la posición deseada.

Una vez que se ha elegido la orientación óptima, se puede fijar activando la opción *Lock Orientation*.

- **Settings:** dentro de esta pestaña del programa se puede fijar el espesor de las capas que se irán imprimiendo para formar la pieza. Si anteriormente se ha elegido algún tipo de refuerzo ese espesor de capa se fija automáticamente, ya que en este trabajo se va a usar fibra de vidrio, el propio programa fija el valor óptimo de espesor, en este caso 0,1 mm.

Posteriormente se puede elegir el sistema de medida a usar (S.I.) y la escala en este caso 1:1. Para finalizar con la configuración de esta pestaña, aparecen una serie de opciones.

- **Use supports:** si se activa esta opción la impresora genera un soporte el cual impide el colapso durante la impresión de piezas que tengan voladizos o una esbeltez importante.
- **Expand Thin Features:** al activarlo la impresora aumenta los detalles o bordes de una pieza de forma que no se produzcan imperfecciones a la hora de imprimir.
- **Use Brim:** esta última opción permite mejorar la estabilidad durante la impresión de piezas donde el contacto de su superficie con la cama de impresión no es bueno.

1. **Infill:** la impresora Mark Two permite fabricar piezas con diferentes patrones de llenado. Es en este menú donde se puede elegir el patrón de impresión, en mi caso se usará un patrón solid fill. Una vez elegido el patrón, se puede seleccionar la densidad de llenado.

Para acabar con este menú hay que elegir cuantas capas de suelo y muro se quieren, en este caso se han optado por poner dos capas de muro y dos de suelo.

2. **Reinforcement:** este es el último menú, donde primero se puede determinar el número de capas que se quieren que vayan reforzadas. Para este trabajo todas las capas de las probetas irán reforzadas. Una vez que se ha seleccionado el número de capas con refuerzo hay que indicar el patrón de llenado de la fibra, el cual puede ser *Concentric Fiber* o *Isotropic Fiber*.

La última opción posibilita la impresión de anillos de fibra exteriores antes de empezar a rellenar el interior por completo. Todas las pestañas comentadas pueden verse con más claridad en la Figura 4.7.

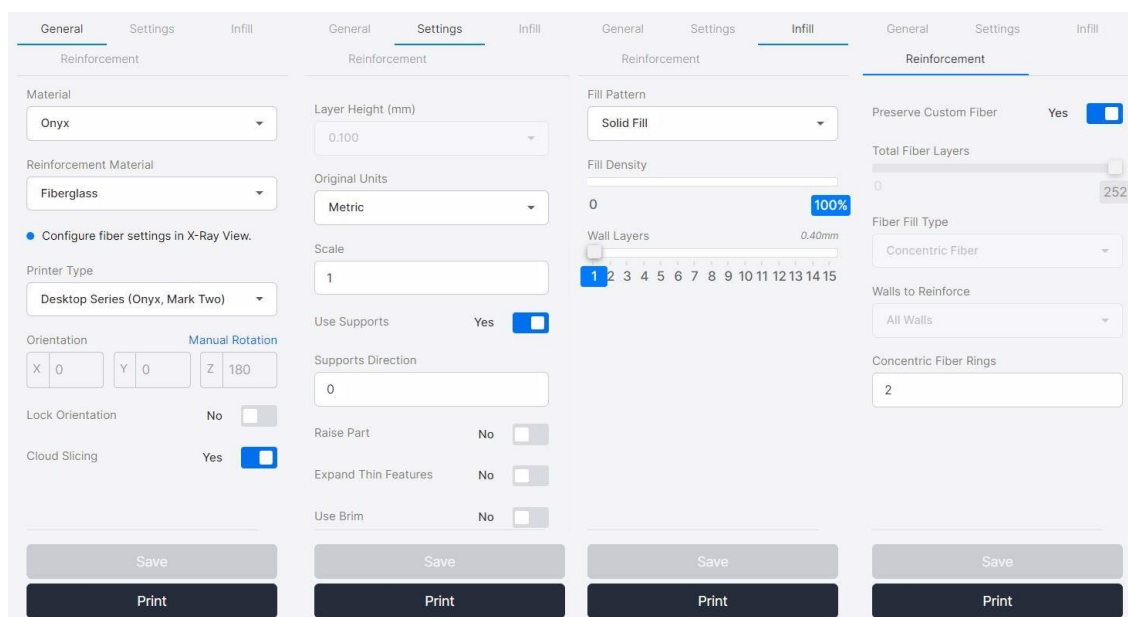


Figura 4.7 Pestañas de la parte derecha del menú de configuración del programa Eiger de Markforged

Tras haber finalizado con la configuración de la probeta, hay que darle en la parte inferior derecha donde pone *SAVE* para guardar los ajustes y posteriormente clicar en *XRAY*. Es muy importante acceder a este menú de previsualización antes de exportar el archivo ya que se podrá ver una simulación en 2D y 3D de cómo la impresora va a ir fabricando la probeta, es aquí donde nos podremos dar cuenta si algo se está haciendo mal antes de empezar.

A la izquierda de este menú nos aparecerá información referente a la probeta que se va a fabricar, como el tiempo total de impresión, volumen de material plástico y de refuerzo y, por último, el coste de fabricación.

Arriba se puede modificar la forma de visualizar la pieza a través de las pestañas 2D o 3D. La barra que se encuentra debajo del menú permite ir viendo capa a capa como se ha ido imprimiendo la pieza.

En la parte derecha del menú, se encuentran una serie de parámetros que ya aparecían en la anterior configuración. Sin embargo, hay uno en concreto a tener en cuenta y es donde pone *Start Rotation Percent*, Este parámetro determina desde qué punto la impresora comenzará a imprimir la fibra, en función del valor que se le dé la impresora empezará a imprimir la fibra desde un punto u otro. Es importante fijar un valor concreto y sobre todo que sea en uno de los extremos de la probeta, ya que, si no se hace, en cada capa la impresora empezará a imprimir fibra en puntos distintos. En la figura 4.8 se puede ver el menú de XRAY del cual se ha hablado.



Figura 4.8 Menú de configuración XRAY del programa Eiger de Markforged

Tras asegurar que todo está correcto y que la pieza va a ser impresa debidamente se le da al botón de PRINT. Una vez exportado el archivo se pasa a un pen drive, para que la impresora pueda leerlo.



## 5 DISEÑO Y ERRORES DE IMPRESIÓN

**E**n este capítulo se van a explicar los diseños de las probetas que se han realizado junto con sus medidas, así como todo el proceso a realizar desde su modelización en civil 3D hasta que se imprime. Además, se comentarán algunas imperfecciones producidas durante la impresión y que hay que hacer para evitarlas.

### 5.1 Diseño de las probetas

El objetivo de este trabajo es la impresión de probetas con superficie plana y estructurada para luego poder compararlas entre sí, y determinar qué efectos generará en las propiedades mecánicas de las mismas el hecho de cambiar la superficie de solape plana por una superficie con estructura dentada.

Para el diseño de las probetas me he basado en algunos artículos realizados con anterioridad [2, 25], de esta forma he podido obtener cuales eran los rangos de longitudes máximas y mínimas sobre los que me podía mover.

En total se van a diseñar cinco probetas de cada tipo siguiendo las especificaciones detalladas en [8]:

- **Probeta plana:** esta probeta se diseñó con una forma rectangular siguiendo las especificaciones requeridas en la Norma [8]. Tiene un espesor de 3,8 mm, inferior a 4,76 mm que es el máximo admitido [8]. La longitud de solape es de 25 mm. Para la longitud de solape no hay una restricción como tal, aunque en algunos estudios se han ensayado probetas de 15, 25 y 40 mm de longitud de solape. Aquellas probetas con una longitud de solape de 40 mm rompieron con cargas de 24 KN, las de 25 mm con cargas de 15 KN y las de 15 mm con cargas de 10 KN, lo cual supone que a medida que se va aumentando la longitud de solape aumenta la carga a la que rompe la probeta [7].

La longitud de la probeta es de 110,5 mm, dentro del rango permitido de  $101,6 \text{ mm} \pm 0,254 + L$  siendo L la longitud de solape, establecido por la Norma [8]. Ya que la distancia desde el final del agarre hasta el final de la zona de solape tiene que ser de 63 mm [8]. La longitud de agarre se ha fijado en 22,5 mm, considerada suficiente para asegurar un agarre seguro de la pieza y evitar deslizamiento de la probeta. Por último, la anchura de la probeta es de 25,4 mm, siendo válido según la Norma [8] valores de  $25,4 \text{ mm} \pm 0,254$  [8]. En las Figuras 5.1 y 5.2 se puede observar la modelización de la probeta plana.

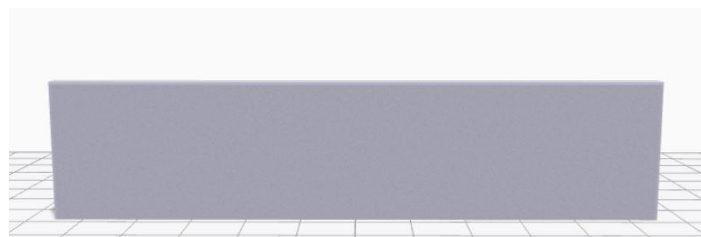


Figura 5.1 Probeta plana vista frontal

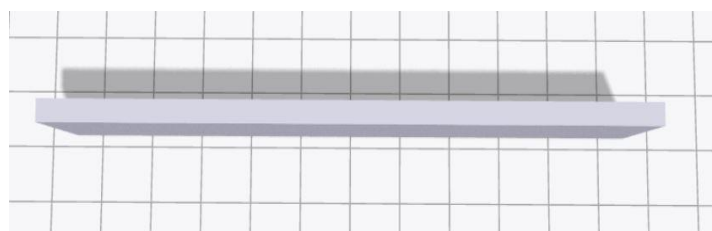


Figura 5.2 Probeta plana vista en planta

- **Probeta estructurada:** para el diseño de la probeta estructurada se ha partido de una probeta plana a la cual se le ha cambiado la superficie en la zona de solape, pasando a ser una superficie rugosa o estructurada formada por una serie de trapecios. Dichos trapecios tienen una amplitud de 1 mm y una longitud de onda de 5 mm. Estos valores se han tomado así por dos razones. En primer lugar, permiten que la fibra rodee bien los bordes de la zona estructurada. En segundo lugar, para garantizar que el espesor total de la pieza no supere los 4,76 mm especificados por la Norma [8], como se mencionó anteriormente.

Ni la longitud ni la amplitud están sujetas a unos valores fijos, a pesar de que en algunos estudios [2, 19, 25] se suele usar una amplitud de 2 mm, que se ha identificado como el valor óptimo encontrado para maximizar las propiedades mecánicas cuando se emplean interfases estructuradas. En nuestro caso, se ha optado por reducir esta amplitud a 1 mm para asegurar que no exceda el máximo permitido.

Las demás dimensiones como longitud de solape, de agarre, espesor, ancho y longitud total de la pieza son las mismas que en la probeta plana. Su espesor de solape también debe ser el mismo ya que una vez que hayan sido testeadas van a ser comparadas entre sí, y por lo tanto sus dimensiones deben ser iguales.

En las Figuras 5.3 y 5.4 se pueden ver las caras A y B de la probeta estructurada.

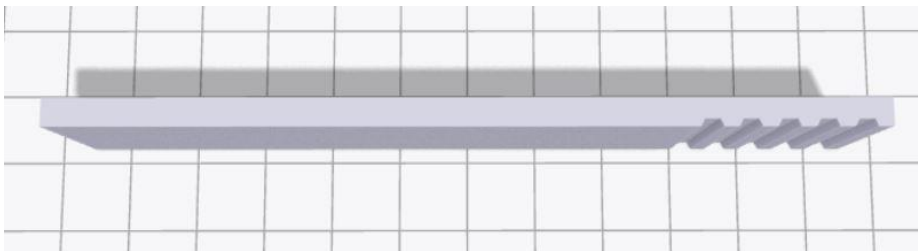


Figura 5.3 Probeta estructurada cara A

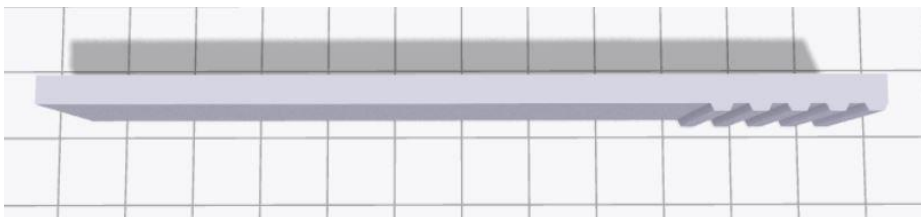


Figura 5.4 Probeta estructurada cara B

Las dimensiones de ambas probetas se podrán apreciar con mayor claridad en la Figura 5.5, teniendo en cuenta que ambas tienen un ancho de 25,4 mm.

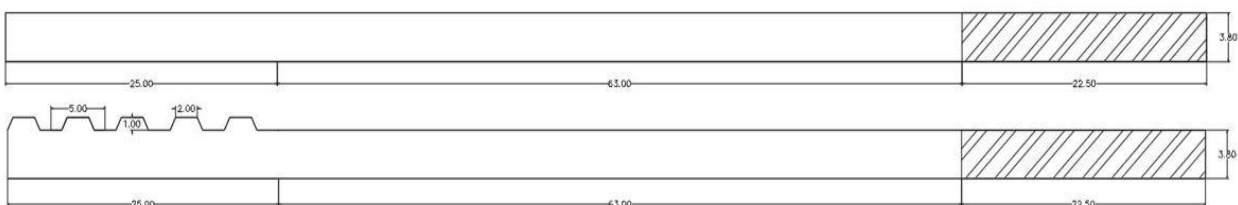


Figura 5.5 Dimensiones probetas planas y estructuradas



## 5.2 Modelización y configuración de las probetas

En este apartado se va a abordar el proceso de modelización de la probeta mediante el programa Civil 3D de la empresa AutoCad y posteriormente, cómo se ha configurado la probeta dentro del programa Eiger de la empresa Markforged.

1. **Modelización Civil 3D:** a pesar de que se pueden usar otros softwares para crear piezas en tres dimensiones yo elegí usar Civil 3D, ya que es el programa con el que estoy familiarizado debido a que es el que he usado durante toda la carrera. Para la modelización de las probetas he usado el espacio de trabajo Modelado 3D. La principal ventaja de éste es que, una vez diseñada la probeta en dos dimensiones solo hay que hacer clic en la ventana donde pone extrusión y darle el ancho o profundidad de la pieza, para así obtener la pieza en tres dimensiones. Para el diseño de la pieza en dos dimensiones se ha usado la opción de crear polilínea.
2. **Configuración de la probeta:** para la configuración de la probeta se usará el programa online Eiger. Para poder importar las probetas primero hay que exportarlas en formato STL desde Civil 3D. En el capítulo anterior se explicó todo el proceso de configuración dentro del programa Eiger, por lo tanto, en este apartado se explicará cuales parámetros se han escogido para nuestras probetas.

Dentro de la pestaña de *General*, el material plástico va a ser Onyx y el refuerzo de fibra de vidrio. La impresora va a ser la Mark Two y la orientación de la pieza  $X=0$   $Y=0$   $Z=180$ , es decir, impresa verticalmente, con la longitud y el espesor en la cama de impresión. Esta configuración va a permitir que la fibra continua alcance la zona dentada.

El tiempo de impresión estimado para cada parte de probeta con este tipo de configuración vertical es de aproximadamente 4 horas para probetas con interfaz plana y de 4.30 horas para probetas con interfaz estructurada. Aunque el tiempo de impresión sea mayor en comparación con las probetas impresas en horizontal, es decir, con la longitud y el ancho sobre la cama de impresión, se ha buscado optimizar la calidad del resultado. Además, si la pieza se imprimiese en horizontal, se podrían producir efectos no deseados como el pandeo en las esquinas de las probetas, producidos por los cambios de temperatura durante la impresión [25].

En Settings se establece el espesor de la capa en 0.1 mm por el ancho de la probeta de 25,4 mm, dado que la impresión se llevará a cabo en posición vertical. En total, la probeta consta de 254 capas, de las cuales 252 capas están reforzadas con fibra continua de vidrio. Es importante destacar que tanto la primera como la última capa, designadas como suelo y techo respectivamente, se han realizado exclusivamente con material Onyx para optimizar el acabado final de la pieza.

En el menú de relleno *Infill*, el patrón de llenado es Solid Fill y su densidad del 100%. Las capas de la pared se han fijado en 1, cuyo espesor se ha fijado el mínimo permitido por la impresora de 0,4 mm. Asimismo, las capas de techo y suelo de Onyx tienen un espesor de 0,1 mm cada una. Y por último en *Reinforcement* se ha establecido el número total de capas impresas con fibra de 252. El tipo de llenado puede ser *Isotropic Fiber* o *Concentric Fiber* y los demás parámetros se dejan en cero. En la Figura 5.6 se puede ver un resumen de toda la configuración realizada.

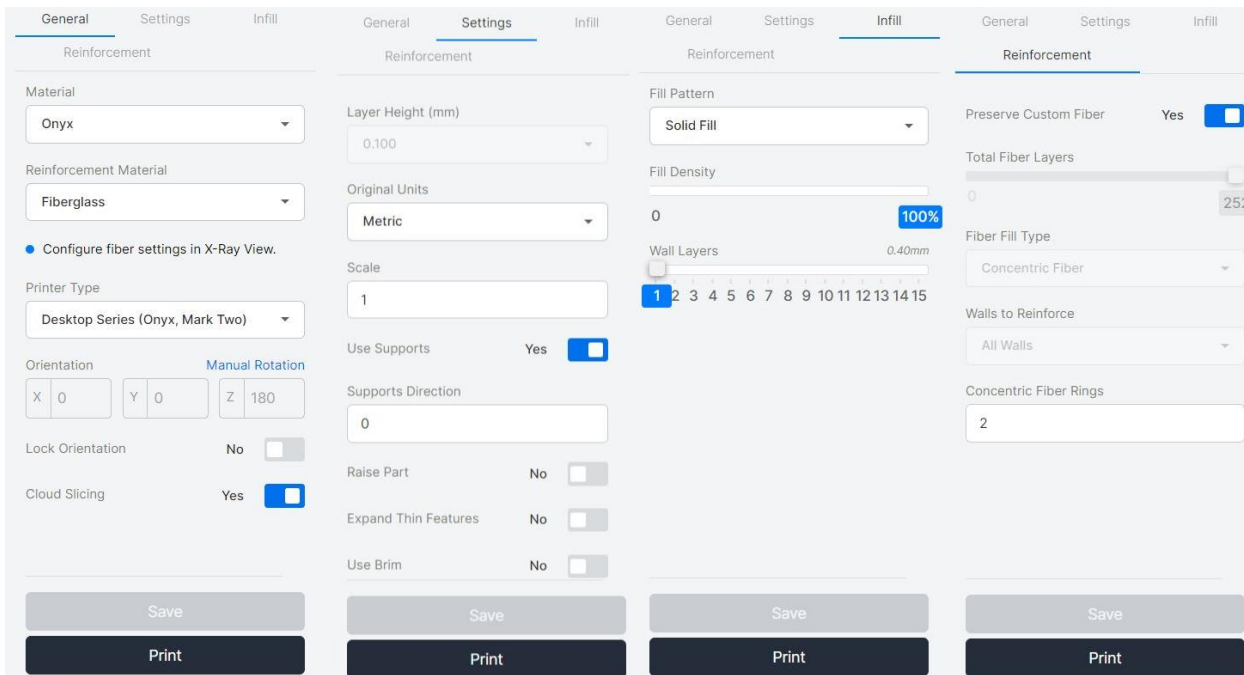


Figura 5.6 Configuración probetas Eiger

Antes de exportar el archivo para que la impresora lo lea, hay que hacer un cambio en el menú de *XRAY*. El primero de ellos es cambiar el *Start Rotation Percent* y fijarlo en uno de los extremos de la probeta, en cada probeta ese valor será distinto. En las Figuras 5.7 se puede ver la configuración de cada cara de la probeta en el menú de *XRAY*.

Add Fiber		Add Fiber		Add Fiber	
Contains 252 layers. 0.10 mm - 25.30 mm		Contains 252 layers. 0.10 mm - 25.30 mm		Contains 252 layers. 0.10 mm - 25.30 mm	
Fiber Pattern Type	Entire Group ▾	Fiber Pattern Type	Entire Group ▾	Fiber Pattern Type	Entire Group ▾
Fiber Fill Type	Concentric Fiber ▾	Fiber Fill Type	Concentric Fiber ▾	Fiber Fill Type	Isotropic Fiber ▾
Walls to Reinforce	Outer Shell Only ▾	Walls to Reinforce	All Walls ▾	Concentric Fiber ...	1
Concentric Fiber ...	2	Concentric Fiber ...	2	Start Rotation Pe...	52
Start Rotation Pe...	51	Start Rotation Pe...	52	Fiber Angles	0

Figura 5.7 Configuración *XRAY* de las probetas plana, estructurada cara A y cara B respectivamente

Tras haber cambiado esos parámetros, ya se puede exportar el archivo a un pen drive para poder introducirlo en la impresora.

## 5.3 Imperfecciones durante la impresión

### 5.3.1 Calibración

Durante la impresión de las primeras probetas no se observaron ningún tipo de imperfección, fue a partir de la cuarta probeta donde se empezaron a generar imperfecciones importantes en uno de sus extremos.

Tras leer con más detenimiento el manual de la impresora, nos dimos cuenta de que el problema venía de una mala calibración de la impresora, ya que, si el extrusor de fibra y el del material plástico no están a un nivel adecuado se empieza a formar un aglutinamiento de material plástico en uno de los extremos, el cual se va acumulando capa a capa generando así irregularidades como las que se pueden ver en las Figuras 5.8 y 5.9.

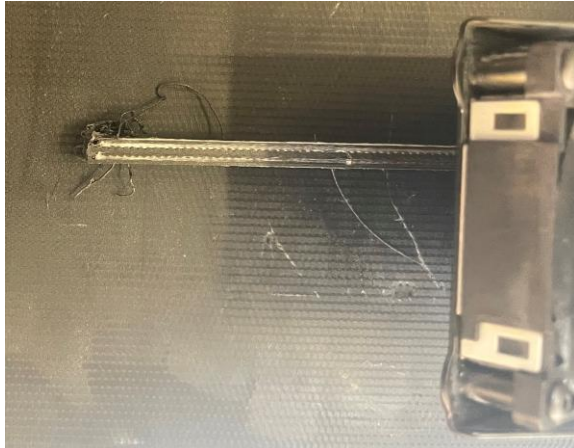


Figura 5.8 Imperfecciones generadas en el extremo izquierdo de una probeta plana



Figura 5.9 Imperfecciones generadas en la zona de solape de una probeta estructurada

Para poder calibrar la impresora hay que ir al menú de esta, y pulsar en la pestaña donde pone *Bed Level*. Posteriormente hay que darle a *Shim Bed Level*, a partir de este momento comenzará la calibración. En la Figura 5.10 se puede observar con más claridad el proceso que se acaba de explicar.

Primero, se calibra el extrusor de plástico el cual se irá posicionando en 3 puntos de la cama de la impresora. Cada vez que el extrusor se posicione hay que girar el tornillo que se encuentra justo debajo de la cama e ir probando mientras se desliza una lámina metálica entre el extrusor y la cama de la impresora. En el momento que la lámina pasa sin ofrecer demasiada resistencia se le da a la pantalla a *Next* de forma que el extrusor se coloca en la siguiente posición y se vuelve a repetir el proceso, hasta que se finaliza con la calibración del extrusor de material plástico.

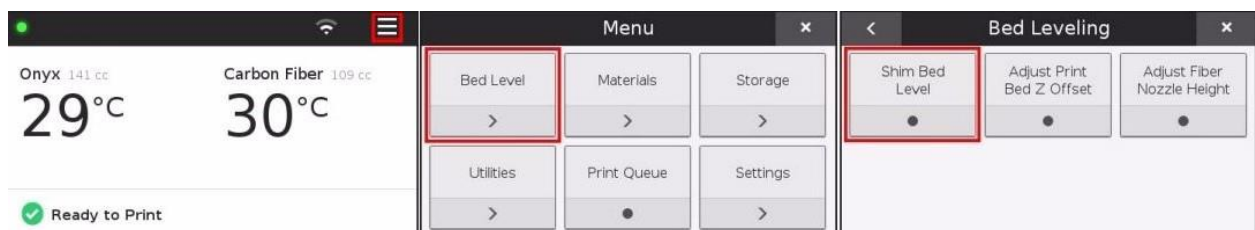


Figura 5.10 Proceso para comenzar la calibración de la impresora Mark Two

Para la calibración de la fibra de vidrio el extrusor solo se va a colocar en una posición específica. Mediante una llave Allen se gira un tornillo situado en la parte superior del mismo hasta que la lámina de metal pase entre la cama de impresión y el extrusor de fibra sin oponer mucha resistencia. Es importante tener en cuenta que la lámina metálica que hay que usar es diferente a la anterior ya que su espesor varía, para la calibración de la fibra la lámina tiene un espesor mayor que la de plástico. A continuación, en la Figura 5.11 se pueden ver las láminas metálicas usadas.



Figura 5.11 Láminas metálicas para la calibración de la impresora

Tras haber finalizado con la calibración dejaron de aparecer este tipo de imperfecciones. Aun así, por precaución es importante calibrar cada cierto tiempo. En este caso, se llevó a cabo esta calibración cada cuatro impresiones, de esta forma se evita que se pueda generar cualquier imprevisto y así poder dejar la máquina sin supervisión con mayor tranquilidad.

### 5.3.2 Impresión de la fibra continua de vidrio

Uno de los problemas que se presentaban a la hora de incluir el refuerzo con fibra de vidrio era que la impresora no pudiera rodear bien toda la superficie de la probeta estructurada, ya que la zona de solape está formada por unas dentaduras de pequeño tamaño que dificultan el paso del extrusor por ellas. Gracias al menú *XRAY* del programa de la impresora se pudo ir viendo el comportamiento de la fibra en cada capa, de esta forma se consiguió establecer unas dimensiones óptimas para que la fibra pudiese rodear bien toda la superficie de la probeta, además de conseguir que los espesores de la probeta se encontrasen dentro de los valores permitidos.

El único punto problemático donde la fibra no llega a rodear bien del todo la estructura es en el extremo final de la zona dentada tal y como se puede observar en la Figura 5.12.



Figura 5.12 Simulación 2D impresión de la fibra en una de las capas de la impresora obtenida en el menú *XRAY*

A pesar de que la fibra no redondea bien el diente en el extremo de la zona de solape, se considera un error despreciable ya que, en el resto de los dientes de la zona sí que se adhiere de forma correcta. En la Figura 5.13 se puede ver cómo queda la fibra adherida en la zona de solape y constatar que el error es mínimo.

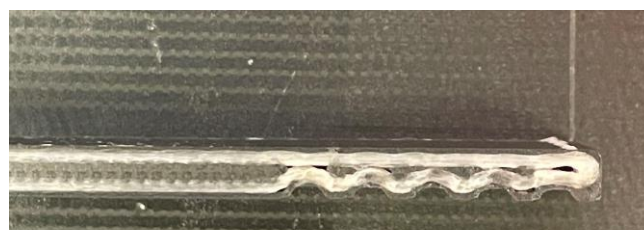


Figura 5.13 Impresión de la fibra en una de las capas de la probeta cara A

Tras haber finalizado con la impresión de una probeta es importante que se guarde en una campana como la de la Figura 5.14, ya que como se ha explicado en este documento el Onyx es un material hidrófilo y si se humedece demasiado sus propiedades mecánicas disminuyen.



Figura 5.14 Campana para proteger a las probetas de la humedad

En la Figura 5.15 se pueden observar las probetas ya finalizadas y listas para ser pegadas y poder realizar en el ensayo.



Figura 5.15 Imagen de todas las probetas planas y estructuradas para el ensayo de single-lap joint



## 6 ENSAYO Y RESULTADOS

**E**n este capítulo se comentará todo lo referente al ensayo, desde la preparación de las probetas hasta el objetivo del mismo, pasando por algunos aspectos a tener en cuenta a la hora de realizarlo. Por último, se comentarán los resultados obtenidos a través de este.

### 6.1 Maquinaria

El principal objetivo de este ensayo es obtener la curva fuerza-desplazamiento de cada probeta, y así de esta forma poder obtener la fuerza máxima de cada una de ellas. Para ello se usará la máquina INSTRON 4482, la cual se puede observar en la Figura 6.1. Esta máquina permite realizar diferentes tipos de pruebas estáticas: tracción, flexión o cortadura entre muchas otras.



Figura 6.1 Máquina de funcionamiento estático INSTRON 4482

La máquina funciona como un tornillo sin fin el cual es capaz de aplicar cargas de hasta 100 KN, en este caso con la célula de carga de 5 KN será suficiente. En función del ensayo que se vaya a realizar el utillaje de la máquina cambia, en este caso se usarán unas mordazas como las de la Figura 6.2. Dichas mordazas varían en función del espesor de la probeta que se va a colocar entre ellas, para estos ensayos se usarán aquellas que van de los 6 – 12 mm, ya que el espesor de la probeta más el taco es igual a 7,6 mm.



Figura 6.2 Mordazas para poder realizar el ensayo de fuerza

Además, se cuenta con un equipo de ordenadores para poder registrar los datos necesarios y de un medidor de temperatura para asegurar que el espacio donde se va a realizar el ensayo tenga las condiciones adecuadas.

## 6.2 Preparación de las probetas

Antes de comenzar con el ensayo hay que proceder con la unión del solape de las probetas a través de la zona de solape de éstas. Para ello, primero se lijará la zona con papel de lija de forma que haya cierta rugosidad antes de poner el adhesivo epoxi.

Una vez que todas las probetas han sido lijadas, se prepara el adhesivo. Para ello es necesario mezclar sus dos componentes, HexBond EA9394 STRUCTIL Part A con HexBond EA9394 STRUCTIL Part B, con una proporción 100-17 respectivamente. En la Figura 6.3 se pueden ver ambos componentes del adhesivo epoxi.



Figura 6.3 Parte A y B del material adhesivo que se va a usar

Antes de poner el material adhesivo en la zona de solape hay que limpiar bien con acetona la superficie, una vez que se han pegado ambas partes hay que cubrirlas con un film no adhesivo y fijar bien la zona con unas bridas ya que estas permiten que las uniones no se deslicen, tal y como se puede observar en la Figura 6.4. También podrían ponerse unos pesos encima de las uniones de forma que la presión aplicada fuese más uniforme a lo largo de toda la zona de solape, pero una de las partes deslizaba sobre la otra dificultando la unión de forma correcta.

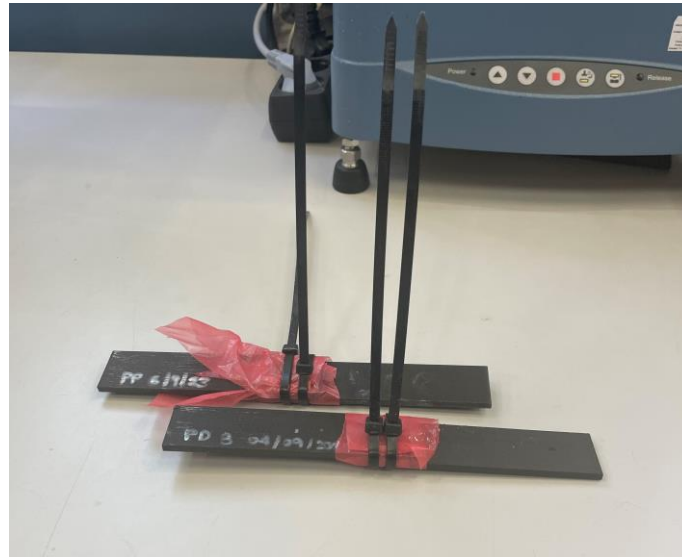


Figura 6.4 Probetas después de la unión del solape

Es importante que tras haber preparado bien las probetas, estas sean protegidas del sol y de la humedad, por ello se meten dentro de una bolsa de plástico cerrada herméticamente. Dentro de la bolsa también es preciso añadir algunas bolsitas que absorban humedad. En la Figura 6.5 se pueden ver todas las probetas protegidas y listas para comenzar el periodo de curado.



Figura 6.5 Probetas guardadas herméticamente durante el proceso de curado



### 6.3 Tacos de Onyx

Antes de comenzar a realizar el ensayo, es muy importante imprimir unos tacos rectangulares con dimensiones iguales al ancho de la probeta 25.4 mm, longitud de agarre 22.5 mm y espesor de la probeta 3.8 mm. Estos tacos se situarán en la zona de agarre tal y como se puede ver en la Figura 6.6. El uso de los tacos durante el ensayo es muy importante por el motivo comentado en el Capítulo 2.

Cuando la máquina esté traccionando la probeta por los extremos, como se observa en la Figura 6.6, la fuerza aplicada debe estar alineada con el plano horizontal de la zona de solape, de no ser así se generaría un momento en la pieza y por lo tanto una deformación no deseada. La incorporación de estos tacos asegura la alineación precisa de la fuerza aplicada, contribuyendo así a la integridad y la exactitud de los resultados del ensayo.

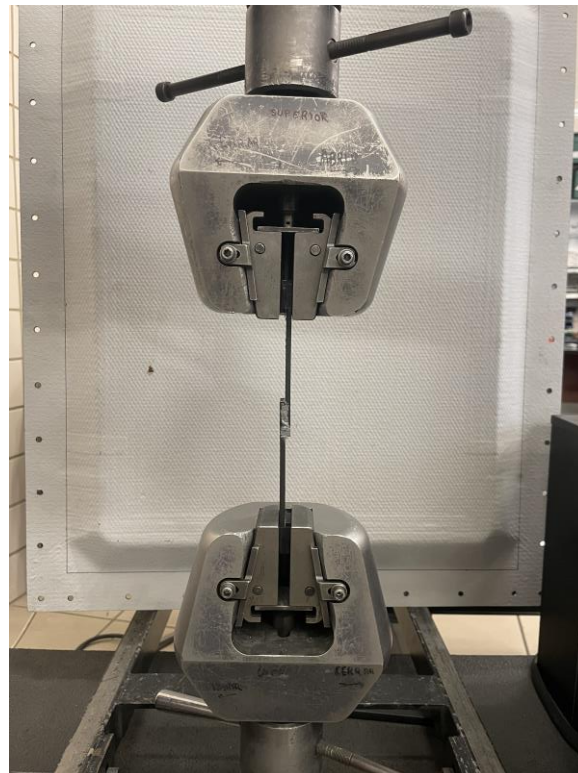


Figura 6.6 Probeta antes de comenzar con el ensayo Single-Lap Joint

Los tacos se han fabricado utilizando exclusivamente material Onyx, sin incluir refuerzo de fibra de vidrio. Dada la superficie poco rugosa de contacto entre el taco y la probeta, se ha implementado una solución adicional para garantizar un agarre seguro durante el ensayo. Con este propósito, se añade un pequeño trozo de papel de lija entre las superficies de contacto. Esta medida asegura que, durante el funcionamiento de la máquina, el papel de lija permanezca adherido a la superficie de agarre, proporcionando así una mayor fricción y estabilidad durante el proceso de tracción.

### 6.4 Resultados

Tras haber ensayado las cinco probetas planas y las cinco estructuradas con la célula de carga de 5 kN y una velocidad de 1,3 mm/min bajo control en desplazamientos, de acuerdo con la Norma [8], se han obtenido los siguientes resultados.

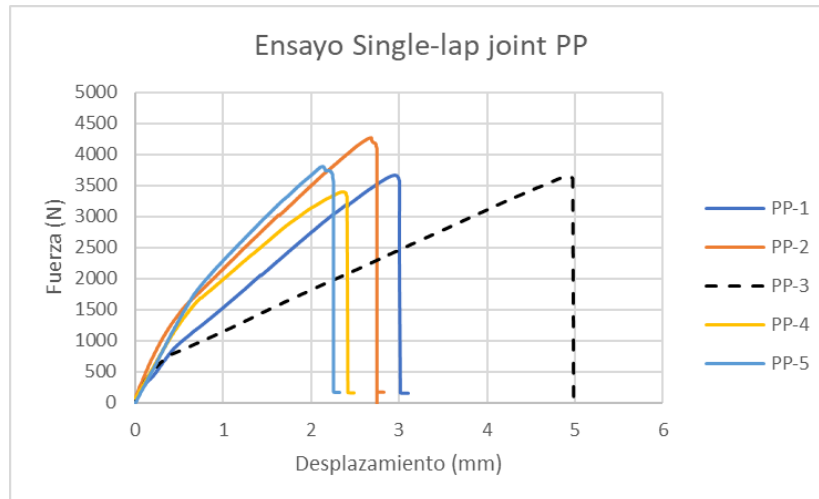


Figura 6.8 Resultados probetas planas (PP) ensayo Single-Lap

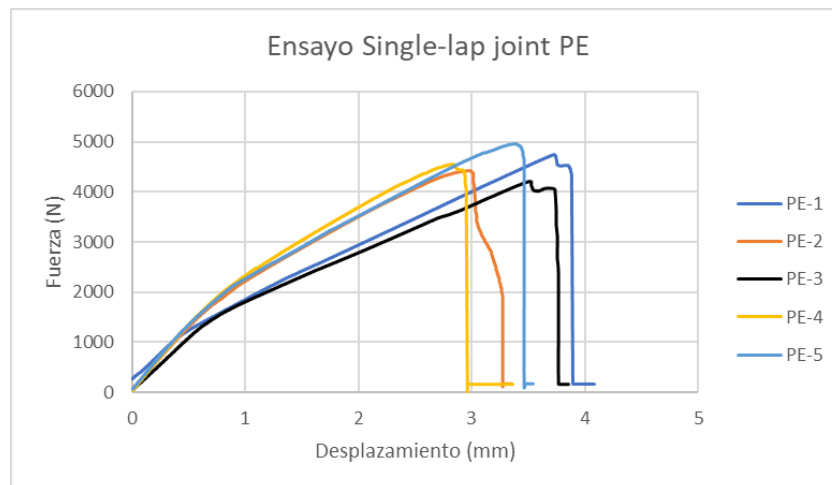


Figura 6.7 Resultados probetas estructuradas (PE) ensayo Single-Lap

Las Figuras 6.7 y 6.8 presentan las curvas fuerza-desplazamiento para las probetas con interfaz plana y estructurada, respectivamente que se analizaron para determinar la carga máxima por cada muestra. Se puede ver como las probetas estructuradas alcanzan la rotura entre los 4000 – 5000 N. Sin embargo, las probetas planas rompen entre los 3500 – 4200 N aproximadamente. Esa diferencia entre ambas tipologías era algo esperado antes de la realización del ensayo.

En la gráfica de las probetas planas una de las curvas aparece en discontinuo. Esto se debe a que durante el ensayo la tercera probeta plana se rompió por error y hubo que rehacerla, días más tarde se volvió a ensayar y como se puede observar el desplazamiento obtenido difiere bastante de los obtenidos en las otras probetas, por lo que no se ha tenido en cuenta a la hora de calcular la media, desviación típica y demás factores interesantes para la comparación de ambas tipologías.

Después de evaluar los gráficos de carga-desplazamiento, los valores individuales de carga registrados fueron divididos por el área de solape para calcular las resistencias aparentes al corte de las uniones. En las Tablas 6.1 y 6.2 se observan las cargas máximas de rotura de cada probeta y el desplazamiento asociado a ese momento, además de la tensión cortante máxima. Estos datos proporcionan una visión más precisa de las características de resistencia y comportamiento ante la carga de cada tipo de probeta, facilitando la comparación entre las dos tipologías.

Para poder obtener la tensión cortante de rotura se ha usado la siguiente fórmula:

Probetas	F (N)	Desp (mm)	$\tau$ (MPa)
PP-1	3670.221	2.960	5.723
PP-2	4265.544	2.680	6.614
PP-3	3655.206	4.930	5.784
PP-4	3395.850	2.360	5.483
PP-5	3812.014	2.140	5.886

Tabla 6.1 Fuerza, desplazamiento y tensión máxima de las probetas planas

Probetas	F (N)	Desp (mm)	$\tau$ (MPa)
PE-1	4751.836	3.730	7.430
PE-2	4422.181	2.980	7.017
PE-3	4215.891	3.510	6.553
PE-4	4550.153	2.820	7.128
PE-5	4963.757	3.380	7.776

Tabla 6.2 Fuerza, desplazamiento y tensión máxima de las probetas estructuradas

$$\tau = \frac{F}{L_{sol} * A_{sol}}$$

Donde:

1. F es la fuerza máxima de rotura de cada probeta
2. Lsol es la longitud de solape de cada probeta
3. Asol es la anchura de solape de cada probeta

En la Tabla 6.3 se encuentra una tabla con todas las medidas de las probetas planas y estructuradas, aunque las medidas más importantes son las que aparecen en las dos últimas columnas, las cuales nos permiten obtener el valor de tensión cortante.

Nº	PROBETA	L (mm)	Ancho (mm)	e (mm)	e solape (mm)	L solape (mm)
1	PE A	110.86	25.33	3.80	7.94	25.25
	PE B	110.72		3.78		
1	PP	110.80	25.31	3.80	7.80	25.34
	PP	110.92		3.84		
2	PE A	110.90	25.33	3.82	8.15	24.88
	PE B	110.71		3.82		
2	PP	110.72	25.29	3.86	7.77	25.50
	PP	110.98		3.77		
3	PE A	110.80	25.34	3.81	8.14	25.39
	PE B	110.87		3.82		
3	PP	110.82	25.36	3.79	7.85	24.92
	PP	110.83		3.78		
4	PE A	110.79	25.36	3.81	7.98	25.17
	PE B	110.82		3.79		
4	PP	110.91	25.31	3.78	7.73	25.17
	PP	110.94		3.81		
5	PE A	110.85	25.33	3.83	7.99	25.20
	PE B	110.78		3.81		
5	PP	110.85	25.30	3.78	7.86	25.60
	PP	110.88		3.83		

Tabla 6.3 Medidas de las probetas planas y estructuradas

Para finalizar con la comparación de ambas tipologías de probetas se han obtenido la media desviación e intervalo de confianza. En el caso de las probetas planas tal y como se ha comentado antes, la tercera no se ha incluido en estos cálculos ya que sus desplazamientos difieren bastante de los demás. Por último, se ha procedido al cálculo del error relativo a partir de la media obtenida de las probetas con interfase plana y las estructuradas. En la Tabla 6.4 se pueden observar los resultados obtenidos.

Probetas estructuradas		Probetas planas	
Media	4580.76	Media	3785.91
Desviación	289.47	Desviación	363.44
Int. Confianza	253.73	Int. Confianza	318.56

Diferencia PE y PP	
Error relativo (%)	17.35

Tabla 6.4 Media, desviación y error relativo de PE y PP

Como se puede ver la mejora al añadir interfases estructuradas es en torno al 20% respecto a las interfases planas. Por tanto, se evidencia una mejora considerable en el rendimiento de la resistencia a cortante al comparar la tensión crítica cortante para la nueva geometría de interfaz estructurada propuesta con respecto a la probeta de unión simple con interfaz plana. Los resultados indican que la introducción de la interfaz estructurada ha generado una mejora considerable en la capacidad resistente a cortante de la unión con esta nueva configuración. No obstante, cabe destacar que la configuración del diente tiene una amplitud de solo 1 mm, que podría afectar a la fricción y a la capacidad de la grieta para recorrer todos los dientes.

Además de la mejora cuantitativa observada, durante el ensayo se notó que la rotura de la probeta estructurada no seguía adecuadamente los dientes, es decir, la grieta se propagaba inicialmente en los dos primeros dientes y luego rompía completamente. Este resultado no concuerda con el efecto esperado. La razón de este comportamiento radica en que la zona de unión de ambas partes de la probeta no es simétrica. Esto provoca que una de las partes tenga una mayor sección resistente que la otra, resultando en que la grieta siempre comience en la sección con menor resistencia, generando un patrón de rotura distinto al deseado.

En la gráfica de fuerza-desplazamiento, este fenómeno se reflejaría como picos notables cuando se alcanza el punto máximo de fuerza. Como se puede apreciar en la Figura 6.8, estos picos no se generan de forma muy notable.

Durante el ensayo se realizaron algunos videos, para poder observar cómo rompían las probetas estructuradas. De dichos videos se han realizados algunas capturas para así poder realizar algunos comentarios interesantes. En la Figura 6.9 se puede observar el inicio de la rotura de las probetas estructuradas 3, 4 y 5.

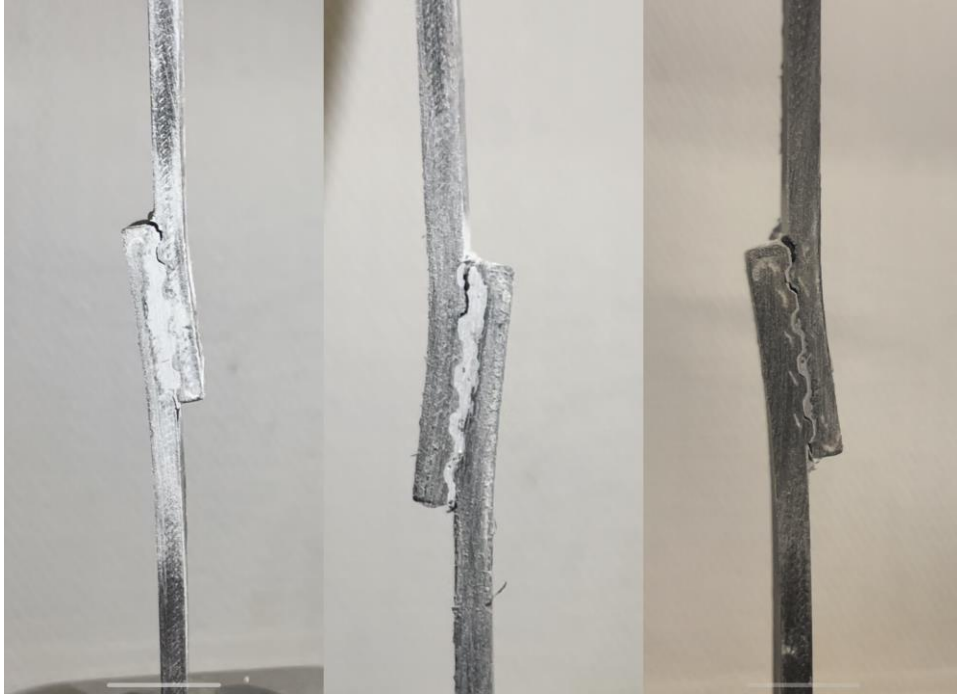


Figura 6.9 Rotura de algunas probetas estructuradas durante el ensayo

Como se puede apreciar en la imagen superior, dicha rotura se produce por la parte de arriba de la probeta y siempre respecto a la misma zona, debido a la configuración de la probeta hay una cara que tiene menor sección resistente ya que la zona de solape no es simétrica.

Es por ello que como posible mejora se ha procedido a la fabricación de 3 probetas con interfase estructurada simétrica de dientes de 1 mm de amplitud y otras 3 probetas con 2 mm de amplitud de diente.

## 6.5 Posibles mejoras

Tal y como se ha indicado anteriormente se van a ensayar otras probetas con una configuración algo distinta. Esta vez lo que se va a hacer es diseñar la zona de solape de forma que ambas partes de la probeta sean simétricas, de esta forma no habrá una zona con menos sección resistente que otra y así quizás haya alguna mejora en el comportamiento de estas durante el ensayo.

En la figura 6.10 se pueden ver el diseño de las dos nuevas tipologías de probeta que se van a imprimir. Ambas serán fabricadas con los mismos materiales y con la misma configuración explicada en este documento.



Figura 6.10 Probetas con interfase estructurada simétrica de 1 mm y 2 mm de amplitud respectivamente



Antes de realizar el ensayo con estas nuevas probetas, se ha procedido a observar alguna de ellas con el microscopio y de esta forma tener una idea de cuánto es el espesor de epoxi que queda en la zona de solape tras el curado.

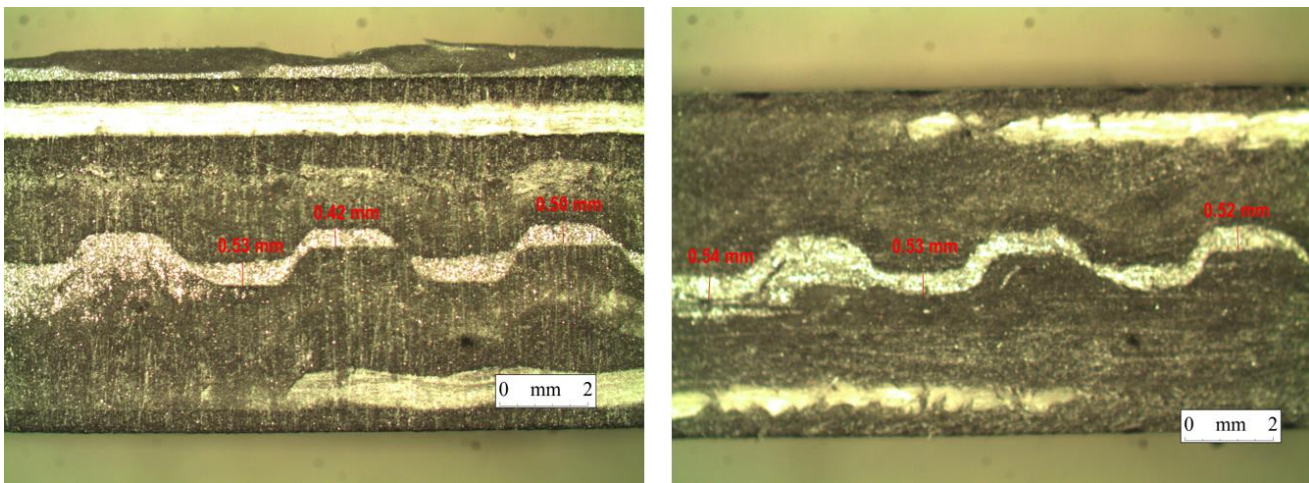


Figura 6.11 Espesor del adhesivo epoxi de las probetas estructuradas simétricas de 1 mm de amplitud

En el caso de las probetas de 1 mm de amplitud el espesor del adhesivo está entorno a los 0,50 mm. Como se puede apreciar en la imagen izquierda de la Figura 6.11 la zona de solape de ambas partes de la probeta no coincide perfectamente, esto puede deberse a un error de impresión.

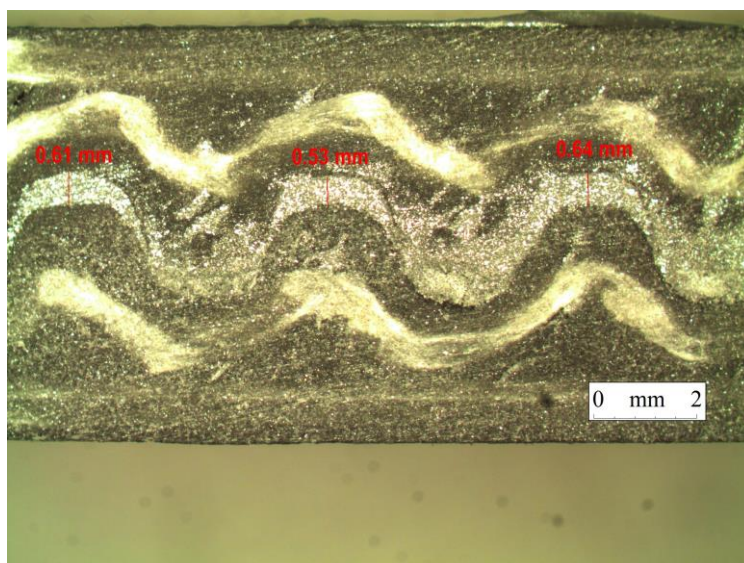


Figura 6.12 Espesor del adhesivo epoxi de la probeta simétrica de 2 mm de amplitud

En la probeta de 2 mm de amplitud observada bajo el microscopio el espesor del adhesivo oscila entorno a los 0,60 mm tal y como se puede ver en la Figura 6.12.

Tras realizar los ensayos se han obtenido los siguientes resultados de fuerza máxima, desplazamiento y tensión cortante, además de las gráficas fuerza-desplazamiento de ambas probetas.

Probetas	F (N)	Desp (mm)	$\tau$ (MPa)
PS1-1	3984.822	2.8	6.157
PS1-2	2809.584	2.15	4.431
PS1-3	4044.663	3.12	6.344

Tabla 6.5 Fuerza, desplazamiento y tensión cortante máxima de PS1

Probetas	F (N)	Desp (mm)	$\tau$ (MPa)
PS2-1	3071.561	2.828	4.802
PS2-2	3158.82	2.99	4.956
PS2-3	2365.191	2.46	3.701

Tabla 6.6 Fuerza, desplazamiento y tensión cortante máxima de PS2

Como ya se hizo con las probetas planas y estructuradas iniciales, los valores de tensión se han obtenido con la fórmula que se comentó en el apartado anterior y con los datos de longitud y espesor de solape obtenidos de la medición de estas. En la Tabla 6.7 se pueden ver las diferentes medidas obtenidas con escalímetro de las PS1 y PS2.

Nº	PROBETA	L (mm)	Ancho (mm)	e (mm)	e solape (mm)	L solape (mm)
1	PS1-A	110.74	25.36	3.76	8.18	25.52
	PS1-B	110.73		3.87		
2	PS1-A	110.73	25.34	3.74	8.30	25.02
	PS1-B	110.76		3.75		
3	PS1-A	110.73	25.28	3.83	8.33	25.22
	PS1-B	110.71		3.77		
1	PS2-A	110.88	25.24	3.68	8.35	25.34
	PS2-B	110.89		3.74		
2	PS2-A	110.83	25.25	3.68	8.34	25.24
	PS2-B	110.94		3.78		
3	PS2-A	110.97	25.26	3.81	8.37	25.30
	PS2-B	110.86		3.71		

Tabla 6.7 Medidas de las probetas estructuradas simétricas

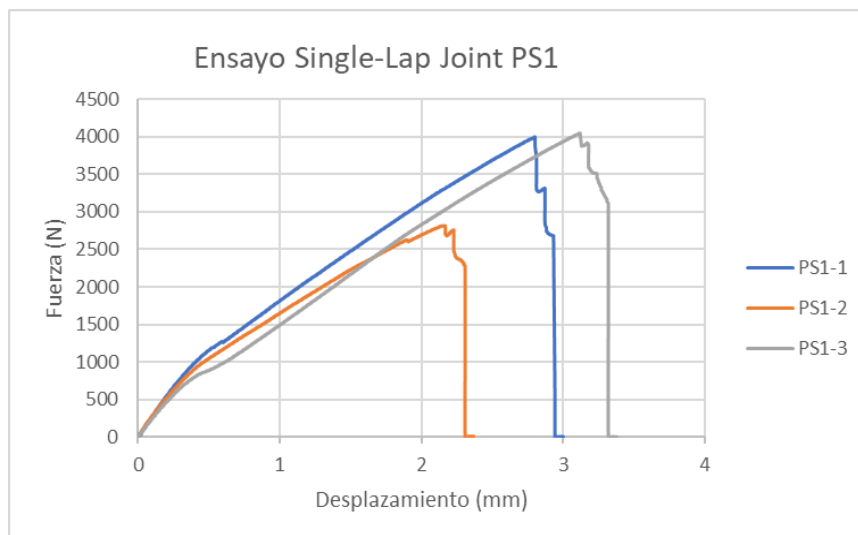


Figura 6.13 Resultados fuerza-desplazamiento PS1

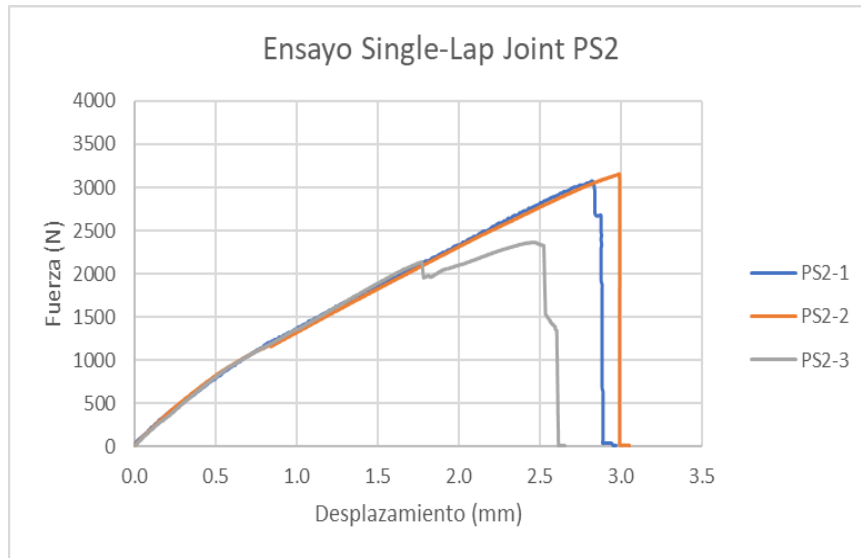


Figura 6.14 Resultados fuerza-desplazamiento PS2

Tal y como se puede observar en las Figuras 6.13 y 6.14 los valores de fuerza de rotura no han mejorado los de la probeta estructurada inicial.

En el caso de las probetas con amplitud de 1 mm su comportamiento es mejor que las de 2 mm, esto puede deberse a que los dientes de estas últimas están prácticamente horizontales impidiendo que la grieta puede abrirse paso entre ellos y provocando que tenga un comportamiento más bien plano.

En el caso de las probetas simétricas de 1 mm de amplitud, se observó una mejora significativa en el comportamiento de la rotura. En este caso, la grieta logró pasar por todos los dientes hasta que finalmente se produjo la rotura, como se evidencia claramente en la Figura 6.13, donde en la gráfica fuerza-desplazamiento se aprecian los picos mencionados anteriormente, reflejando un comportamiento estable-inestable. Sin embargo, se observa que la segunda probeta ensayada rompe mucho antes que las otras dos. Este comportamiento podría atribuirse a la posibilidad de que la zona de solape no estuviera perfectamente alineada durante el proceso de pegado. Como se ilustra en la Figura 6.10, en la imagen izquierda, los dientes están desplazados entre sí, sin llegar a encajar completamente debido a un error de impresión.

Aunque estas probetas simétricas no hayan mostrado una mejora cuantitativa con respecto a las estructuradas iniciales, son las que más se acercaron en términos de fuerza a la que se produjo la rotura.

Para poder entender un poco mejor la diferencia que supone el comportamiento de las probetas estructuradas simétricas con respecto a las estructuradas iniciales, se ha obtenido el error relativo.

Como se puede ver en la Tabla 6.8, la probeta estructurada inicial mejora en más de un 20% el comportamiento de la probeta estructurada simétrica de 1 mm de amplitud y en casi un 40 % a la de 2 mm de amplitud.

PS1		PS2	
Media	3613.02	Media	2865.19
Desviación	696.44	Desviación	435.20
Int. Confianza	788.08	Int. Confianza	492.47

Error relativo (%)	
PS1-PE	21.13
PS2-PE	37.45

Tabla 6.8 Media, desviación y errores relativos de PS1 y PS2



Por último, tras obtener los valores de la Tabla 6.8 se ha podido realizar una tabla para la representación gráfica de los intervalos de confianza, los cuales se ven reflejados numéricamente en la Tabla 6.9 y gráficamente en la Figura 6.15.

	PE	PP	PS1	PS2
Media	4580.76	3785.91	3613.02	2865.19
Inter sup	4834.49	4104.47	4401.11	3357.66
Inter inf	4327.04	3467.35	2824.94	2372.72

Tabla 6.9 Intervalos de confianza de las cuatro tipologías de probetas

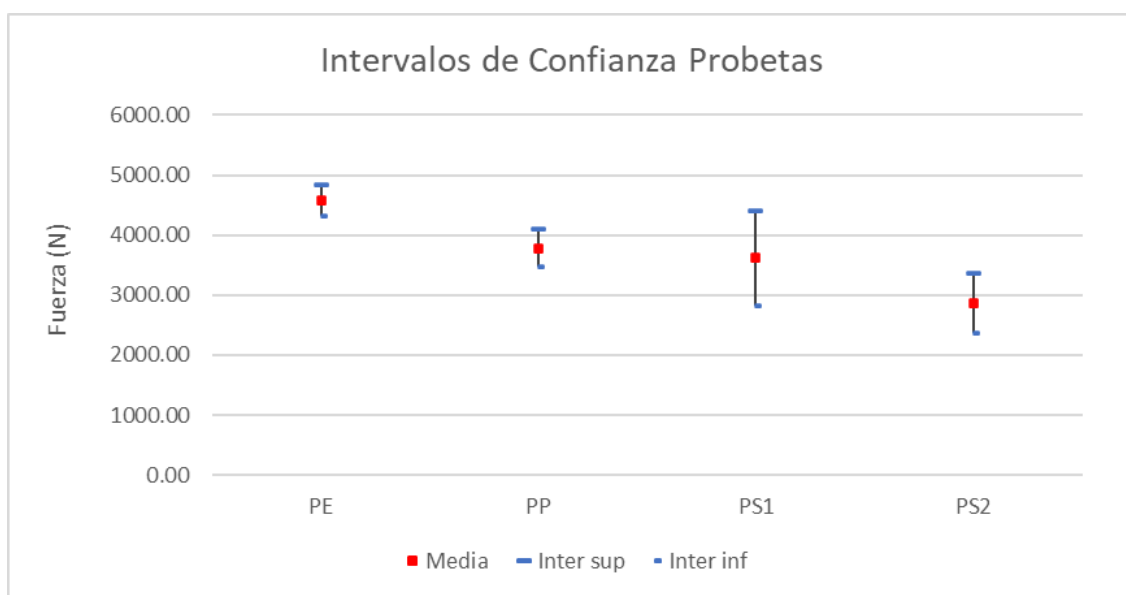


Figura 6.15 Intervalos de confianza de las cuatro tipologías de probetas

## 6.6 Tipos de Rotura

Tal y como se comentó en el capítulo 2 en el apartado del ensayo single-lap, las probetas cuando se someten a un ensayo de cortadura presentan distintos tipos de rotura, las cuales ya han sido definidas.

Cabe destacar que de las tres formas distintas en las que pueden romper hay una que no se ha dado bajo ningún concepto que es el fallo de sustrato, la cual es un indicador de error por sobredimensionamiento.

Si se analizan las zonas de solape de todas las probetas una vez realizado los ensayos, se podría decir que el tipo de fallo que más se repite es un término medio entre el fallo adhesivo y cohesivo en la Figura 6.16 se puede apreciar mejor este fallo intermedio del que se habla.

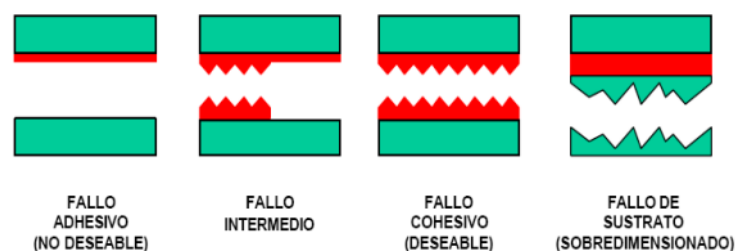


Figura 6.16 Diferentes tipologías de fallos adhesivos [26]

En las Figuras 6.17 y 6.18 se pueden observar algunas de las probetas después de haber sido ensayadas, de esta forma se puede observar con más claridad los dos principales fallos que se han producido.

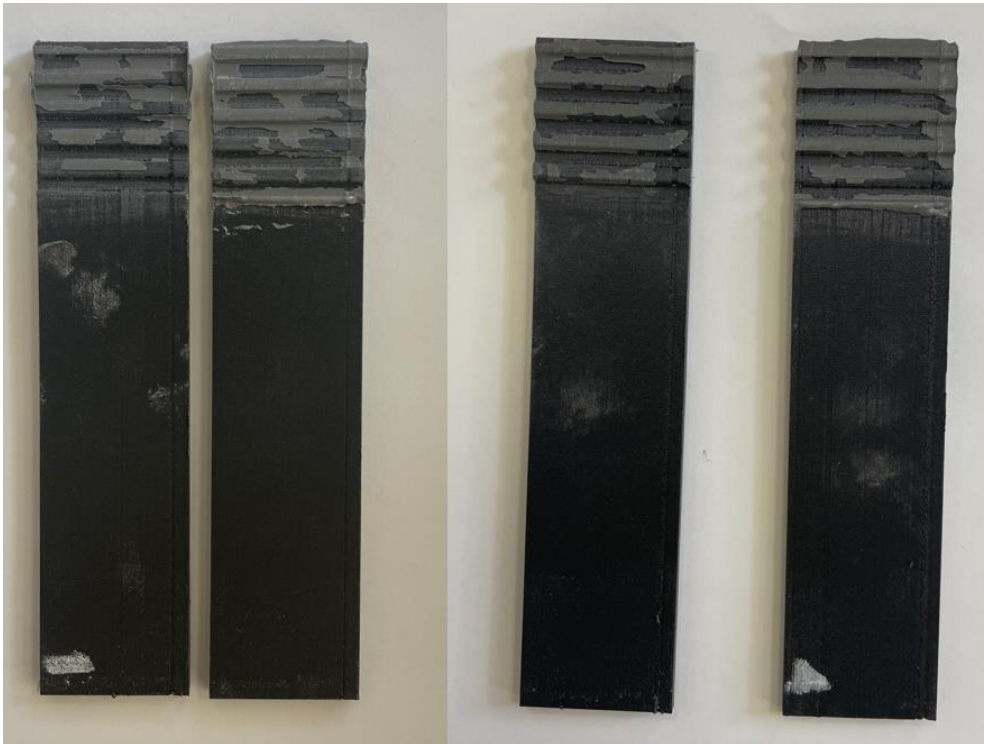


Figura 6.17 Solape de probetas estructuradas después de someterlas al ensayo de cortadura



Figura 6.18 Solape de probetas planas después de someterlas al ensayo de cortadura

En las probetas planas se puede ver como claramente el tipo de fallo que se produce es intermedio ya que el adhesivo no ha quedado adherido completamente en ambas partes de las probetas, se aprecian zonas donde no hay adhesivo.

En el caso de las probetas estructuradas se puede ver que el fallo que se produce es más parecido a un fallo cohesivo ya que en ambas caras de la probeta hay adhesivo casi por completo, aunque es cierto que hay algunas zonas donde no se aprecia presencia del adhesivo epoxi.

## 7 CONCLUSIONES

**E**n este último capítulo se realizarán algunos comentarios tras haber obtenidos los resultados tanto de las probetas iniciales como las que se realizaron como posible mejora, para así poder llegar a una conclusión final al respecto

En este trabajo se han comparado dos tipologías de probetas impresas en 3D al ensayo de cortadura simple. Para la impresión de las probetas se ha usado la Impresora 3D Mark Two. Durante el proceso de impresión se ha usado el material Onyx con un refuerzo de fibra de vidrio. Ambas configuraciones han tenido la misma geometría rectangular, con la salvedad que unas han presentado una zona de solape con interfase plana y otras con interfase estructurada. Con este ensayo hemos obtenido las curvas fuerza-desplazamiento para determinar la carga máxima de cada muestra. A partir de esta carga máxima, se ha calculado y analizado la tensión crítica cortante para ambas configuraciones y comparar así cuál presenta un mejor comportamiento. Además, y con el objetivo de analizar posibles mejoras, se han fabricado otras dos configuraciones estructuradas cambiando los parámetros de la interfaz estructurada. En total, se ha comparado las probetas que presentan una interfaz plana con tres configuraciones de interfaz estructurada modificando la amplitud del diente. A continuación, se presentan las conclusiones más relevantes para cada configuración estructurada respecto a la plana.

### 7.1 Probetas iniciales

En cuanto a las probetas estructuradas fabricadas inicialmente (PE), tal y como se ha podido observar en los resultados del capítulo anterior, hay una mejora de casi un 20% frente a las probetas planas (PP). Esto evidencia una mejora considerable en el rendimiento de la resistencia a cortante al comparar la tensión crítica cortante para la nueva geometría de interfaz estructurada propuesta con respecto a la probeta de unión simple con interfaz plana. Los resultados indican que la introducción de la interfaz estructurada ha generado una mejora considerable en la capacidad resistente a cortante de la unión con esta nueva configuración.

Aparte de la mejora a nivel cuantitativo, durante el ensayo se observó que la rotura de la probeta estructurada no seguía bien los dientes de ésta, es decir la grieta se propagaba en los dos primeros dientes y ya luego rompía por completo, lo cual no es el efecto que se esperaba. Esto se debe a que la zona de unión de ambas partes de la probeta no es simétrica, provocando que una de las partes tenga mayor sección resistente que la otra y, por lo tanto, la grieta comienza siempre por esta última. Esto que se ha comentado se puede ver en la Figura 7.1



Figura 7.1 Cara B (arriba) y Cara A (abajo) de las probetas estructuradas

En la gráfica fuerza-desplazamiento esto se vería reflejado como unos picos cuando se llega al máximo y tal como se puede observar en la Figura 6.6 del capítulo anterior dichos picos apenas se generan, solo en algunas ocasiones.

Es por ello por lo que se decidió efectuar unas mejoras como las explicadas en el apartado anterior, donde la zona de solape de ambas probetas fuese completamente simétrica, consiguiendo así un crecimiento más estable de la grieta.

## 7.2 Probetas con mejoras

Tras ensayar las probetas estructuradas simétricas, PS1 y PS2, se vio que realmente no se producía ninguna mejora a nivel cuantitativo. En el caso de las probetas de 2 mm de amplitud (PS2) la rotura era prácticamente plana, es decir, la grieta no era capaz de pasar por los dientes, esto se puede deber al hecho que los dientes tenían muy poca inclinación ya que la amplitud se aumentó a 2 mm, pero la longitud de onda se mantuvo igual.

En el caso de las probetas simétricas de 1 mm de amplitud (PS1) sí que hubo una mejora en cuanto a la rotura, ya que esta vez la grieta sí llegó a pasar por todos los dientes hasta que al final rompe. Esto se ve muy bien reflejado en la Figura 6.12 donde en la gráfica fuerza-desplazamiento aparecen esos picos que se comentaban en el apartado anterior.

De esa misma Figura se puede ver como la segunda probeta ensayada rompe mucho antes que las otras dos, esto puede deberse a que la zona de solape no estuviese perfectamente alineada en el pegado, ya que como se puede observar en la Figura 6.10 en la imagen izquierda los dientes están desplazados entres sí, sin llegar a encajar por completo, esto es debido a un error de impresión.

Aunque estas probetas tampoco supusiesen una mejora a nivel cuantitativo con respecto a la estructurada inicial, sí que es la que más ha llegado a acercarse en la fuerza a la que rompe, con la salvedad de la segunda probeta.

## 7.3 Fabricación aditiva

A pesar de que la fabricación aditiva está suponiendo un avance en la industria, hoy en día considero que la impresión 3D no puede ser el único proceso para la fabricación de piezas a nivel industrial. Si es cierto que supone un buen complemento a los procesos de fabricación sustractiva que han sido usados desde hace años.

Por ejemplo, el uso de la fabricación aditiva está justificado cuando se quiera fabricar algún prototipo de una pieza, ya que permite una mayor libertad en el diseño y rapidez. Además, en el proceso de creación de la pieza lo que se busca es perfeccionarla, mejorar los detalles y, por lo tanto, el volumen de fabricación no es muy alto [27].

Cuando se requiere de un gran volumen de fabricación, sobre todo en piezas de gran tamaño y menor complejidad, los procesos de fabricación sustractiva empiezan a ganar importancia. Además, de poder obtener unos mejores acabados finales [27].

Otro ejemplo donde los procesos mecanizados se hacen importantes es cuando se quieren fabricar piezas en metal, ya que a pesar de poder usar este tipo de material en la impresión 3D, es más costoso [27].

Además, de la fabricación de prototipos, los fabricantes usan la impresión 3D, cuando necesitan piezas personalizadas con muchos detalles o formas complejas o elementos de utillaje que luego serán usados en la producción de la fábrica.

En definitiva, hoy en día se usan procesos de fabricación híbridos que permiten combinar la versatilidad y rapidez de los procesos aditivos con la resistencia y propiedades mecánicas de la fabricación sustractiva. Opino que a día de hoy es la mejor opción, quizás con el avance de las tecnologías se consigan fabricar grandes volúmenes de piezas de gran tamaño con impresora 3D a costes reducidos, pero en la actualidad eso no es posible, por lo tanto, lo mejor es que ambos procesos se sigan complementando.

# REFERENCIAS

- [1] Kamen Tushtev, Michael Murck, Georg Grathwohl, "On the nature of the stiffness of nacre," *Materials Science and Engineering: C*, Volume 28, Issue 7, 2008
- [2] M.T. Aranda, J. Reinoso, I.G. García, "On different 3D printing methods and fracture performance in DCB composite specimens including structured interfaces," *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, Volume 122, 2022.
- [3] I.A. Malik, M. Mirkhalaf, F. Barthelat, "Bio-inspired "jigsaw"-like interlocking sutures: Modeling, optimization, 3D printing and testing," *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Volume 102, 2017.
- [4] Lucas. F.M. da Silva, R.J.C. Carbas, G.W. Critchlow, M.A.V. Figueiredo, K. Brown, "Effect of material, geometry, surface treatment and environment on the shear strength of single lap joints," *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Volume 29, Issue 6, 2009.
- [5] S H Chung, B C Park, H J Chun, J C Park, "Experimental Study on Failure Mechanism of Single Lapshear Bond Joint with Dissimilar Materials," S H Chung et al 2017 *J. Phys.: Conf. Ser.* 843 012020.
- [6] Aditya V. Natu, Ankit R. Sharma, Nitinkumar R. Anekar, "Variation of Adhesive Strength in Single Lap Joint (SLJ) with Surface Irregularities," *Science and Education Publishing*, Vol. 7, No. 2, 61-67, 2019.
- [7] F Kadioglu, E Avil, M E Ercan, T Aydogan, "Effects of different overlap lengths and composite adherend thicknesses on the performance of adhesively-bonded joints under tensile and bending loadings," F Kadioglu et al 2018 *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 369 012034.
- [8] ASTM D 1002-10, Standard Test Method for Apparent Shear Strength of Single-Lap-Joint Adhesively Bonded Metal Specimens by Tension Loading (Metal-to-Metal).
- [9] Markforged, "<https://markforged.com/es/resources/blog/additive-manufacturing-101-guide-the-basics>".
- [10] Fabricación aditiva, "<http://www.fabricacionaditiva.online/4.htm>"
- [11] Esquema máquina FDM, Laboratory of information Processing Science, Universidad de Helsinki [Imagen], "<http://www.cs.hut.fi>".
- [12] Semantic scholar [Imagen], "<https://xometry.eu/es/impresion-3d-por-estereolitografia-sla/>".
- [13] Innovación y tecnología [Imagen], "<https://innovacion-tecnologia.com/fabricacion-aditiva/sinterizado-selectivo-por-laser/>".
- [14] Innovación y tecnología [Imagen], "<https://innovacion-tecnologia.com/fabricacion-aditiva/impresoras-3d-tecnologia-dlp/>"
- [15] Dassault Systemes [Imagen], "<https://www.3dnatives.com/es/guia-deposicion-de-energia-directa-100920192/>".
- [16] Gutiérrez-Rodríguez, L & Jiménez-Espinosa, F & Pertuz, Alberto & González Estrada, Octavio & Guillermo, Jorge, "Ti6-Al4-V alloy low cycle fatigue study printed by electron beam melting and its extension to high cycles", *Scientia et Technica*, 2021, 26. 290. 10.22517/23447214.24537.
- [17] Researchgate [Imagen] , "<https://xometry.eu/es/impresion-3d-multi-jet-fusion-mjf-vision-general-de-la-tecnologia/>".
- [18] Tipos de rotura adhesiva [Imagen], <https://www.biolinscientific.com/blog/cohesive-vs.-adhesive-failure-in-adhesive-bonding>

- [19] Fernando A. Cordisco, Pablo D. Zavattieri, Louis G. Hector, Blair E. Carlson, "Mode I fracture along adhesively bonded sinusoidal interfaces," *International Journal of Solids and Structures*, Volume 83, 2016
- [20] Erica Lin, Yaning Li, Christine Ortiz, Mary C. Boyce, "3D printed, bio-inspired prototypes and analytical models for structured suture interfaces with geometrically-tuned deformation and failure behavior," *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Volume 73, 2014.
- [21] K. Bertoldi, D. Bigoni, W.J. Drugan, "Structural interfaces in linear elasticity. Part I: Nonlocality and gradient approximations," *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Volume 55, Issue 1, 2007.
- [22] F.A.M. Pereira, M.F.S.F. de Moura, N. Dourado, J.J.L. Morais, J. Xavier, M.I.R. Dias, "Direct and inverse methods applied to the determination of mode I cohesive law of bovine cortical bone using the DCB test," *International Journal of Solids and Structures*, Volume 128, 2017.
- [23] Nayeon Lee, M. F. Horstemeyer, Hongjoo Rhee, Ben Nabors, Jun Liao, Lakiesha N. Williams, "Hierarchical multiscale structure-property relationships of red-bellied woodpecker (*Melanerpes carolinus*) beak," *The Royal Society*, 2014.
- [24] Irene H. Chen, Wen Yang, Marc A. Meyers, "Leatherback sea turtle shell: A tough and flexible biological design," *Acta Biomaterialia*, Volume 28, 2015.
- [25] L. García-Guzmán, L. Távara, J. Reinoso, J. Justo, F. París, "Fracture resistance of 3D printed adhesively bonded DCB composite specimens using structured interfaces: Experimental and theoretical study," *Composite Structures*, Volume 188, 2018.
- [26] Realización de ensayos de cortadura, Universidad de Sevilla, (s.f.) [Realización+de+ensayos+de+costadura.pdf, https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abeproy/4707/fichero/4.](https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abeproy/4707/fichero/4)
- [27] Fabricación aditiva vs fabricación sustractiva, Formlabs, (s.f.), [https://formlabs.com/es/blog/fabricacion-aditiva-vs-fabricacion-sustractiva/.](https://formlabs.com/es/blog/fabricacion-aditiva-vs-fabricacion-sustractiva/)
- [28] Vicente Capote Luna, (noviembre 2009) *Tipos de Uniones.pdf*, [https://www.feandalucia.ccoo.es/docu/p5sd6113.pdf.](https://www.feandalucia.ccoo.es/docu/p5sd6113.pdf)
- [29] (enero 2010), *Tipos de Uniones Soldadas.pdf*, [https://www.feandalucia.ccoo.es/docu/p5sd6731.pdf.](https://www.feandalucia.ccoo.es/docu/p5sd6731.pdf)

