



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

Optimización de material empleado en la fabricación aditiva de resina fotocurable mediante variación de parámetros de impresión.

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Víctor Pelayo Rama Núñez de Prado

DIRECTORES: Andrés Suárez García

CURSO ACADÉMICO: 2020-2021

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Optimización del material empleado en la fabricación aditiva
mediante variación de parámetros de impresión.*

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Cuerpo General

UniversidadeVigo

RESUMEN

Durante los últimos años las diferentes tecnologías de impresión en tres dimensiones han ido evolucionando hasta la situación actual. Hoy en día se pueden fabricar elementos de prácticamente cualquier tipo de material. En el ámbito de Defensa no va a ser distinto, las amplias capacidades que este tipo de tecnologías permite implican que su desarrollo sea de especial relevancia. Siendo más concretos, en la Armada supondría un importante factor de ahorro, tanto de materiales, como de almacenaje, de tiempo y sobre todo económico.

En el presente TFG se estudiará una de estas tecnologías, la estereolitografía. Su desarrollo comprende una fase de diseño de probetas, siguiendo la normativa pertinente, una fase de estudio del software de impresión 3D, en la que se alterarán parámetros para analizar su comportamiento a los distintos ensayos de tracción, pandeo y dureza a los que serán sometidos los distintos modelos. Para ello se ha utilizado la impresora 3D de resina fotocurable que ha adquirido el CUD y los aparatos necesarios para la realización de los diferentes ensayos. De esta manera se realizará un análisis de los resultados obtenidos con el fin de hallar una optimización de esta tecnología.

PALABRAS CLAVE

Resina, impresión 3D, fabricación aditiva, ensayos mecánicos.

AGRADECIMIENTOS

Agradecer especialmente a mi madre que siempre me ha apoyado con alegría e ilusión. A mi padre y a mi abuelo que les hubiera gustado poder disfrutar de estos últimos momentos de mi formación en la Escuela Naval. A toda mi familia, abuela, tíos y primos. A todos mis compañeros de las promociones 421-151 que durante estos cinco años han sido como una familia. A mis amigos de toda vida que me han ayudado a desconectar cuando lo he necesitado. Al profesor Andrés Suárez García, que durante estos meses se ha volcado y me ha ayudado en todo momento. Finalmente, a todos aquellos que me han ayudado en el desarrollo de este trabajo.

CONTENIDO

Contenido	1
Índice de Figuras	4
Índice de Tablas.....	6
1 Introducción y objetivos	8
1.1 Introducción	8
1.2 Objetivos	8
1.3 Estructura	9
2 Estado del arte	10
2.1 Fabricación aditiva	10
2.2 Tecnologías de fabricación aditiva	10
2.2.1 Fotopolimerización	11
2.2.2 Extrusión de material	12
2.2.3 Chorro de material	13
2.2.4 Chorro de aglutinante	13
2.2.5 Fusión en lecho de polvo	14
2.2.6 Deposición de Energía Dirigida.....	15
2.2.7 Fabricación de Objetos Laminados.....	16
2.3 Correlación Digital de Imágenes (DIC)	17
2.3.1 Introducción	17
2.3.2 Características principales	17
2.3.3 Aplicaciones de la Correlación Digital de Imágenes.....	17
2.4 Aplicaciones de la fabricación aditiva en la Armada.....	18
2.4.1 Logística	18
2.4.2 Economía	19
2.4.3 Equipamientos militares	19
2.4.4 I+D	19
2.4.5 Biompresión.....	21
3 Metodología del TFG	23
3.1 Introducción	23
3.2 Software empleado.....	24
3.2.1 Siemens NX	24
3.2.2 Chitubox	25
3.3 Elementos de impresión	27

3.3.1 Impresora Creality LD002H	27
3.3.2 Resina	28
3.4 Elementos empleados en los ensayos.....	29
3.4.1 Aparato de Ensayo Universal WP 300	29
3.4.2 Durómetro Shore-D	30
3.5 Proceso de impresión	31
3.5.1 Definición de parámetros.....	31
3.5.2 Impresión 3D	33
3.6 Ensayos	34
3.6.1 Ensayos de tracción	34
3.6.2 Ensayos de pandeo.....	36
3.6.3 Ensayos de dureza.....	37
3.7 Cronograma.....	38
4 Resultados	40
4.1 Tiempos de impresión.....	40
4.2 Ensayos de pandeo	42
4.2.1 Modificación de la altura de capa	42
4.2.2 Modificación de tiempo de exposición.....	46
4.2.3 Modificación de la velocidad de elevación.....	47
4.2.4 Modificación del anti-aliasing	49
4.2.5 Incorporación del relleno	50
4.3 Ensayos de dureza	52
4.3.1 Variación de la altura de capa.....	52
4.3.2 Variación del tiempo de exposición	52
4.3.3 Variación de la velocidad de elevación	53
4.3.4 Variación de anti-aliasing	54
4.3.5 Aplicación del relleno.....	54
5 Conclusiones y líneas futuras	57
5.1 Conclusiones	57
5.1.1 Altura de capa	57
5.1.2 Tiempo de exposición.....	57
5.1.3 Velocidad de elevación.....	58
5.1.4 Anti-aliasing	58
5.1.5 Aplicación del relleno.....	58
5.1.6 Influencia de la modificación de parámetros en la dureza	58
5.2 Líneas futuras	59

6 Bibliografía.....	61
Anexo I: Datos extraídos de los ensayos de pandeo	63
Anexo II: Datos extraídos de los ensayos de dureza	106

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 Mercado de fabricación aditiva en el sector de automoción 2017-2028 (en millones de dólares) [3].	10
Figura 2-2 Procesos de fabricación aditiva [16].	11
Figura 2-3 Impresión 3D por SLA [4].	12
Figura 2-4 Impresión 3D por FDM [4].	12
Figura 2-5 Proceso de Material Jetting [16].	13
Figura 2-6 Esquema del funcionamiento de la tecnología Binder Jetting [1].	14
Figura 2-7 Proceso de SLS [1].	15
Figura 2-8 Proceso de fabricación DED [1].	16
Figura 2-9 Laminated Object Manufacturing [17].	16
Figura 2-10 Impresora 3D a bordo del USS Essex [5].	18
Figura 2-11 Tapón de drenaje diseñado mediante Fabricación Aditiva [9].	20
Figura 3-1 Proceso de realización del TFG.	24
Figura 3-2 Interfaz gráfica de modelado de Siemens NX	25
Figura 3-3 Interfaz gráfica de Chitubox	27
Figura 3-4 Impresora Creality LD002H	28
Figura 3-5 Resina fotocurable Elegoo	29
Figura 3-6 Aparato de Ensayo Universal WP 300	30
Figura 3-7 Durómetro Shore-D	30
Figura 3-8 Valores de los parámetros en la probeta de referencia	31
Figura 3-9 Checklist proceso de impresión	33
Figura 3-10 Dimensiones probeta para ensayos	34
Figura 3-11 Primeros problemas de diseño	35
Figura 3-12 Montaje de los ensayos de tracción y zona donde se sufren los esfuerzos	35
Figura 3-13 Fallos en la impresión de los nuevos diseños	36
Figura 3-14 Momentos de pandeo y rotura de los ensayos	37
Figura 3-15 Probeta utilizada en los ensayos de dureza	37
Figura 3-16 Cronograma inicial	38
Figura 3-17 Versión final del cronograma	39
Figura 4-1 Tiempo de impresión según la altura de capa	40
Figura 4-2 Tiempo de impresión según el tiempo de exposición	40
Figura 4-3 Tiempo de impresión según la velocidad de elevación.	41
Figura 4-4 Tiempo de impresión según el anti-aliasing.	41
Figura 4-5 Gráfica Tiempo de impresión-Coste para cada uno de los modelos	42

Figura 4-6 Gráfica Tensión-Deformación de los ensayos con la Probeta 1	43
Figura 4-7 Gráfica Tensión-Deformación de los ensayos con la Probeta 2	44
Figura 4-8 Gráfica Tensión-Deformación de los ensayos con la Probeta 3	45
Figura 4-9 Gráfico comparativo del Módulo Elástico según la altura de capa	45
Figura 4-10 Gráfica Tensión-Deformación de los ensayos con la Probeta 4	46
Figura 4-11 Gráfica Tensión-Deformación de los ensayos con la Probeta 5	46
Figura 4-12 Gráfico comparativo de los módulos elásticos según el tiempo de exposición.....	47
Figura 4-13 Gráfica Tensión-Deformación de ensayos con la Probeta 6.....	47
Figura 4-14 Gráfica Tensión-Deformación de ensayos con la Probeta 7.....	48
Figura 4-15 Gráfico comparativo de los módulos elásticos según la velocidad de elevación	48
Figura 4-16 Gráfica Tensión-Deformación de ensayos con la Probeta 8.....	49
Figura 4-17 Gráfica Tensión-Deformación de ensayos con la Probeta 9.....	49
Figura 4-18 Gráfico comparativo de los módulos elásticos según el anti-aliasing	50
Figura 4-19 Gráfica Tensión-Deformación de ensayos con la Probeta 10.....	50
Figura 4-20 Gráfico comparativo al añadir relleno	51
Figura 4-21 Gráfico comparativo del Módulo Elástico de todos los modelos	51
Figura 4-22 Dureza según la altura de capa	52
Figura 4-23 Dureza según el tiempo de exposición	53
Figura 4-24 Dureza según la velocidad de elevación.....	53
Figura 4-25 Dureza según el Anti-aliasing.....	54
Figura 4-26 Dureza según el relleno	54
Figura 4-27 Gráfico comparativo de dureza de todos los modelos	55
Figura 4-28 Características de la resina	55
Figura 4-29 Tabla dureza-tensión de rotura [18].....	56
Figura 5-1 Nuevo diseño con tres cuartos de la sección central en mm.....	59
Figura 5-2 Nuevo diseño con la mitad de la sección central en mm.	60

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3-1 Resumen de los valores de las probetas	32
Tabla A1-0-1 Datos extraídos del primer ensayo con la Probeta 1	64
Tabla A1-0-2 Datos extraídos en el segundo ensayo con la Probeta 1	65
Tabla A1-0-3 Datos extraídos del tercer ensayo con la Probeta 1	67
Tabla A1-0-4 Datos extraídos del primer ensayo con la Probeta 2	69
Tabla A1-0-5 Datos extraídos del segundo ensayo con la Probeta 2	69
Tabla A1-0-6 Datos extraídos del tercer ensayo con la Probeta 2	71
Tabla A1-0-7 Datos extraídos del primer ensayo con la Probeta 3	73
Tabla A1-0-8 Datos extraídos del segundo ensayo con la Probeta 3	75
Tabla A1-0-9 Datos extraídos del tercer ensayo con la Probeta 3	77
Tabla A1-0-10 Datos extraídos del primer ensayo con la Probeta 4	78
Tabla A1-0-11 Datos extraídos del segundo ensayo con la Probeta 4	80
Tabla A1-0-12 Datos extraídos del tercer ensayo con la Probeta 4	81
Tabla A1-0-13 Datos extraídos del primer ensayo con la Probeta 5	83
Tabla A1-0-14 Datos extraídos del segundo ensayo con la Probeta 5	85
Tabla A1-0-15 Datos extraídos del tercer ensayo con la Probeta 5	86
Tabla A1-0-16 Datos extraídos del primer ensayo con la Probeta 6	88
Tabla A1-0-17 Datos extraídos del segundo ensayo con la Probeta 6	89
Tabla A1-0-18 Datos extraídos del tercer ensayo con la Probeta	91
Tabla A1-0-19 Datos extraídos del primer ensayo con la Probeta 7	92
Tabla A1-0-20 Datos extraídos en el segundo ensayo con la Probeta 7	93
Tabla A1-0-21 Datos extraídos del tercer ensayo con la Probeta 7	94
Tabla A1-0-22 Datos extraídos del primer ensayo con la Probeta 8	96
Tabla A1-0-23 Datos extraídos del segundo ensayo con la Probeta 8	97
Tabla A1-0-24 Datos extraídos del tercer ensayo con la Probeta	98
Tabla A1-0-25 Datos extraídos del primer ensayo con la Probeta 9	99
Tabla A1-0-26 Datos extraídos del segundo ensayo con la Probeta 9	101
Tabla A1-0-27 Datos extraídos del tercer ensayo con la Probeta 9	101
Tabla A1-0-28 Datos extraídos del primer ensayo con la Probeta 10	103
Tabla A1-0-29 Datos extraídos del segundo ensayo con la Probeta 10	104
Tabla A1-0-30 Datos extraídos del tercer ensayo con la Probeta 10	105
Tabla A2-0-1 Datos extraídos de los ensayos de dureza con las cinco primeras probetas	106
Tabla A2-0-2 Datos extraídos de los ensayos de dureza con las probetas 6, 7, 8, 9 y 10	106

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción

El presente Trabajo de Fin de Grado se pretende realizar un estudio de unas de las tecnologías más influyentes dentro de la impresión en tres dimensiones, la fabricación aditiva mediante resina fotocurable o estereolitografía (SLA). El crecimiento en el mercado de estas tecnologías y su posible implantación en todo tipo de ámbitos nos llevado al planteamiento de su utilización en la industria de Defense y en la Armada más concretamente.

La posible implantación de las diferentes tecnologías en la fabricación de repuestos de las unidades, posible creación de unidades no tripuladas tanto marítimas como terrestres y aéreas sitúan estas tecnologías en la vanguardia de la innovación. Se están realizando múltiples diseños en los que las tecnologías de fabricación aditiva juegan un importante papel, incluso mayor que el propio diseño de los elementos. La Armada, al igual que el resto de la industria, debería estar a la cabeza en el estudio de este tipo de tecnologías. Encontrar la forma de implantar estas tecnologías en las distintas unidades, debido al gran avance que supone, además, del ahorro económico y de tiempo que supone. El gran beneficio de estas tecnologías es evitar depender de los distintos proveedores y ser nuestros propios proveedores

En lo referente a este proyecto se hará un estudio de las propias características de impresión, en lugar de las de diseño, es decir, un estudio de cómo puede influir los diferentes softwares de impresión y los parámetros que modificaremos más adelante. El estudio que se va a llevar a cabo es sobre la resina, y como mejoran sus cualidades mecánicas en función de sus parámetros de impresión.

En España es un mercado creciente con 11.522 profesionales en la impresión 3D [1], que está centrado especialmente en Madrid y Barcelona. Además, se prevé un gran crecimiento de las diferentes tecnologías debido a varios factores como:

- El surgimiento de nuevas tecnologías de fabricación aditiva.
- El precio del metal crece más del 25% anualmente, por lo que hay que buscar medios alternativos de fabricación.
- Avances en los materiales poliméricos, que cada vez tienen mejores prestaciones.
- La sencillez de los softwares de impresión respecto a los métodos tradicionales de creación, además de una gran especialización en estos ámbitos.
- Los precios cada vez son más bajos debido a la gran competitividad entre las distintas tecnologías [2].

1.2 Objetivos

El objetivo del presente TFG es realizar un estudio de las tecnologías de fabricación aditiva, sus ventajas y desventajas, sus posibles aplicaciones y su posible implantación en las unidades de la Armada. Al ser una tecnología de constante crecimiento existen gran cantidad de variables que tener en cuenta, como materiales, aplicaciones de cada una, magnitudes y tiempos de impresión entre otras.

Se realizarán estudios adaptados a las capacidades de las que dispone el CUD y por ello nos centraremos en una única tecnología, la estereolitografía o fabricación aditiva por medio de resina fotocurable. Con los medios disponibles se realizarán diferentes ensayos mecánicos con el fin de evaluar las características mecánicas y optimizar los parámetros de impresión que este tipo de tecnología nos permita.

Además de los diferentes ensayos y la comparativa de sus propiedades mecánicas también se tendrá en cuenta el tiempo empleado en la impresión de los diferentes modelos con el objetivo final de definir una optimización en propiedades y tiempos.

1.3 Estructura

La estructura del presente TFG está claramente diferenciada en cinco apartados principales:

1. Introducción y objetivos: en este apartado se realiza una síntesis de la tecnología de fabricación aditiva, así como su impacto actual y un establecimiento de objetivos en el desarrollo del trabajo.
2. Estado del arte: donde se realiza un estudio de las diferentes tecnologías que existen dentro de la impresión en tres dimensiones, el impacto y aplicaciones que tienen en la actualidad en todos los ámbitos, centrándonos después de sus posibles aplicaciones en la industria de Defensa en general y en la Armada en específico.
3. Metodología del TFG: aquí se explicará con detalle los softwares empleados, los distintos elementos y aparatos para los ensayos de los que disponemos. Además, se hará una explicación justificada de cada uno de los ensayos que se van a llevar a cabo con un resumen de los resultados que se pretenden obtener de ellos. Además, habrá una sección que incluya el proceso de impresión de los distintos modelos justificando los valores de los parámetros que han decidido modificar.
4. Resultados: tras la explicación de cómo se van a llevar a cabo los ensayos, en este apartado se comentará el proceso que se ha seguido y como se han obtenido los resultados y una pequeña discusión acerca de estos.
5. Conclusiones y líneas futuras: en esta sección se hará un análisis de los resultados obtenidos en el anterior apartado y una selección de los valores definidos como óptimos con una justificación de estos. Además, al final de esta sección se expondrán una serie de proyectos que podrían continuar con la línea del presente TFG con intención de ampliar el estudio de una tecnología que va al alza a medida que pasan los años.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Fabricación aditiva

La fabricación aditiva, o fabricación por adición, es un concepto de producción a través del cual el material (plástico o metal) es depositado capa a capa de manera controlada allí donde es necesario. Con esta técnica, que comúnmente se conoce como impresión 3D, se producen formas geométricas personalizadas según las necesidades de cada sector.

Comparada con las técnicas tradicionales de fabricación, con esta tecnología se reducen procesos intermedios como la producción de utillajes, lo que permite crear piezas de forma mucho más rápida. Además, al utilizar únicamente el material para la fabricación de la pieza o se generan desechos, el coste de los componentes es menor y es una producción sostenible.

Tal y como se puede apreciar en la Figura 2-1, en los últimos años la producción aditiva ha experimentado un crecimiento debido a su rapidez, precisión y ahorro económico. Los sectores más maduros en la aplicación de esta tecnología son el de la salud y la industria aeroespacial, permitiendo obtener desde implantes personalizados según las necesidades de cada paciente, hasta componentes de aeronaves que soportan 700° C de temperatura de manera continuada. Además de estos sectores, también se aplica en otros muchos como la automoción, industria textil, juguetes, electrónica de consumo, muebles, arquitectura e industria en general entre muchos [3].

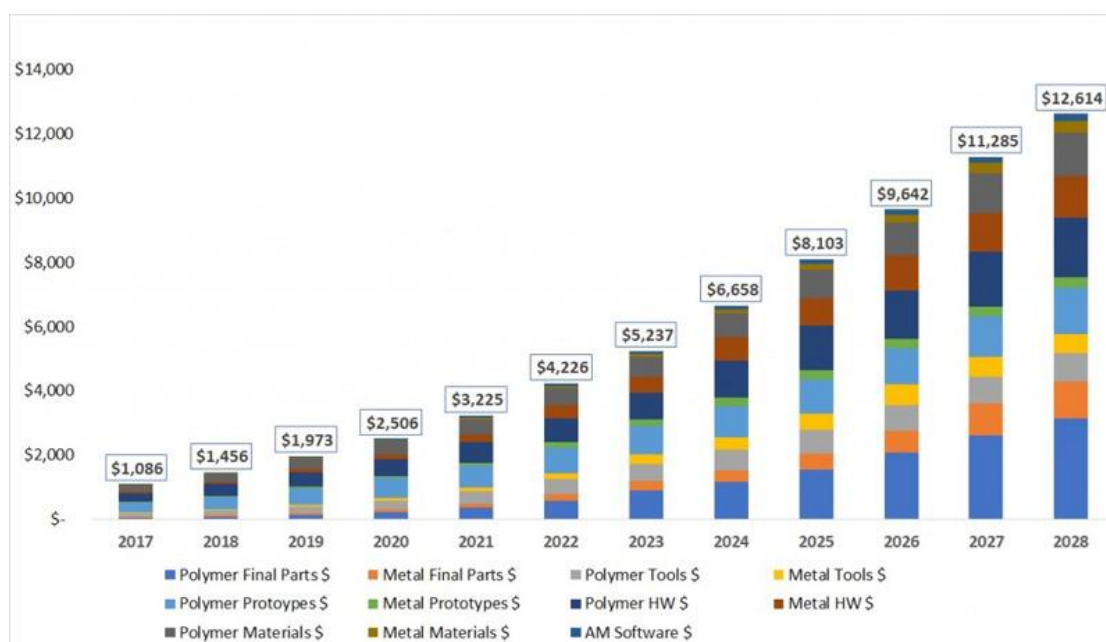


Figura 2-1 Mercado de fabricación aditiva en el sector de automoción 2017-2028 (en millones de dólares) [3].

2.2 Tecnologías de fabricación aditiva

El criterio de la *American Society for Testing Materials* (ASTM) muestra siete métodos, Figura 2-2, de fabricación aditiva según los métodos para ir superponiendo las capas de material fundido o polvo utilizados. Nos centraremos en el proceso de Estereolitografía (SLA), englobado dentro del proceso de fotopolimerización.

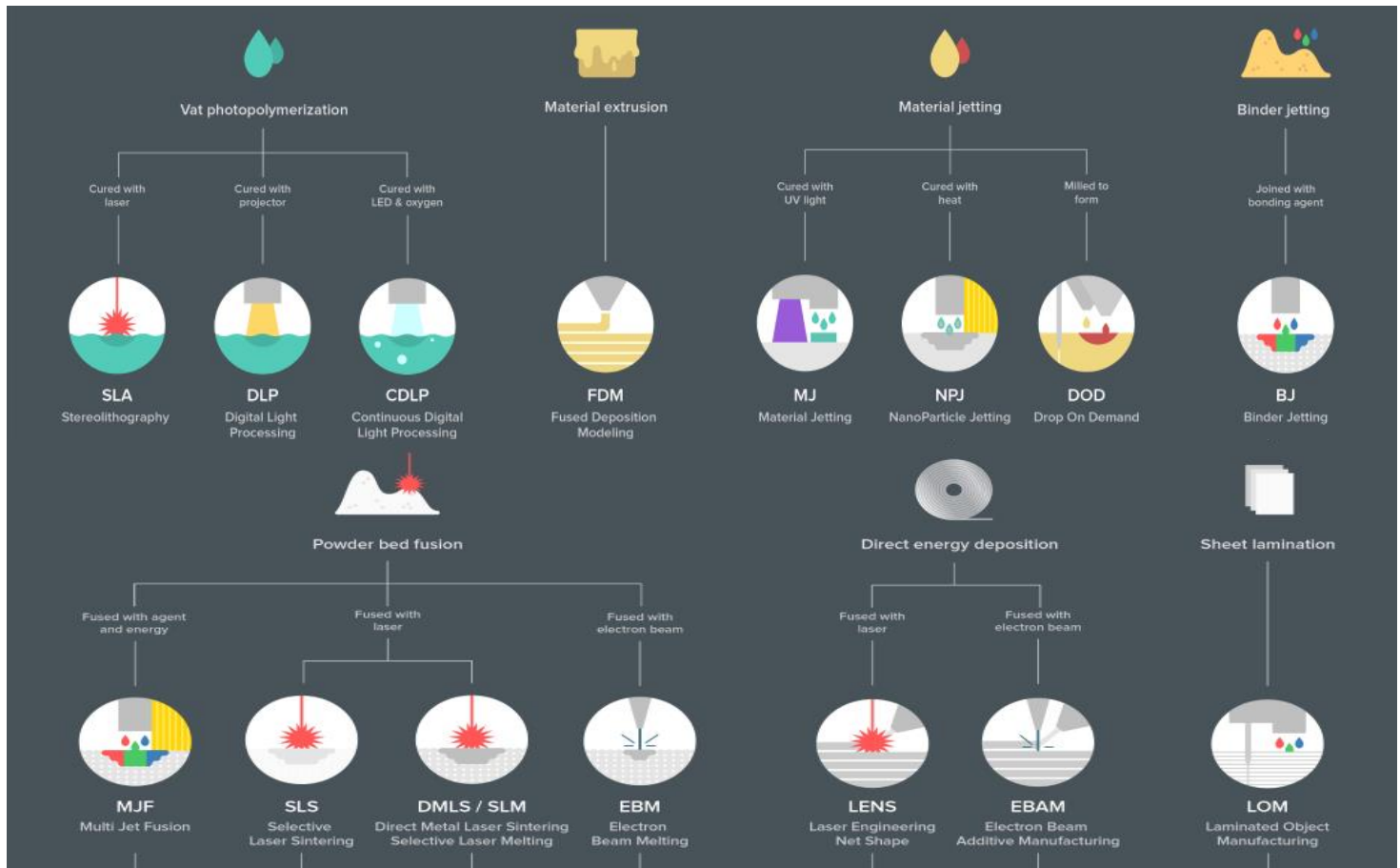


Figura 2-2 Procesos de fabricación aditiva [16].

2.2.1 Fotopolimerización

Este proceso implica la exposición de una capa de líquido fotocurable que inicia una reacción química, mediante un láser de barrido o una imagen proyectada de alta resolución, transformándola en un sólido reticulado. Permite producir piezas con detalles y dimensiones muy variadas. Su principal aplicación es para la fabricación de moldes y herramientas de corta duración debido a la fragilidad de las piezas producidas. Dentro de la fotopolimerización existen tres tecnologías distintas:

- Estereolitografía (SLA):** utiliza una plataforma sumergida en un tanque translúcido lleno de resina de fotopolímero líquido. Una vez sumergida, un láser puntual mapea un área de sección transversal (capa) a través del fondo del tanque solidificando el material con la forma de la capa. Una vez solidificada esta capa, la plataforma se levanta y se repite el proceso capa por capa. Para finalizar el proceso se puede someter a las piezas con luz ultravioleta, mejorando así sus propiedades mecánicas. En la Figura 2-3 se puede ver este tipo de impresión.
- Procesamiento de luz directa (DLP):** tecnología muy similar a la SLA. A diferencia que la anterior esta tecnología utiliza una pantalla de luz digital para mostrar una imagen de cada capa. Esta imagen se compone de píxeles cuadrados llamados voxels. Sus tiempos de impresión pueden ser menores que los logrados con la tecnología SLA ya que no tiene que trazar el área entera.

- c. Procesamiento continuo de luz directa (CDLP): produce piezas de la misma manera que DLP, pero el movimiento de la placa en el eje vertical es continuo, lo que hace que esta tecnología sea aún más rápida que las dos anteriores [5].

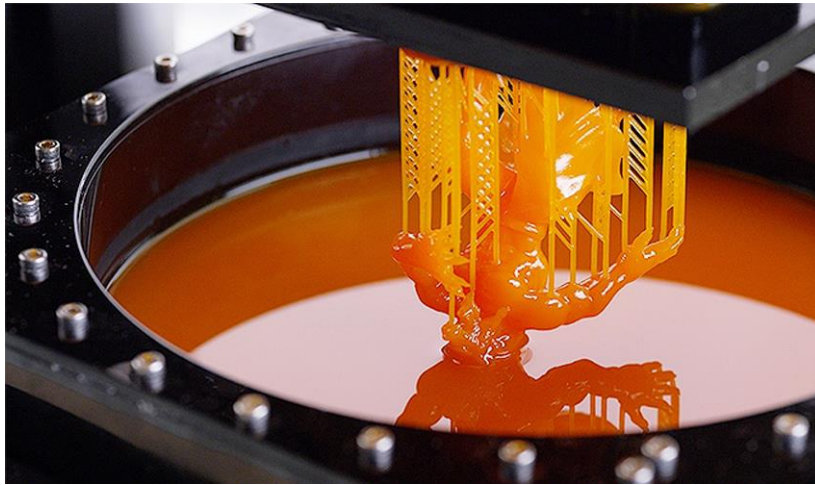


Figura 2-3 Impresión 3D por SLA [4].

2.2.2 Extrusión de material

Consiste en un cabezal que se mueve en el plano X-Y fundiendo un filamento de plástico a medida que va aportando el material capa a capa creando así la figura en 3D. Es la base de las impresoras 3D, su principal ventaja es su bajo coste y la posibilidad de trabajar con distintos materiales poliméricos.

La tecnología se denomina *Fused Deposition Modeling*, modelado por deposición fundida (FDM), Figura 2-4, que construye piezas usando material termoplástico sólido en forma de filamento insertando el material en una boquilla donde se funde y deposita el material fundido siguiendo un determinado camino, cuando el material depositado se solidifica continúa con la siguiente capa. Después se somete a un acabado superficial y también se le puede aplicar un proceso de revestimiento para mejorar su estética.

La fabricación aditiva por extrusión se está convirtiendo en un método rentable para la creación de prototipo de piezas metálicas mediante la impresión de piezas con un compuesto metal-termoplástico. El postprocesado incluye la inmersión de la pieza en un baño líquido, que disuelve la mayor parte del polímero y después una sinterización a alta temperatura para densificar la pieza [5].

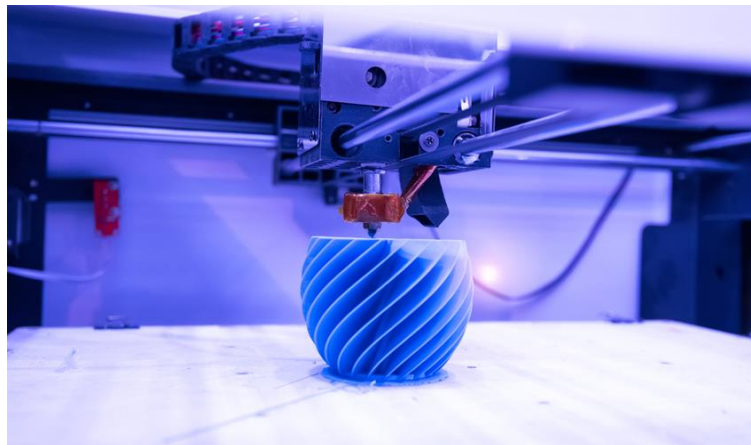


Figura 2-4 Impresión 3D por FDM [4].

2.2.3 Chorro de material

La tecnología de chorro de material consiste en la deposición de pequeñas gotas de material con control espacial. Su principio de funcionamiento es similar al de las impresoras de chorro de tinta convencional, con la diferencia de que se construye una pieza 3D en lugar de una figura en 2D. Estos sistemas son capaces de producir piezas con múltiples materiales, gran resolución, alta precisión dimensional y acabado de superficie lisa. Existen tres tipos de tecnologías:

- Chorro de Material o Material Jetting (MJ): dispensa un fotopolímero a través de cientos de pequeñas boquillas en un cabezal de impresión para construir una pieza capa a capa. Esto permite una mayor velocidad a la hora de depositar el material. A medida que las gotas se depositan en la plataforma de construcción, se curan y solidifican con luz UV. Los distintos elementos de esta tecnología se pueden observar en la Figura 2-5.
- Chorro de nanopartículas, Nano Particle Jetting (NPJ): esta tecnología utiliza un líquido que contiene nanopartículas metálicas que se carga en las impresoras y se inyectan en la plataforma de construcción en capas extremadamente finas. Dentro del recinto de construcción existen altas temperaturas que evaporan el líquido dejando libre la pieza metálica.
- Deposición por demanda o Drop-On Demand (DOD): disponen de dos chorros de impresión: uno para depositar el material de construcción (suele ser un líquido parecido a la cera) y otro para el material de soporte soluble. Este tipo de impresoras siguen una ruta predeterminada construyendo el área de sección transversal. Además, disponen de una cuchilla que raspa esta sección después de cada capa para asegurar una superficie perfectamente plana antes de imprimir la siguiente capa. Esta tecnología se emplea generalmente para producir patrones similares a la cera sobre todo para la fabricación de moldes [5].

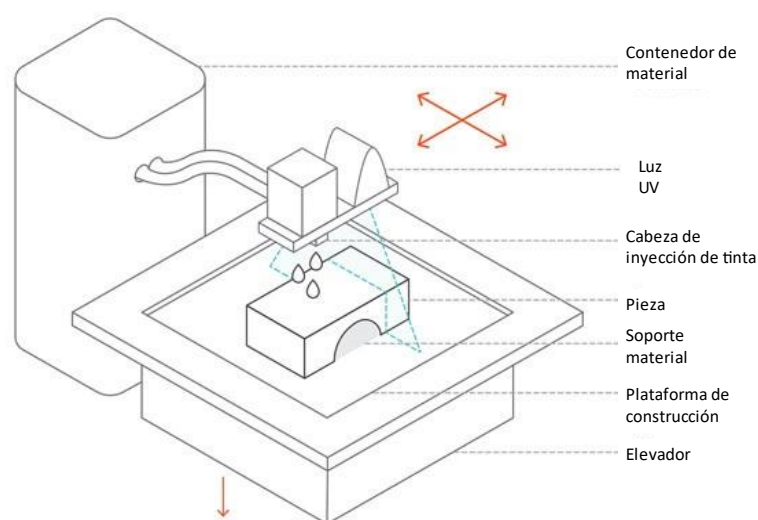


Figura 2-5 Proceso de Material Jetting [16].

2.2.4 Chorro de aglutinante

La tecnología de chorro de aglutinante o Binder Jetting consiste en la deposición de chorro de tinta de un aglutinante líquido sobre un lecho de polvo. Debido al uso de aglutinante para unir la pieza antes del postprocesado, este proceso es compatible con muchos materiales como la arena, metales, cerámica e incluso azúcar.

La tecnología empleada (Binder Jetting) deposita un agente adhesivo sobre capas delgadas de material en polvo, que suelen ser de cerámica o de metal. El cabezal de impresión se desplaza sobre la plataforma de impresión depositando gotas de aglutinante, imprimiendo cada capa como una impresora de tinta sobre papel. Una vez se completa cada capa, el lecho de polvo se mueve hacia abajo y se extiende una capa de polvo sobre la superficie de construcción, repitiendo el proceso hasta que la pieza termina. Requiere un postprocesado tras su impresión. Los distintos elementos de este proceso se pueden diferenciar en la Figura 2-6.

Los modelos basados en cerámica se utilizan en modelos arquitectónicos, envases, verificación ergonómica... es decir, en aplicaciones donde se muestra su estética y forma. Los modelos basados en metales son empleados como componentes funcionales, aunque tienen unas propiedades mecánicas pobres [5].

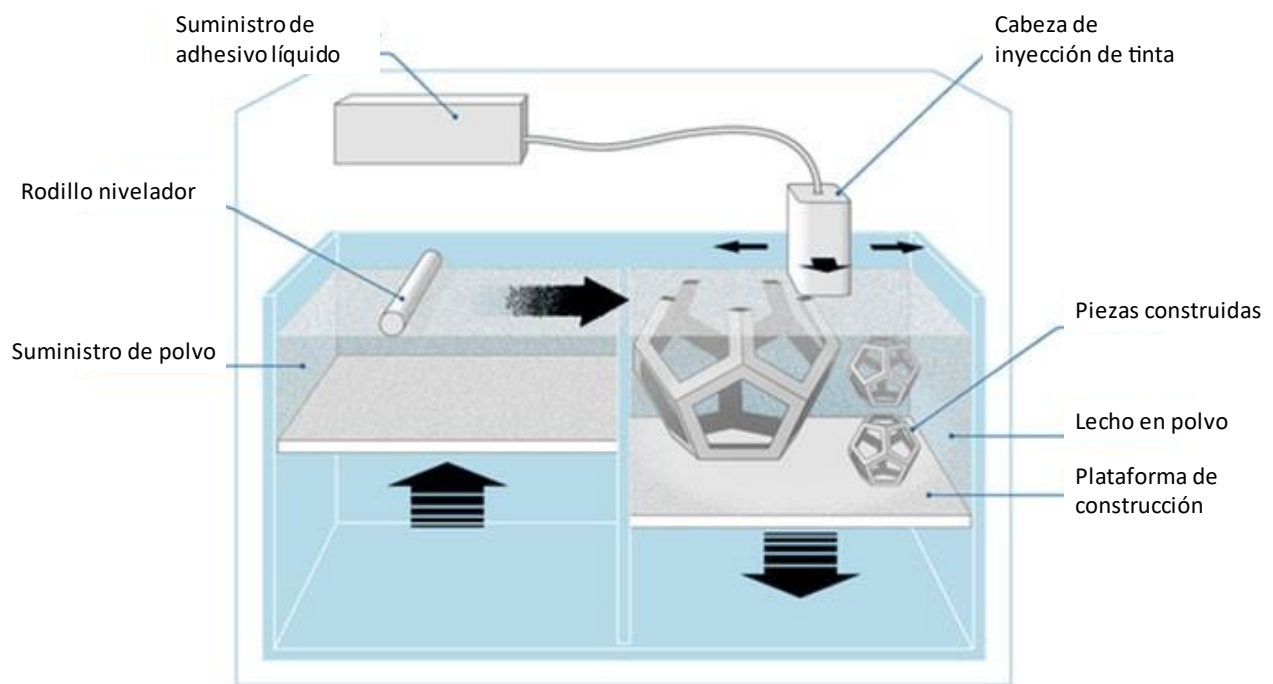


Figura 2-6 Esquema del funcionamiento de la tecnología Binder Jetting [1].

2.2.5 Fusión en lecho de polvo

El proceso de fabricación aditiva mediante fusión en lecho de polvo, Powder Bed Fusion (PBF), se basa en la fusión selectiva de una capa de polvo, de polímero o metal, para crear componentes altamente complejos en cuanto a su geometría. Comienza extendiendo una capa de polvo sobre el área de construcción. Las secciones transversales derriten una capa a la vez, suele ser con un láser, con un haz de electrones o lámparas infrarrojas intensas. Las distintas tecnologías que se conocen de la PBF son:

- La sinterización selectiva por láser o Selective Laser Sintering (SLS), Figura 2-7, produce piezas de plástico sólido utilizando un láser para sinterizar capas delgadas de material en polvo, capa a capa. Comienza esparciendo una capa de polvo sobre la plataforma de construcción. Se escanea la sección transversal de la pieza y se sinteriza por láser, solidificando. Tras esto la plataforma desciende el espesor de una capa y le aplica una nueva capa de polvo, repitiendo el proceso hasta producir la pieza sólida a la que le faltaría retirarle el polvo para su finalización.
- Fusión selectiva por láser o Selective Laser Melting (SLM) y la sinterización directa por fusión de metales o Direct Metal Laser Sintering (DMLS): producen piezas de forma similar al SLS, pero para producir piezas de metal. SLM logra la fusión total del polvo mientras que DMLS

calienta el polvo a temperaturas cercanas a la fusión hasta que se fusionan químicamente. DMLS solo funciona con aleaciones, mientras que SLM puede usar metales de un solo componente, como el aluminio.

- c. El proceso de fusión de haz de electrones o Electron Beam Melting (EBM) utiliza un haz de alta energía en lugar de un láser para inducir la fusión entre las partículas de un polvo de metal. Un haz de electrones enfocado explora una fina capa de polvo provocando fusión localizada y solidificación en un área específica de la sección transversal. Esta tecnología produce menos tensiones residuales en las piezas, lo que produce menos distorsión y menos necesidad de anclajes y estructuras de soporte. Además, utiliza menos energía que SLM y DMLS por lo que puede producir capas a un ritmo mayor. Aunque los detalles son menores y de menor calidad.
- d. Fusión de chorro múltiple o Multi Jet Fusion (MJF): es una combinación de las tecnologías SLS y MJ. Un carro con boquillas de inyección de tinta pasa sobre el área de impresión, depositando el agente de fusión sobre una capa fina de plástico. A la vez, un agente detalle que inhibe la sinterización se imprime cerca del borde de la pieza. A continuación, una fuente de IR de alta potencia pasa sobre el lecho de la construcción y sinteriza las áreas donde se aplicó el agente de fusión, dejando intacto el resto del polvo. Se repite este proceso hasta que todas las piezas estén completadas [5].

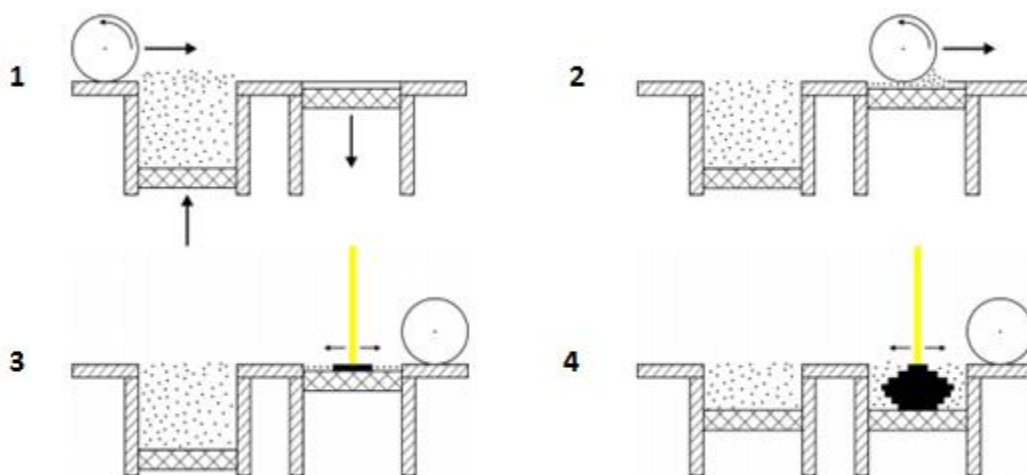


Figura 2-7 Proceso de SLS [1].

2.2.6 Deposición de Energía Dirigida

La Deposición de Energía Dirigida (DED) o Deposición de Metal utiliza un flujo dirigido de polvo junto con una fuente intensiva de energía, como láser, arco o haz de electrones, para construir piezas metálicas de forma directa. Esto permite construir grandes estructuras de metal si las limitaciones del lecho en polvo. En la Figura 2-8 están reflejados los elementos de esta tecnología. Las tecnologías empleadas son las siguientes:

- a. Formas de red diseñadas por láser o Laser Engineered Net Shape (LENS): utiliza un cabezal de deposición, que consiste en un cabezal láser, boquillas dispensadoras de polvo y tubos de gas inerte, para derretir el polvo a medida que se expulsa desde las boquillas dispensadoras de polvo para construir una pieza sólida capa a capa. El láser crea un volumen de fusión en el área de construcción y se pulveriza el polvo encima, donde se derrite y solidifica.
- b. Fabricación de aditivos por medio de haz de electrones o Electron Beam Additive Manufacture (EBAM): se utiliza para crear piezas metálicas haciendo uso de polvo metálico o filamento, soldados entre sí por medio de un haz de electrones como fuente de calor. Produce las piezas de

forma similar a LENS, pero de manera más eficiente debido al empleo de los haces de electrones [5].

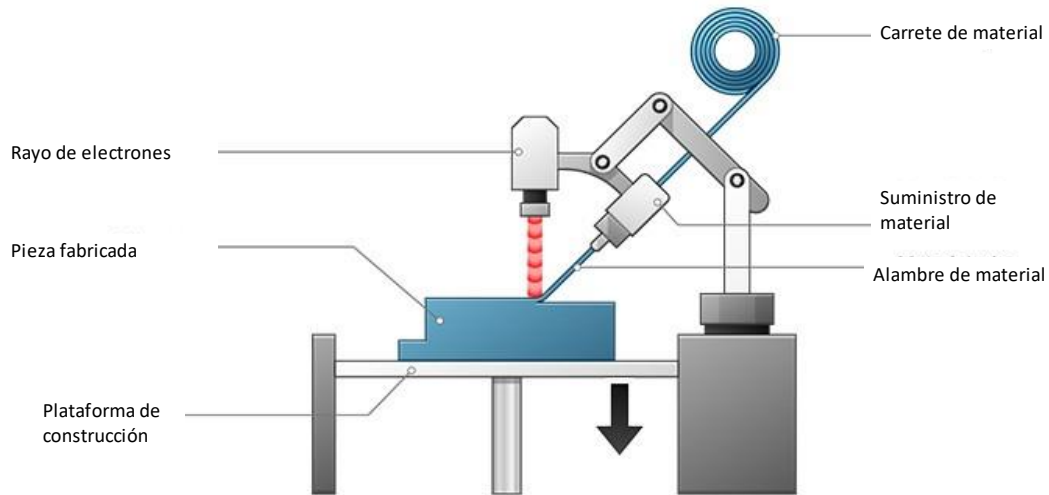


Figura 2-8 Proceso de fabricación DED [1].

2.2.7 Fabricación de Objetos Laminados

El proceso de Fabricación de Objetos Laminados, Lamination Object Manufacturing (LOM), Figura 2-9, es el proceso mediante el cual láminas apiladas se unen y cortan para formar una estructura 3D. Fue el primer proceso de fabricación aditiva y los primeros conceptos fueron patentados en 1892 por J.E. Blather como “fabricación de mapas de relieve”.

Tienen una aplicación muy positiva para los servicios de fundición que necesitan patrones positivos para la fabricación de moldes, especialmente en fundición en arena. Además, los modelos en papel son muy útiles para la visualización y planificación de conceptos, y la capacidad de color completo le otorga una importante aplicación en arquitectura, diseño de productos y medicina [5].

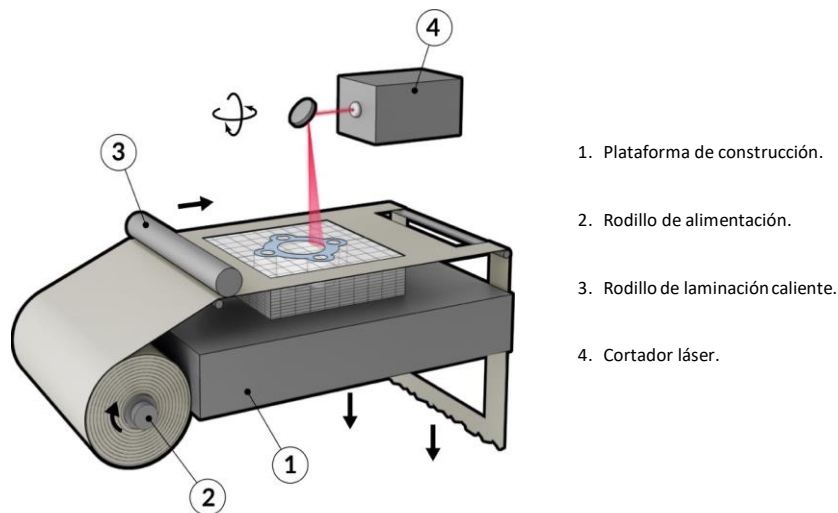


Figura 2-9 Laminated Object Manufacturing [17].

2.3 Correlación Digital de Imágenes (DIC)

2.3.1 Introducción

La Correlación Digital de Imágenes (DIC) es una técnica óptica de campo completo que permite la medición de desplazamientos y deformaciones. Consiste en la toma de imágenes digitales durante el ensayo, en el caso de este TFG será ensayos de tracción, desde su estado inicial, el cual se toma como referencia, hasta su estado final. Para poder aplicar esta técnica las probetas necesitan ser tratadas, aplicándoles una base de pintura blanca sobre la superficie y, posteriormente, se genera un moteado aleatorio de color negro para crear el mayor contraste posible. Las probetas se dividen en subconjuntos virtuales, que se denominan facetas, y mediante la aplicación de algoritmos de correlación, se busca una faceta de imagen tomada como referencia en la imagen deformada, determinando así el vector desplazamiento de cada conjunto de las facetas procesadas [6].

2.3.2 Características principales

Esta técnica de medición óptica ha sido especialmente utilizada en el campo de la mecánica experimental debido principalmente a las siguientes ventajas que presenta con respecto a otros métodos ópticos interferométricos para la medición de desplazamientos y deformaciones:

- El montaje que se necesita es sencillo, una cámara digital y un soporte que sea capaz de fijarla. Además del sencillo pretratamiento que necesitan las probetas en el caso de que su propia textura permita la aplicación de la técnica óptica de manera directa.

- No es necesaria la utilización de fuentes de luz externas para mejorar la calidad de las imágenes, con la luz natural sería suficiente.

- Puede llegar a tener una precisión de 0.01 píxel para la medida de los desplazamientos y 0.01% para la medida de deformaciones.

- Los algoritmos que implementa esta técnica tienen bajos requerimientos computacionales, pudiéndose realizar, incluso, análisis en tiempo real.

Todas estas ventajas que hacen de la correlación digital de imágenes como un método realmente útil para la medición de desplazamientos y deformaciones. Pero, a pesar de esto, esta técnica también presenta algunas desventajas. El principal problema que presenta es la dependencia de la calidad de imagen obtenida durante los ensayos además de la pérdida de información producida en aquellas zonas donde se produce rotura, lo que hace que las mediciones de deformación en estas zonas pierdan fiabilidad [6].

2.3.3 Aplicaciones de la Correlación Digital de Imágenes

Durante los últimos años se han utilizado aplicaciones basadas en el DIC para estudiar el comportamiento de distintos materiales bajo determinadas condiciones. En el campo de la mecánica de la fractura se han hecho diversos estudios como ensayos experimentales de propagación de daños ante sollicitaciones externas, en otros.

Esta técnica también ha sido empleada en el sector aeronáutico para la evaluación de propiedades mecánicas como el estudio del comportamiento a fractura en el cajón central del ala de un avión, también distintos estudios en el sector automovilístico. Incluso Evans y Holt hicieron avances en medicina estudiando las propiedades mecánicas de la piel humana comparando los resultados obtenidos con DIC y elementos finitos [6].

En el caso del presente TFG nos centraremos en la optimización de los parámetros a modificar en la impresión 3D, realizando el estudio del comportamiento de una probeta fabricada por una impresora 3D, basada en la tecnología SLA, a esfuerzos de tracción, pandeo y dureza. Para el estudio de su comportamiento a tracción se pretendía utilizar la técnica de Correlación Digital de Imágenes para obtener gracias a esta las mediciones de desplazamientos y deformaciones que se irían sucediendo durante los distintos ensayos. Cómo se expondrá más adelante, el estudio a tracción no se pudo realizar, por ello, no tiene sentido utilizar esta herramienta ya que la deformación durante los ensayos de pandeo es en tres dimensiones y esta técnica confundiría la curvatura de pandeo con un movimiento de contracción uniaxial.

2.4 Aplicaciones de la fabricación aditiva en la Armada

A continuación, se expondrán algunas de las muchas aplicaciones que tiene la fabricación aditiva en el ámbito que nos corresponde, la Armada. La fabricación aditiva es una tecnología con altas posibilidades dentro del ámbito de la Armada debido a su versatilidad, la rapidez a la hora de la fabricación, la capacidad de adaptación a las necesidades de las distintas unidades y por el amplio abanico de posibilidades que esta tecnología nos otorga. Aplicaciones de la tecnología de la fabricación aditiva en la Armada:

2.4.1 Logística

La capacidad de este tipo de tecnología de impresión 3D facilita la capacidad de repuestos para las distintas unidades. No resultaría necesaria la capacidad de un almacén de repuestos, ya que estos podrían ser proporcionados en función de su demanda. De esta manera el espacio empleado en el almacenamiento de repuestos sería menor que el actual. Además, esto supone un gran aumento de la autonomía de las unidades.

Si además se consigue implementar un escáner 3D, la calidad de los repuestos obtenidos sería óptima, ya que se lograría replicar con gran exactitud estas piezas que necesitaríamos reponer.

Por ejemplo, la Marina de Estados Unidos ya ha comenzado a implantar esta tecnología en sus unidades para la fabricación in situ de piezas o materiales sin necesidad de perder el tiempo solicitando repuestos. Esta implantación comenzó en el año 2014 en el portaaviones USS Essex, Figura 2-10 [7].



Figura 2-10 Impresora 3D a bordo del USS Essex [5].

2.4.2 Economía

La utilización de las impresoras 3D supondría un importante ahorro económico directamente relacionado con el factor logístico mencionado anteriormente. Aquellas unidades con capacidad de imprimir sus propios repuestos serían capaces de resultar más eficientes económicamente ya que se ahorrarían los trayectos a puerto, durante las navegaciones, en busca de repuestos necesarios.

2.4.3 Equipamientos militares

Lo que se pretende al implementar la fabricación aditiva dentro de este campo es reducir el peso, desarrollando uniformes más ligeros agregándoles a estos una serie de sensores biométricos, capaces de medir latidos del corazón, presión sanguínea e incluso la respiración. Con esto se pueden optimizar las capacidades de los miembros que componen la Infantería de Marina [7].

2.4.4 I+D

En este apartado se expondrán algunos de los avances y logros de la Marina de Estados Unidos como una de las industrias más adelantadas en la aplicación de la tecnología 3D a su Fuerza Naval.

- Para la entrega rápida y asequible de modelos de barcos fabricados para facilitar el diseño y el trabajo de prueba de los ingenieros, se ha procedido a la utilización de la fabricación aditiva en el Centro de Superficie Naval de Carderock Division (NSWCCD), en Maryland, mediante el Laboratorio de Fabricación, Conocimiento y Educación (MAKE), el cual se inauguró el 24 de marzo de 2016. Gracias esto se podrán crear proyectos de una forma mucho más rápida y económica de una forma práctica [8].

En la Expo del Pentágono se enseñó una muestra de lo que es capaz esta tecnología, por ejemplo, el Mobile Fab Lab en el Centro de Mantenimiento Regional del Sureste fueron capaces diseñar y fabricar unos ventiladores de enfriamiento del motor eléctrico de repuesto por 1,39 dólares por cada unidad, un precio muy inferior al de su precio de compra, 375 dólares. Además, los expertos en impresión de la NAVY la capacidad asombrosa de esta tecnología de ahorrar tiempo, dinero y recursos [9].

En la Expo del Pentágono de 2016 también se mostraron muchos más avances de la fabricación aditiva en este campo, como cargas explosivas, pilas de combustible, sonoboyas, antenas de abordaje, hélices personalizadas, sensores y válvulas [9].

Para destacar la importancia que está teniendo la fabricación aditiva en este ámbito, comentar que en la Expo participaron organizaciones como el Comando de Sistemas Marítimos Navales, el Comando de Sistemas Aéreos Navales, el Centro de Sistemas de Guerra Espacial y Naval del Pacífico, las divisiones del Centro de Guerra Submarina y de Superficie Naval, Laboratorio de Investigación Naval, el Segundo Batallón de Mantenimiento del Cuerpo de Marines y todo tipo de organizaciones de Investigación y Desarrollo Naval [9].

- Durante una presentación en el Centro de Guerra de Superficie Naval de la División de Carderock el 15 de agosto de 2017 se presentó un prototipo para un contador de balas gastadas, "Lacounter". El nombre se debe a Ben Lacount, a quién le surgió la idea. La idea surgió porque cuando un soldado está intentando de suprimir el fuego enemigo lo último en lo que piensa es en llevar un registro mental de cuantas rondas quedan en el arma, proporcionando a los combatientes una mejor conciencia de la situación cuando se encuentren en combate. La forma en que lo hace es usando el retroceso del arma que contará las balas cuando golpee el latón dentro del arma [10].

Otro avance es la modernización el obús M777 añadiendo una pieza llamada Chief of Section Display (CSD) que se utiliza para apuntar. A veces el cable que une el CSD al arma puede dañarse por los escombros que se atascan en el cable. Se pudo desarrollar una tapa corta de seis pulgadas de largo que se puede conectar fácilmente al cable y es desechable y se considera una forma muy rentable de mantener el obús M777 en acción y evitar que se vuelva defectuoso debido al daño en cable CSD. Estas tapas de cable se pueden producir por 10\$, lo que es muy rentable con la estimación de lo que costaría remplazar el cable, que costaría alrededor de 3000\$ [10].

- En Carderock también se desarrolló un prototipo, llamado “Bang Bang”, que es una mochila de campo que le permite a los soldados llevar fácilmente Bangalores, cargas explosivas utilizadas por los ingenieros de combate para despejar obstáculos en el campo. Los Bangalores son voluminosos y difíciles de controlar, con la implementación de una mochila similar a un carcaj con correas elásticas que puede sostener los torpedos [10].
- Expeditionary Solution Cell (ESC) o la célula de solución expedicionaria del NSWC de Corona, comenzó a investigar un problema con las cargas de limpieza de minas (MICLIC), que no se desplegaba correctamente debido al daño ocasionado por los roedores. El MICLIC es una carga de línea explosiva proyectada por cohete que entra en un vehículo de asalto anfibio y se utiliza para despejar el camino para tanques, vehículos y personal a través de campos de minas y otros obstáculos. El recipiente del MICLIC tiene cuatro orificios grandes y un orificio pequeño en cada recipiente, a través de los cuales entran los roedores y destruyen partes [11].

Así que ante este problema se creó, mediante la fabricación aditiva, un tapón con orificios de drenaje, Figura 2-11, para mantener alejados a los roedores. El diseño se sometió a pruebas de prototipo y en un mes estuvo listo para fabricarlo y enviarlo a las unidades. Los ahorros que supuso esta nueva idea fueron estimados en 20 millones de dólares en prevención de daños [11].

Este es un claro ejemplo de lo que la fabricación aditiva puede portar en el campo militar, en general, y en el de la Armada, en específico. Soluciones rápidas y de bajo coste y con un gran impacto.



Figura 2-11 Tapón de drenaje diseñado mediante Fabricación Aditiva [9].

2.4.5 Biopresión

Es uno de los segmentos líderes de la industria de la impresión 3D en lo que a innovación se refiere. Gracias a las técnicas de impresión 3D, las células y los biomateriales se pueden combinar y depositar capa a capa para crear desarrollos biomédicos con las mismas propiedades que los tejidos vivos. El objetivo final es bioimprimir con éxito un órgano humano completamente funcional. Este campo se divide en cinco categorías diferentes según la tecnología empleada:

1. Bioimpresión de inyección de tinta:

Basada en el proceso de impresión por inyección de tinta. Las impresoras 3D con tecnología FDM se modifican para el mismo proceso desde un punto de vista biológico. Es un proceso que consiste en la deposición de capas de biotinta sobre un sustrato de hidrogel o placas de cultivo. Se pueden diferenciar dos métodos: térmicos o piezoeléctricos.

La tecnología térmica utiliza un sistema de calefacción que crea burbujas de aire, se derrumban y proporcionan presión para expulsar las gotas de biotinta. En cambio, la tecnología piezoeléctrica, utiliza la carga eléctrica que se acumula en un material sólido, en este caso una cerámica piezoeléctrica policristalina que está en la boquilla de la impresión. Aunque esta última puede causar daños a la membrana celular si se utiliza con demasiada frecuencia.

Se han hecho grandes avances en el patrón de moléculas, células y órganos con este tipo de impresión. Se han conseguido duplicar con éxito moléculas del ADN, una gran ayuda para el estudio de los problemas del cáncer. Por ejemplo, Organovo, un laboratorio médico que se encarga que diseña y desarrolla tejidos humanos para la investigación médica, actualmente están interesados en reproducir el tejido del hígado humano para poder reparar alguna parte dañada de este, prologado así la vida del órgano hasta que sea elegido para un trasplante [12].

2. Bioimpresión por extrusión:

Las biotintas empleadas para este tipo de impresión son normalmente soluciones que se extruyen coordinando el movimiento de un pistón o de una micro aguja. Las ventajas de esta tecnología incluyen el procesamiento de temperatura ambiente, la incorporación directa de células y la distribución celular homogénea [12].

3. Bioimpresión 3D asistida por láser:

Utiliza como fuente de energía un láser para depositar los biomateriales en un receptor. Esta técnica consta de tres partes: una fuente láser, una cinta recubierta con materiales biológicos que se depositan sobre una película y un receptor. Los rayos láser irradian la cinta, haciendo que los materiales biológicos líquidos se evaporen y lleguen al receptor en forma de gotas, este contiene un biopolímero que mantiene la adhesión celular y ayuda a las células a empezar a crecer. Esta técnica se está empleando en un programa de reproducción capilar entre Poietis y L'Oréal tratando de recrear un folículo piloso que podría resultar ser una solución para hacer crecer el cabello [12].

4. Estereolitografía:

Esta tecnología puede ser empleada en bioimpresión imprimiendo con hidrogeles sensibles a la luz. Está todavía en desarrollo, ya que, a pesar de ser la tecnología con la mayor precisión de las tecnologías de fabricación aditiva, cuenta con varias restricciones, como la falta de polímeros biocompatibles y biodegradables, los efectos nocivos y la imposibilidad de eliminar la estructura de soporte [12].

5. Bioimpresión por ondas acústicas:

Este método desarrollado por la Universidad Carnegie Mellon, la Universidad Estatal de Pensilvania y el MIT, utiliza lo que es llamado pinzas acústicas, un dispositivo microfluídico donde se pueden manipular células o partículas individuales, además del uso de ondas acústicas

superficiales. Lo que ofrece esta técnica es una actuación en lo que movimientos precisos de manera no invasiva se refiere.

Se pueden observar desarrollos como el ovario funcional creado por la Universidad de Illinois o los investigadores españoles que son capaces de desarrollar la piel humana que puede ser implantable [12].

6. La técnica SWIFT:

La técnica escritura de sacrificio en tejidos funcionales o como se conoce, técnica SWIFT (Sacrificial Writing Into Functional Tissue) es una nueva técnica que permite la bioimpresión de vasos sanguíneos en tejidos vivos. Fue desarrollada por Investigadores del Instituto Wyss de Ingeniería Biológica de Harvard. Esa técnica se enfoca en imprimir los vasos necesarios para soportar una construcción de tejido vivo que se pueden emplear para reparar y reemplazar órganos humanos con cultivos de laboratorio [12].

3 METODOLOGÍA DEL TFG

3.1 Introducción

Como se ha podido observar en el anterior apartado existes numerosas tecnologías diferentes dentro de la fabricación aditiva. Cada una de estas tecnologías tiene sus propios puntos fuertes y puntos débiles, es por ello por lo que se ven diferenciadas en cuanto a sus prestaciones, características, ventajas y desventajas, así como sus aplicaciones. En el presente TFG se va a hacer uso de la Fabricación Aditiva por medio de la tecnología SLA (Estereolitografía). Esta tecnología desarrolla las figuras en tres dimensiones por medio del empleo de resinas fotosensibles por medio de un láser de luz ultravioleta. Esta tecnología está basada en la fotopolimerización, por lo que este fenómeno también será estudiado en el presente trabajo.

Nos centraremos en analizar las características y propiedades mecánicas de las probetas que imprimiremos modificando los parámetros de impresión. Con estas variaciones obtendremos unos valores óptimos para mejorar al máximo las propiedades mecánicas de los modelos impresos por este tipo de tecnología. Además, también se pretende obtener unos valores con la mejor relación entre las propiedades deseadas y su coste y tiempo empleado en el proceso.

Uno de los ensayos a realizar será el de tracción, a partir del cual podremos obtener distintos valores que nos darán a entender como varían las propiedades mecánicas en función de los parámetros modificados. Otro de los ensayos que realizaremos será de dureza, con ello podremos determinar la resistencia de las piezas a ser dañadas, rayadas o penetradas.

Además de los mencionados ensayos realizados también se buscará obtener los valores que nos den las prestaciones que buscamos al mejor precio posible. Aunque con la probeta que realizaremos estos ensayos no se podrá observar grandes diferencias de precio debido a sus pequeñas dimensiones. Sin embargo, estas diferencias en el coste de la impresión podrían ser superiores en piezas de mayores dimensiones. De hecho, el objeto del presente fin de grado es la optimización de la impresión SLA, por lo que este sería un importante factor para tener en cuenta para la toma de conclusiones.

Para este estudio se nos presentan varios parámetros a modificar para la impresión. Estos parámetros, en los que se profundizará más adelante son: la altura de capa, total de capas inferiores, tiempo de exposición, tiempo de exposición de la base, retardos de apagado, distancia de elevación de la base, distancia de elevación, velocidad de elevación inferior, velocidad de elevación, velocidad de retracción y el anti-aliasing. De los cuales el estudio se hará mediante la modificación de valores se hará se los considerados más influyentes en lo que a nos importa, estos parámetros son los de altura de capa, tiempo de exposición, velocidad de elevación y anti-aliasing.

El desarrollo del trabajo se hará de forma que se diseñan las probetas y después se hacen los diferentes ensayos, tras ellos se estudiarán mediante el Método de Correlación de Imágenes Digitales (DIC). Y tras la obtención de resultados se procederá a la optimización de estos parámetros mediante dos vías: la primera en función de sus propiedades mecánicas y la segunda en función de su relación de propiedades mecánicas, coste y tiempo.

La secuencia de desarrollo del TFG se puede observar en la Figura 3-1. Más adelante se desarrollará más en profundidad cada una de estas fases ahondando en cada uno de los métodos y materiales empleados durante el desarrollo de este.

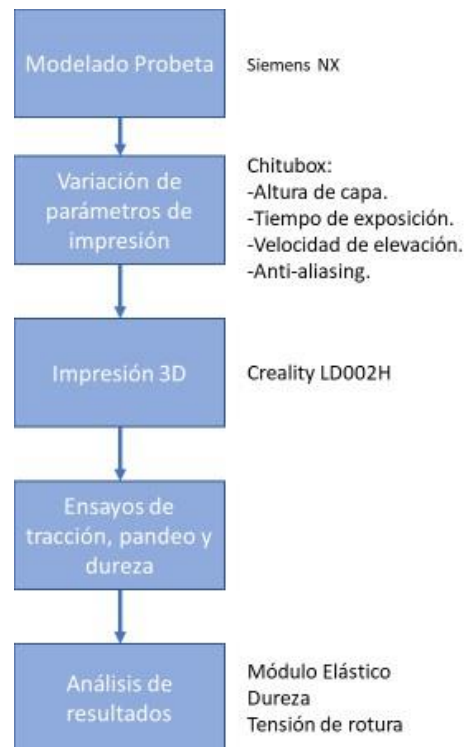


Figura 3-1 Proceso de realización del TFG.

3.2 Software empleado

Para el desarrollo del trabajo se ha necesitado del empleo de dos softwares distintos, uno para el modelado de la probeta y otro para su posterior impresión.

3.2.1 Siemens NX

Como cualquier otro proceso de impresión 3D debe como comenzar por el diseño de la pieza a imprimir mediante un programa CAD (Computer Aided Design). El elegido para el presente TFG ha sido el Siemens NX, el cual fue desarrollado por la empresa “Siemens PLM Software” en el año 2007. Su elección se debe a su sencillez y la experiencia adquirida en este software durante los cinco años de carrera, además de la sencillez que nos otorga su interfaz, Figura 3-2.

Este software nos da la posibilidad de modelar y diseñar piezas en tres dimensiones. La pieza que se desarrollará por medio de este software es la probeta. Tras el modelado de la pieza esta se extraerá en un formato tipo STL, este tipo de formato es el necesario para poder utilizar los modelos diseñados por cualquier programa de CAD a su posterior procesado en un software Slicer, como el que analizaremos a continuación y justificaremos su elección.

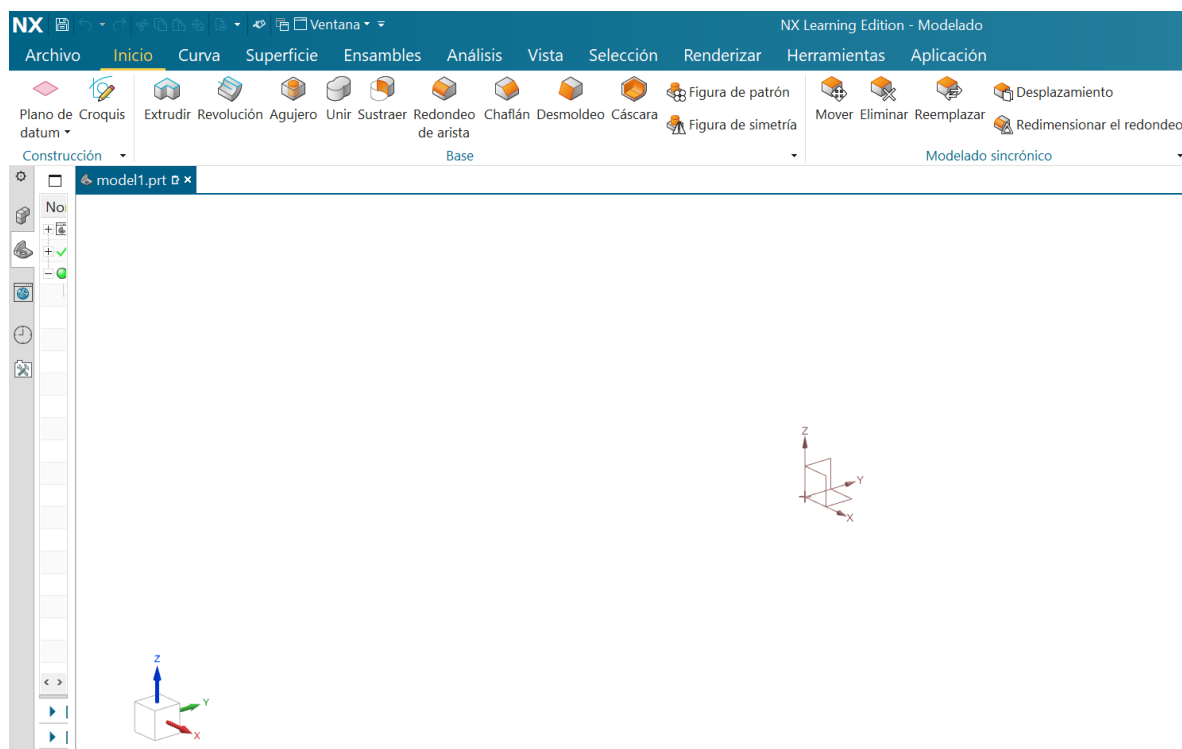


Figura 3-2 Interfaz gráfica de modelado de Siemens NX

3.2.2 Chitubox

Tras el modelado de la pieza en 3D diseñada mediante el Siemens NX esta debe ser exportada en formato STL. Este paso es completamente necesario para poder utilizar el Slicer (rebanador). El Slicer es un software cuya función es segmentar la pieza en “rebanadas” de tal manera que la impresora sea capaz de imprimir la pieza rebanada a rebanada.

Existen múltiples softwares Slicer entre los que hubo que seleccionar uno para realización del presente TFG. Tras analizar distintos softwares finalmente decidimos quedarnos con Chitubox, frente a otros como Prusa o Lychee. Cabe destacar que la impresión de nuestra pieza tampoco requiere grandes capacidades debido a la sencillez de la probeta que vamos a crear. Pero aun así destacaré algunas de las características que han decantado la balanza hacia Chitubox:

- La principal motivación para decantarnos por Chitubox ha sido la sencillez de su interfaz, Figura 3-3, muy intuitiva y cómoda a la hora de desarrollar la impresión.
- La capacidad de asignar más de un modelo para imprimir a la vez ha sido muy importante. Dada la cantidad elevada de piezas a imprimir esto ha supuesto un factor más que relevante para la elección del software, ya que nos permite aumentar considerablemente el ritmo de impresión.
- Genera un coste para cada pieza en función de la cantidad de resina empleada y su precio. Esto nos resulta realmente útil a la hora de la optimización.
- La función encargada de generar soportes automáticos y a partir de esta plataforma inicial poder modificarla al gusto de cada uno. Quitar soportes o poner unos nuevos, elegir el grosor, la profundidad de contacto y sus formas, además de la cantidad de soportes.

Tras la elección del software nos quedaba aún el estudio de este y de sus diferentes parámetros. La elección de los parámetros a modificar, que son de gran importancia, ya que basándose en ellos

modificaremos sus valores en busca de la manera óptima de impresión. Los parámetros que nos ofrece el software Chitubox son:

- Altura de capa: es el tamaño exacto de cada una de las capas que se van imprimiendo. Este parámetro afecta a la velocidad de impresión y la calidad del modelo. A mayor calidad de impresión mayor será el tiempo empleado en el proceso. Por ello este es uno de los parámetros más influyentes de esta tecnología. Se puede modificar entre 0.025mm y 0.1mm. Por estas razones la altura de capa es uno de los parámetros elegidos para la optimización [13].
- Tiempo de exposición: es la cantidad de tiempo a la que cada una de las capas estarán expuestas al fotocurado. Durante este proceso es cuando la resina solidifica, por lo que es otro parámetro considerado de principal importancia para su optimización.

Junto a este también aparece otro parámetro que es el del tiempo de exposición inicial. Este es el tiempo al que estarán expuestas las primeras capas. Se recomienda un valor de entre 8 y 12 veces superior al tiempo de curado usual. Por lo que no lo hemos considerado como uno de los parámetros claves de este software [13].

- Velocidad de elevación del eje Z: es la velocidad a la que se eleva la plataforma de impresión del tanque de resina entre cada capa. Es completamente necesario para asegurarse la adhesión la pieza a la plataforma y que no sufra tensiones por quedarse adherida al tanque de resina. Es decir, a menor velocidad mayor capacidad de adhesión a la plataforma y a la propia pieza, pero también aumentará su tiempo de impresión. Por ello se ha considerado este como uno de los parámetros claves a estudiar para la optimización [13].
- Anti-aliasing o anti-distorsión: se refiere al efecto de tipo escalera que forma al intentar plasmar una curva por medio de píxeles cuadrados o rectangulares. Lo que este parámetro hace es suavizar la curva del modelo a imprimir. Este parámetro es realmente influyente para el análisis de dureza previsto, así que será el cuarto parámetro clave en que buscaremos su optimización [13].
- El último parámetro que se ha decidido probar es el relleno, al realizar estudios sobre más parámetros, sólo se compararán un modelo sin relleno, que se utilizará el de referencia, y otro con un 100% de relleno sin alterar ninguno de los demás parámetros del diseño inicial.
- Otro de los muchos parámetros son las plataformas, parámetro esencial para evitar las “islas”, conas de impresión cuyo peso no es sostenido por ninguna otra parte de la pieza. Es un parámetro muy importante, pero dentro del presente TFG no es necesario su estudio ya que la probeta a imprimir es lo suficientemente sencilla, sin zonas flotantes que nos obligue a un exhaustivo estudio de este parámetro.
- La orientación también es un parámetro importante para mejorar la calidad de la impresión. Pero es utilizado especialmente para piezas con mucho detalle. Dado que nuestra probeta es una pieza sencilla no se verá especialmente afectada por la modificación de este parámetro.
- Además de estos existen otros parámetros no hemos considerado para su estudio en este proyecto como el total de capas inferiores (centrado en la cantidad de capas que contendrá la base sobre la que se apoya el modelo), los retardos de apagado que a medida que han ido avanzado las impresoras se han vuelto prácticamente innecesarios fijándose su valor habitual en cero. Otros parámetros referidos a la base como su distancia y velocidad de elevación y por último la velocidad de retracción, que es la velocidad de descenso de la plataforma de impresión.

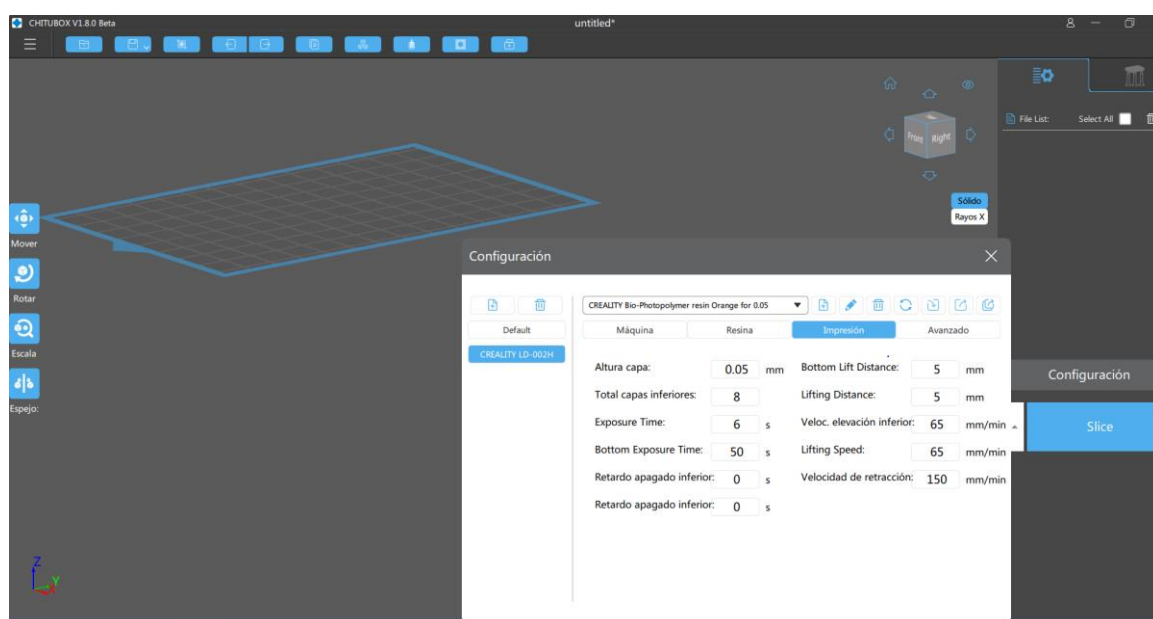


Figura 3-3 Interfaz gráfica de Chitubox

3.3 Elementos de impresión

3.3.1 Impresora Creality LD002H

La impresora empleada en el presente TFG es la Creality LD002H, Figura 3-4, recientemente adquirida por el CUD e instalada dentro de sus laboratorios.

Los principales parámetros de esta impresora son los siguientes:

- Tecnología LCD de impresión.
- Un tamaño de impresión de 130x82x160 mm.
- Velocidad de impresión entre 1 y 4s por capa.
- Pantalla táctil de 3,5 pulgadas.
- Dimensiones de la máquina: 295x295x403 mm.
- Peso de la máquina 8,3kg.
- Altura de la capa entre 0,03 y 0,05 mm.
- Precisión del eje X: 0,051mm.

Esta impresora presenta unas importantes ventajas respecto a sus predecesoras:

- Está equipada con una fuente de luz UV integrada, la fuente de luz alcanza los 8000uw/cm².
- Sistema de filtración de aire con carbón activado: el carbón es capaz de reducir de forma eficaz la emisión de olor de la resina y es más respetuoso con el medio ambiente.
- El carril lineal del eje Z proporciona una gran estabilidad, lo que proporciona una gran precisión, dotando a la pieza de unos acabados realmente refinados.
- Está equipada con el software Chitubox, esta fue la razón clave de elección de este software.

- Además, la pantalla táctil nos permite monitorear la información de la impresión en tiempo real, además de facilitar su empleo.



Figura 3-4 Impresora Creality LD002H

3.3.2 Resina

Las resinas están basadas en el proceso de polimerización. La Real Academia de la Lengua Española define este proceso como la reacción en la que dos o más moléculas se combinan para formar otra en la que se repiten unidades estructurales de las moléculas originales.

A raíz de este proceso surge la fotopolimerización, proceso en el que se basa la tecnología SLA. Esta es un proceso en el que un polímero en estado líquido se endurece selectivamente capa a capa mediante la polimerización activada por luz.

La resina empleada en el presente TFG es la Elegoo, Figura 3-5, una resina de curado UV, cuyo precio es de 50€ el litro. Las características de esta resina son las siguientes:

- Baja contracción y alta precisión: está diseñada para reducir la contracción de volumen durante la polimerización lo que garantiza una alta precisión del modelo.
- Curado rápido y gran estabilidad: fue diseñada para reducir el tiempo de impresión considerablemente debido a su fluidez. Además, garantiza una gran estabilidad y dureza.
- Resultados excelentes en impresoras LCD, como es el caso de la nuestra, la Creality LD002H.
- Por último y uno de sus principales es que es lavable con agua, lo que nos asegura rapidez y fluidez a la hora de las impresiones, y que en este proyecto se imprimirán un número considerable de piezas.

Los parámetros más importantes son:

- Dureza: 80-85 D.
- Viscosidad a 25°: entre 100 y 350 mPa·s.
- Densidad líquida y sólida: entre 1,05 y 1.25 g/cm³.
- Contracción volumétrica: entre un 3,72 y 4,24%.
- Resistencia a la flexión: 40-70 MPa.
- Vida útil de un año.

Además, también es importante destacar algunas de sus precauciones de seguridad:

- Agitar antes de usar.
- Conservarla a una temperatura entre 20 y 25 ° C.
- Utilizar siempre con guantes y mascarilla para evitar un contacto directo con la piel.
- Mantenerla alejada de los niños, el polvo y de su exposición directa a la luz solar.
- En caso de entrar en contacto con ella se recomienda lavar inmediatamente con abundante agua.



Figura 3-5 Resina fotocurable Elegoo

3.4 Elementos empleados en los ensayos

3.4.1 Aparato de Ensayo Universal WP 300

La máquina proporciona por el CUD para la realización de los diferentes ensayos mecánicos es el Aparato de Ensayo Universal WP 300, Figura 3-6. Este tiene una orientación académica. La alimentación de este equipo se genera mediante un sistema hidráulico manual. Para indicar las mediciones dispone de un instrumento indicador de grandes dimensiones con agujas de arrastre. El alargamiento de las piezas se registra en un reloj comparador mecánico. Con este dispositivo se pueden realizar diferentes tipos de ensayos, como ensayos de tracción, ensayos de compresión y pandeo, además de ensayos de dureza según Brinell.

El indicador de esfuerzo realizado está dividido en secciones de 0,5 KN de valor cada una, con un valor máximo de hasta 20 KN. Por otro lado, el reloj comparador mecánico, consta de dos esferas. La de mayor diámetro indica la deformación dividida en 100 unidades de 0,01 mm cada una. La menor de las esferas es la encargada de definir el número de vueltas que la aguja da a la esfera mayor, es decir, contabiliza cada milímetro. Dispone de un total de 20 divisiones, por lo que el máximo valor de alargamiento que tiene capacidad de medir es de 20mm.



Figura 3-6 Aparato de Ensayo Universal WP 300

3.4.2 Durómetro Shore-D

El instrumento empleado para los ensayos de dureza ha sido el durómetro Shore-D, Figura 3-7. Este tipo de durómetro es el utilizado para los ensayos de dureza de goma dura y otros materiales termoplásticos estables, como es el caso de la resina empleada. Está compuesto por un dispositivo de medición con cabezal y un reloj con una precisión de 0,5 unidades de dureza.



Figura 3-7 Durómetro Shore-D

3.5 Proceso de impresión

3.5.1 Definición de parámetros

Anteriormente hablamos del software Chitobox, de su forma de empleo y de los diferentes parámetros que este software nos permite variar a la hora de imprimir. En esta sección se expondrán los parámetros elegidos a variar con los valores elegidos.

Como se mencionó anteriormente los parámetros a variar han sido: la altura de capa, el tiempo de exposición, la velocidad de elevación, el anti-aliasing y por último un diseño añadiéndole un porcentaje de relleno del 100%.

Dentro de cada uno de los diferentes parámetros se han elegidos una serie de valores con los que se pretende diferenciar las propiedades de las probetas diseñadas con la idea principal de buscar el valor óptimo para cada uno de estos parámetros.

Se han diseñado un total de 9 probetas. En la primera de todas, se han establecido unos valores estándar de cada uno de estos parámetros, Figura 3-8, y a partir de esta probeta se han hecho otras 8 modificando en cada una de ellas uno de los valores de estos parámetros.



Altura capa:	0.05	mm	Bottom Lift Distance:	5	mm
Total capas inferiores:	8		Lifting Distance:	5	mm
Exposure Time:	5	s	Veloc. elevación inferior:	65	mm/min
Bottom Exposure Time:	50	s	Lifting Speed:	55	mm/min
Retardo apagado inferior:	0	s	Velocidad de retracción:	150	mm/min
Retardo apagado inferior:	0	s			
Anti-aliasing:	☒				
Nivel Gris	5	▼			
Image Blur Pixel:	☐				

Figura 3-8 Valores de los parámetros en la probeta de referencia

En las probetas 1, 2 y 3 se hace un estudio de los valores de la altura de capa, variando estos valores entre 0,05mm, 0,053mm y 0,07mm respectivamente. Lo que nos permitirá diferenciar la variación de las características mecánicas al modificar este parámetro. A medida que aumenta este valor su tiempo de impresión disminuye, por lo que es un parámetro importante para estudiar por su relación calidad-tiempo.

En las probetas 1, 4 y 5 el parámetro a analizar es el tiempo de exposición de cada una de las capas. En estas probetas hemos variado los valores entre 5s, 2s y 7s respectivamente. Lo que nos permitirá diferenciar la variación de las características mecánicas al modificar este parámetro. Es uno de los parámetros elegidos ya que a medida que aumente su valor también aumentará el tiempo de fabricación y sus cualidades mecánicas, y así poder centrarnos en los valores que más nos interesen.

En los diseños 1, 6 y 7 se han modificado los valores de la velocidad de elevación de la plataforma. Tomando como valores a estudiar 55mm/min, 45mm/min y 65mm/min respectivamente. Lo que nos permitirá diferenciar la variación de las características mecánicas al modificar este parámetro. Lo que más nos interesa de este parámetro es ver hasta qué punto podemos reducir este parámetro, ya que es uno de los que más influye en el tiempo de impresión.

En los modelos 1, 8 y 9 han probado distintos valores para el anti-aliasing. Estos valores son los de 5, 2 y 8 respectivamente. Lo que nos permitirá diferenciar la variación de las características mecánicas al modificar este parámetro. Ya que este parámetro se centra en el acabado, suavizando las curvas para que los ángulos curvos no sean tan bruscos, y puede resultar interesante ver cómo afecta la modificación de este parámetro especialmente a la dureza de los diseños,

Para terminar, se ha añadido el parámetro de relleno; a diferencia de los demás modelos, en los que no estaba incluido. El relleno se realiza con una estructura Grid3D, la única que permite el software Chitubox, y un 100% de densidad de relleno. Considerando este parámetro inicialmente como uno de los que más influye en las propiedades mecánicas se ha elegido para poder ver la diferencia que existe al introducirlo en nuestros modelos.

Inicialmente se planteó la opción de imprimir los diseños con cierto ángulo de orientación y con soportes, pero esto suponía un aumento más que considerable del tiempo, superiores a la hora por impresión, por ello se decidió probar a realizar la impresiones sin soportes y sin ángulo de orientación y ante la respuesta positiva de este método, los modelos podían despegarse sin dificultad de la plataforma de impresión, se procedió de esta manera. Esta forma de impresión supuso un ahorro considerable tanto de tiempo como de material. Además, al eliminar los soportes el acabado de la pieza no se vio afectado por estos.

De cada uno de los 10 modelos se han impreso 4 muestras, contando con un total de 40 probetas para los distintos ensayos. Estos modelos se han agrupado en grupos de tres con la finalidad de estudiar cada uno de los diferentes parámetros. Dentro de estos grupos, se han mantenido el resto de las variables con los mismos valores que la estándar para así centrarnos únicamente en los valores del parámetro de interés. En la Tabla 3-1 aparecen los valores que se han elegido para cada uno de los parámetros además del tiempo que llevó imprimir cada una de las piezas. El diseño número 10 es exactamente igual que el de la probeta 1, por lo que los valores de sus parámetros y tiempo de impresión son los mismos que para este modelo. Las impresiones se han hecho de dos en dos, ya que las dimensiones de la plataforma así lo permitían, pudiendo reducir el tiempo del trabajo de impresión a la mitad.

PARÁMETROS QUE MODIFICAR	Diseño 1	Diseño 2	Diseño 3	Diseño 4	Diseño 5	Diseño 6	Diseño 7	Diseño 8	Diseño 9	Diseño 10
Altura de capa (mm)	0.05	0.03	0.07	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Tiempo de exposición (s)	5	5	5	2	7	5	5	5	5	5
Velocidad de elevación (mm/min)	55	55	55	55	55	45	65	55	55	55
Anti-aliasing	5	5	5	5	5	5	5	2	8	5
% de relleno	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
IMPRESIONES	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
TIEMPO DE IMPRESIÓN	16m 10s	23m 01s	13m 10s	14m 10s	18m 10s	16m 58s	15m 36s	16m 10s	16m 10s	16m 10s

Tabla 3-1 Resumen de los valores de las probetas

3.5.2 Impresión 3D

La impresión es un proceso muy delicado, y en el que está basado el presente TFG. Lo más importante del proceso de impresión es lo referente a las precauciones de seguridad de la resina, mencionadas al final del punto 3.3.2.

En este punto se explicará cómo fue el proceso de impresión y todo lo que se debió tener en cuenta a la hora de su realización. Además, se siguió una checklist, Figura 3-9, para asegurarnos de que se cumplieran todos los pasos sin olvidar ninguno,

Antes de comenzar a utilizar la impresora lo primero que se hizo fue la calibración de la plataforma. El proceso consiste en aflojar los tornillos que sostienen la plataforma y bajar esta al máximo hasta la pantalla LCD. Para evitar en contacto directo con la pantalla se colocó un folio entre los dos elementos. Una vez la plataforma estuviese en la posición más baja, se apretaron los tornillos, de manera diagonal y lo más uniforme posible. Tras esto, se elevó la plataforma y quedó en posición de ser utilizada.

Lo primero de todo son las precauciones de seguridad referidas a la protección personal, como la mascarilla y los guantes para poder trabajar con la resina sin riesgo alguno. Una vez equipados es vital la limpieza de los elementos de la impresora. La cubeta tiene que estar completamente limpia, sin residuos anteriores, ya que la calidad de nuestras impresiones depende de ello, además de asegurarnos que en la pantalla LCD no queden restos de polvo ni de nada que pueda empobrecer las impresiones.

Una vez listos se comienza a depositar la resina dentro de la cubeta, con especial cuidado en que no se vierta nada fuera de esta. Una vez depositada la resina se cierra la cabina de la impresora para evitar la inhalación de esa. Una vez listo introducimos el USB con los archivos en formato ctb y lo marcamos en la pantalla táctil para comenzar con la impresión. El proceso de impresión como tal se desarrolla en un tiempo aproximado de 17 minutos, se puede ver en la Tabla 3-1.

Una vez terminada la impresión se desmonta la plataforma y se procede a su limpieza. En nuestro caso se limpió con una disolución de agua y alcohol. Una vez eliminados los restos de resina se comienza a separar las piezas de la plataforma con ayuda de una espátula. Con esto se daría por terminado el proceso de impresión.

Para terminar y poder guardar la impresora se procede a una limpieza en profundidad. Se limpia tanto la plataforma, cubeta y la pantalla LCD, tras su limpieza se procedió a darle una última pasada con una gamuza para evitar la presencia de cualquier tipo de restos. Antes de poner la cubeta otra vez en su sitio se colocó un trozo de papel entre esta y la pantalla para mayor protección de esta última. Una vez limpiado y montado todo se retiran los guantes y mascarillas y se puede guardar.

ENCENDIDO	GUARDADO
PROTECCIÓN	PLATAFORMA
GUANTES PONER	RESINA LIMPIAR
MASCARILLA PONER	IMPRESORA MONTAR
CUBETA	CUBETA
RESIDUOS LIMPIAR	RESINA VACIAR
RESINA LLENAR	RESINA LIMPIAR
CABINA CERRAR	IMPRESORA
USB CONECTAR	LED PROTEGER
	PLATAFORMA MONTAR
	CUBETA MONTAR
EXTRACCIÓN	PROTECCIÓN
PLATAFORMA DESMONTADA	GUANTES QUITAR
PIEZA	MASCARILLA QUITAR
RESINA LIMPIAR	

Figura 3-9 Checklist proceso de impresión

3.6 Ensayos

3.6.1 Ensayos de tracción

Para los ensayos de tracción se diseñó una probeta basada en la normativa americana de los ensayos de tracción la ASTM638. Al diseño original de la probeta, se le han añadido unos agarres con la intención de adaptarla a la máquina que el CUD nos proporciona para los ensayos. Dentro de la propia normativa aparecen diferentes modelos con distintas dimensiones, en el presente TFG hemos utilizado el tipo 1.

Dado a que las dimensiones que nos exige la normativa no podían cumplirse, debido a que la plataforma de impresión tiene unas dimensiones menores, se procedió a reducir el modelo de manera proporcional en todas sus partes para poder ejecutar su impresión. Finalmente, las dimensiones de la probeta de nuestros ensayos resultarían un 75% de las dimensiones que la normativa exige, como se puede ver en la Figura 3-10, manteniendo la proporcionalidad en sus partes [14].

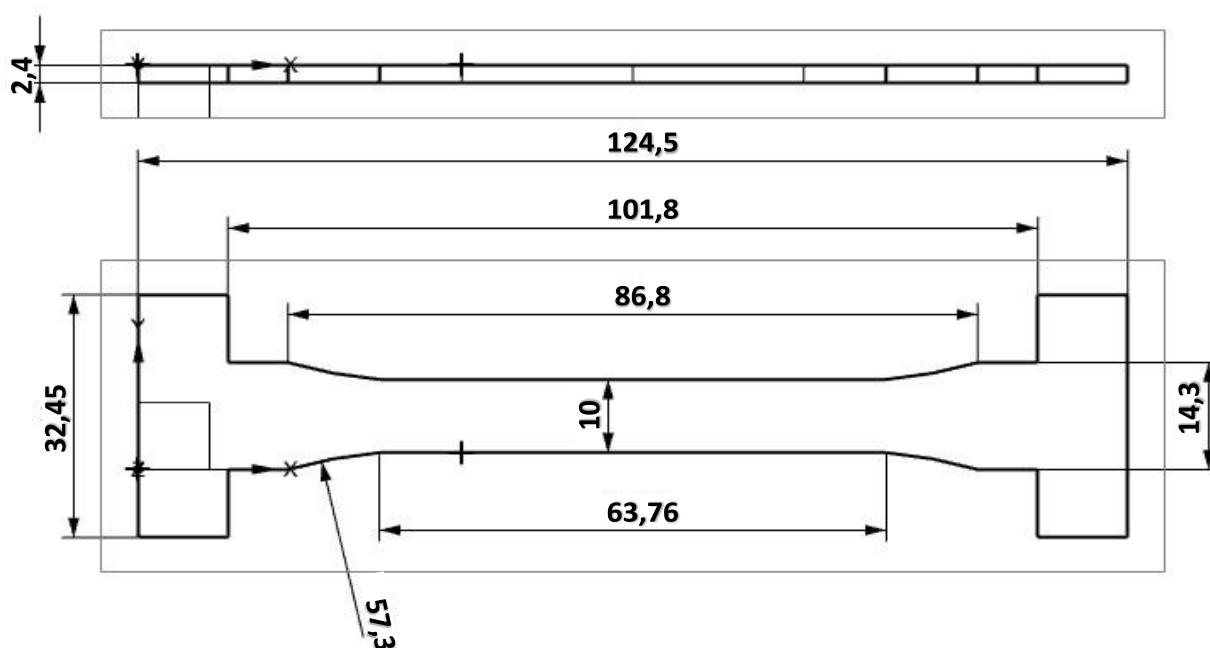


Figura 3-10 Dimensiones probeta para ensayos

El objetivo final de los ensayos de tracción es la obtención de las gráficas de deformación y a partir de ellas obtener los datos de tensión de fluencia, tensión de rotura y el módulo de Young. Con las probetas diseñadas y ya impresas se procedió a realizar una serie de pruebas para comprobar su viabilidad para los ensayos de tracción. Durante estos ensayos nos encontramos con una serie de impedimentos:

- En los primeros ensayos, las probetas rompían por la zona de los agarres, Figura 3-11, esto se debe a que los agarres forman un ángulo de 90° con la probeta y se concentra gran parte del esfuerzo generado en esta zona Figura 3-12, rompiendo por ahí antes que por la zona deseada que es el medio de la sección más delgada.



Figura 3-11 Primeros problemas de diseño

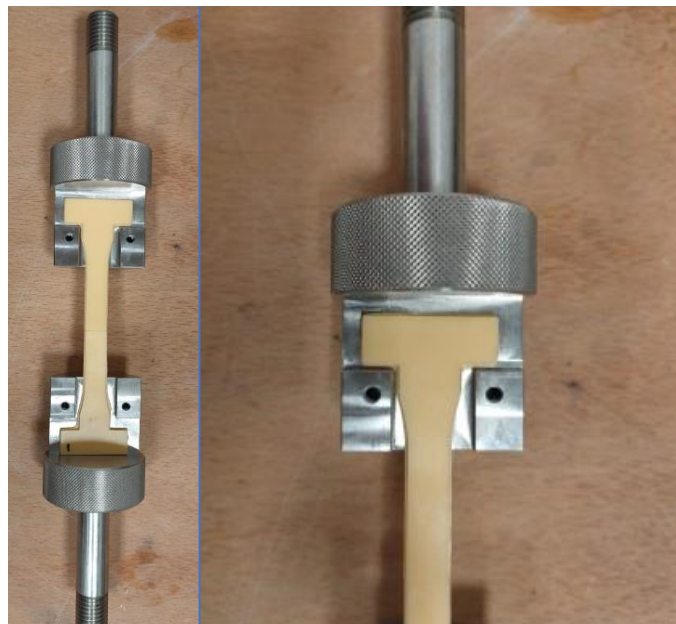


Figura 3-12 Montaje de los ensayos de tracción y zona donde se sufren los esfuerzos

- Se buscó un nuevo diseño, manteniendo las dimensiones de la probeta, pero aumentando el tamaño de los agarres ajustándolos a la máquina de la que disponemos para los ensayos. Con este nuevo modelo los problemas surgieron en la impresión, debido a la gran diferencia de superficie entre los agarres y la probeta el proceso de separación de la pieza de la plataforma se complicó. El proceso de impresión duraba el doble de tiempo, ya que con las nuevas dimensiones solos se podían imprimir individualmente y no de dos en dos como con el modelo principal. Además, durante la separación las probetas se rompían al finalizar los agarres, por ello se descartó este modelo. Los fallos se pueden observar en la Figura 3-13.

- Se probó un tercer diseño con las mismas dimensiones que el anterior, pero añadiéndole soportes en la impresión, lo que implicaba un aumento más que considerable en el tiempo debido a que al añadir soportes aumenta la cantidad de capas unido a un tiempo de impresión mayor que el doble del anterior. Además, estos soportes no eran capaces de despegar las capas de la cubeta después de su exposición a la luz UV, quedando los soportes adheridos a la plataforma y la probeta en la cubeta. Debido a esto y a la gran cantidad de tiempo que habría que invertir en su correcta impresión también se descartó esta posible solución Figura 3-13.



Figura 3-13 Fallos en la impresión de los nuevos diseños

Finalmente, se decidió aprovechar las probetas impresas inicialmente y someterlas a ensayos de pandeo y de dureza. Pudiendo obtener de estos ensayos valores para el módulo elástico de Young (E), a partir de los ensayos de pandeo, y la tensión de rotura con los ensayos de dureza.

3.6.2 Ensayos de pandeo

Tras la elección final por el ensayo de pandeo se comenzó su preparación. Inicialmente se disponía de 4 probetas por modelo, es decir un total de 40 probetas. Se utilizaron 3 probetas de cada uno de los modelos para realizar los ensayos, sumando un total de 30 ensayos. Los ensayos de pandeo se han intentado realizar de la manera más parecida posible a lo que la normativa nos indica.

La normativa de los ensayos de compresión es la ASTM D695-15 [15]. El modelo empleado no sigue las dimensiones que la normativa nos indica ya que se han utilizado las probetas que inicialmente diseñamos para el ensayo de pandeo. Además, al utilizar una máquina manual hidráulica y utilizar unas probetas que rompen por pandeo se ha procurado aplicar una velocidad constante de 4mm/min durante todos los ensayos en lugar de los 1,3mm/min que nos recomienda la normativa.

Los ensayos se han realizado inicialmente deformando en décimas de milímetros, anotando los valores de la fuerza necesaria para alcanzar esos valores, hasta llegar a los 1,2mm de deformación. A partir de este punto, los valores de fuerza se han ido tomando cada 2 décimas de milímetro hasta alcanzar la rotura de probeta por pandeo.

Durante los ensayos se ha podido diferenciar con bastante claridad los momentos en que comenzaba el pandeo y los momentos de rotura, Figura 3-14. De cada uno de los ensayos se ha elaborado una gráfica Tensión-Deformación para extraer los valores de la tensión crítica de pandeo y con ellos obtener el valor del módulo de Young (E), consiguiendo así este valor sin necesidad de realizar los ensayos a tracción.



Figura 3-14 Momentos de pandeo y rotura de los ensayos

3.6.3 Ensayos de dureza

Para los ensayos de dureza se ha seguido lo indicado en la norma ASTM D2240-15 [16].

Como se explicó en el punto 3.4.2 el durómetro Shore-D fue el empleado para estos ensayos. Inicialmente se utilizó un durómetro Shore-A, pero el valor que obteníamos era el máximo que este nos permite, así que por ello decidimos pasar a utilizar el Shore-D.

Los ensayos de dureza se realizaron en distintos puntos de la probeta como se indica en la Figura 3-15: una medición en el centro, una en el cambio de sección de ambos lados y otra en cada uno de los agarres. Este proceso se repite en ambas caras de cada una de las probetas restantes tras los ensayos de pandeo. Así, se puede estar una dureza media de cada una de las probetas.

Tras la obtención de los valores de dureza de cada uno de los modelos se utilizará este dato para estimar un valor de tensión crítica, el cual se obtendrá por medio de los ensayos de tracción.



Figura 3-15 Probeta utilizada en los ensayos de dureza

3.7 Cronograma

En esta sección se realizará un análisis del cronograma y una justificación de los cambios que ha ido sufriendo el cronograma inicial, Figura 3-16, a lo largo del desarrollo del presente TFG.

TAREA	ene-18	ene-25	feb-01	feb-08	feb-15	feb-22	mar-01	mar-08	mar-15	mar-22
Introducción										
contexto + motivación + objetivos										
Estado del Arte										
fabricación aditiva										
aplicación armada										
tecnologías (FDM, SLA, etc)										
DIC (digital image correlation)										
Metodología										
material (probeta, impresora, etc)										
parámetros optimizar SLA										
slicer piezas										
ensayos tracción										
ensayos dureza										
Resultados										
tiempos										
pesos										
costes										
propiedades mecánicas										
Conclusiones y Líneas Futuras										
Conclusiones										
Líneas Futuras										
Forma										
Formato										
Bibliografía										
Resumen										
Presentación										
Diapositivas										
Ensayos										

Figura 3-16 Cronograma inicial

Durante la realización del trabajo se ha tenido que modificar el cronograma, teniendo que retrasar las pruebas de laboratorio debido al COVID-19. Este retraso de las fechas de laboratorio ha reducido la capacidad de reacción ante los diferentes problemas que se han tenido que afrontar durante los últimos meses. La modificación del nuevo cronograma, Figura 3-17, se centró en adelantar los trabajos de escritura y diseño aprovechando el confinamiento dejando los ensayos para el final, algo que acorta el tiempo de reacción ante las dificultades de diseño durante los ensayos.

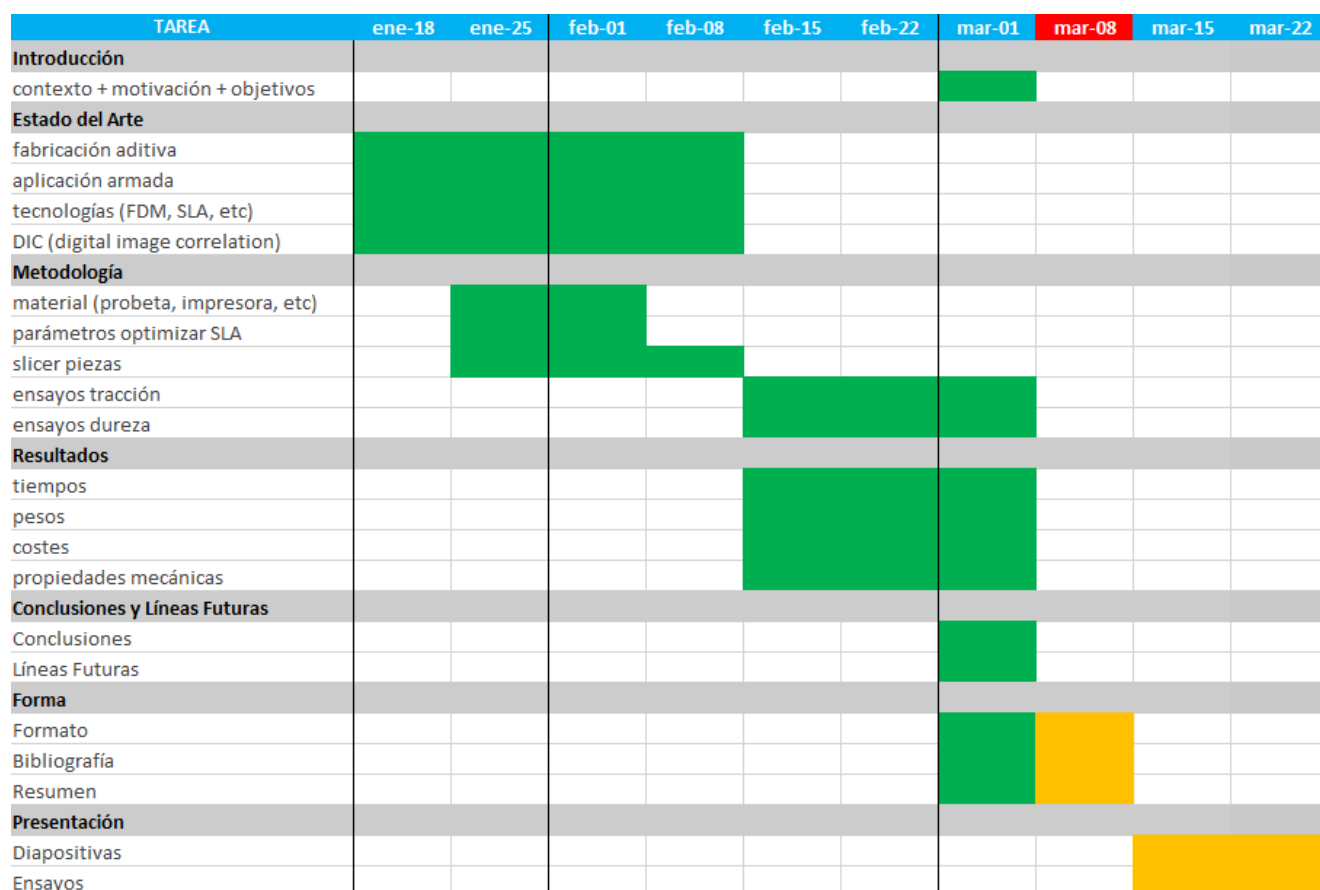


Figura 3-17 Versión final del cronograma

Con el nuevo y último cronograma se puede observar que a pesar de los problemas que han ido surgiendo durante estos meses y al apurado plazo que se ha tenido para el trabajo de laboratorio, se ha podido cumplir con las fechas que establecidas. La clave ha estado en utilizar el periodo de confinamiento por COVID-19 para realizar los trabajos de documentación, diseño y escritura para en las últimas semanas poder centrarnos en el trabajo de laboratorio sin tener que ocupar excesivamente el tiempo en otros asuntos. La continua actualización del cronograma ha sido vital a la hora de distribuir el trabajo durante estos meses y de fijar objetivos a corto plazo para la consecución del presente TFG.

4 RESULTADOS

En este apartado se expondrán los resultados correspondientes a la impresión de los modelos y a los distintos ensayos. Dentro de cada ensayo se hará un análisis de los valores obtenidos agrupados según los parámetros de impresión que decidimos modificar. Primero analizaremos los resultados de las probetas con las distintas alturas de capa. En segundo lugar, se expondrán los resultados obtenidos de los ensayos realizados con las probetas con los distintos tiempos de exposición. A continuación, se procederá al análisis de los resultados con las probetas en las que se modificó la velocidad de elevación. Por último, se hará un análisis de los resultados de los modelos en los que se modificó el anti-aliasing.

4.1 Tiempos de impresión

En este apartado se mostrarán los tiempos que se han empleado en la impresión de los distintos modelos mediante unas gráficas comparativas en función de los parámetros: altura de capa Figura 4-1, tiempo de exposición Figura 4-2, velocidad de elevación Figura 4-3 y anti-aliasing Figura 4-4.

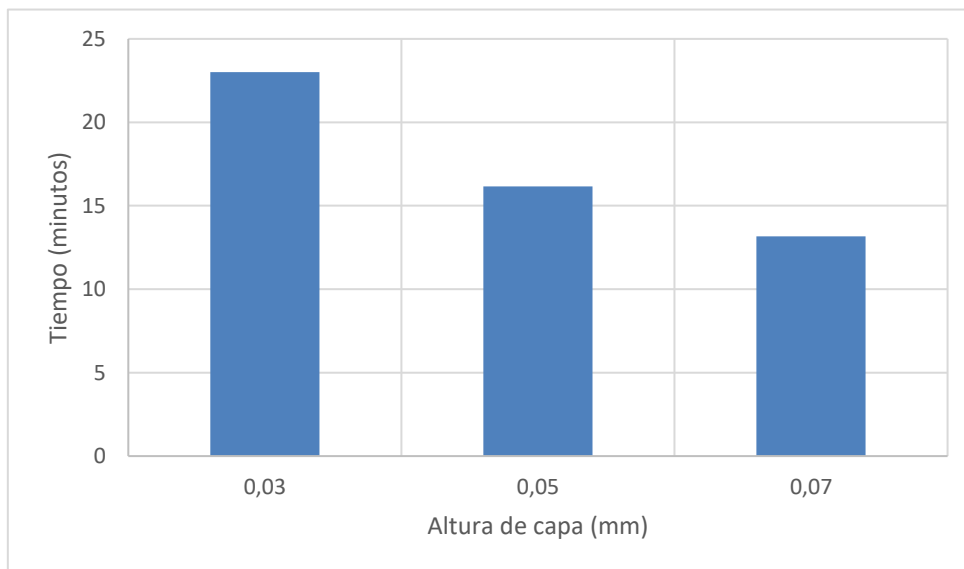


Figura 4-1 Tiempo de impresión según la altura de capa

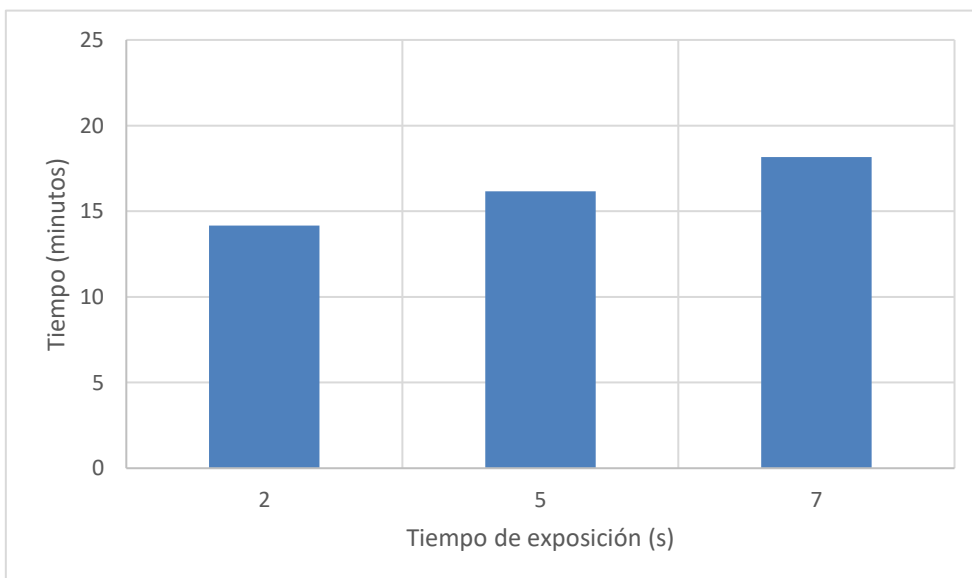


Figura 4-2 Tiempo de impresión según el tiempo de exposición

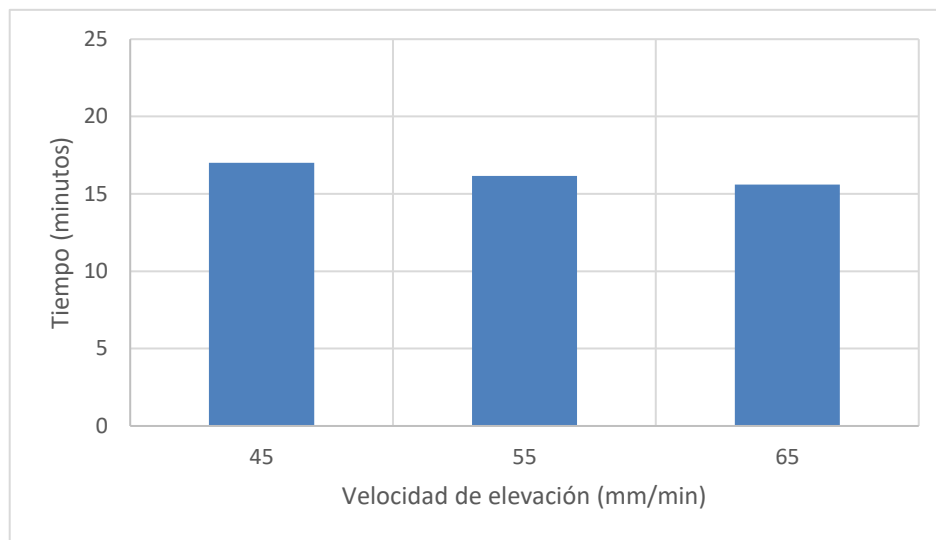


Figura 4-3 Tiempo de impresión según la velocidad de elevación.

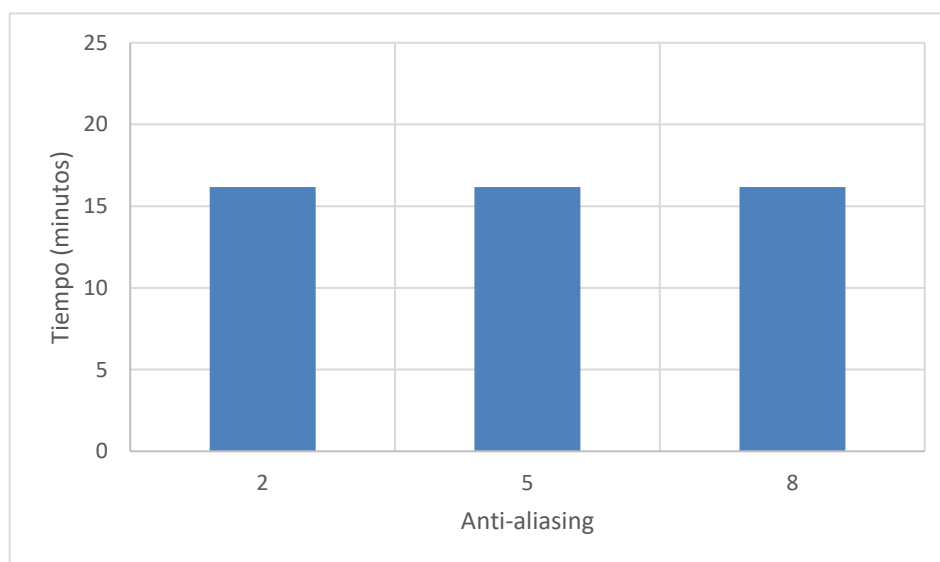


Figura 4-4 Tiempo de impresión según el anti-aliasing.

Además, se ha elaborado una gráfica, Figura 4-5, en la que se puede observar el coste eléctrico que conlleva la impresión de cada uno de los modelos. En estos diseños apenas tiene relevancia, pero otros de mayores magnitudes y que si requieran un tiempo de impresión considerablemente superior sí que debería tenerse en cuenta, ya que los costes podrían dispararse en caso de utilizar unos valores que requieran altos tiempos de fabricación.

Los cálculos se han realizado con la siguiente fórmula:

$$\text{Coste pieza} = P \text{ nominal (kW)} * T \text{ impresión (horas)} * \text{Coste}$$

- La potencia nominal de la impresora es de 72W.
- El coste habitual es de 0,12€/kW.h.

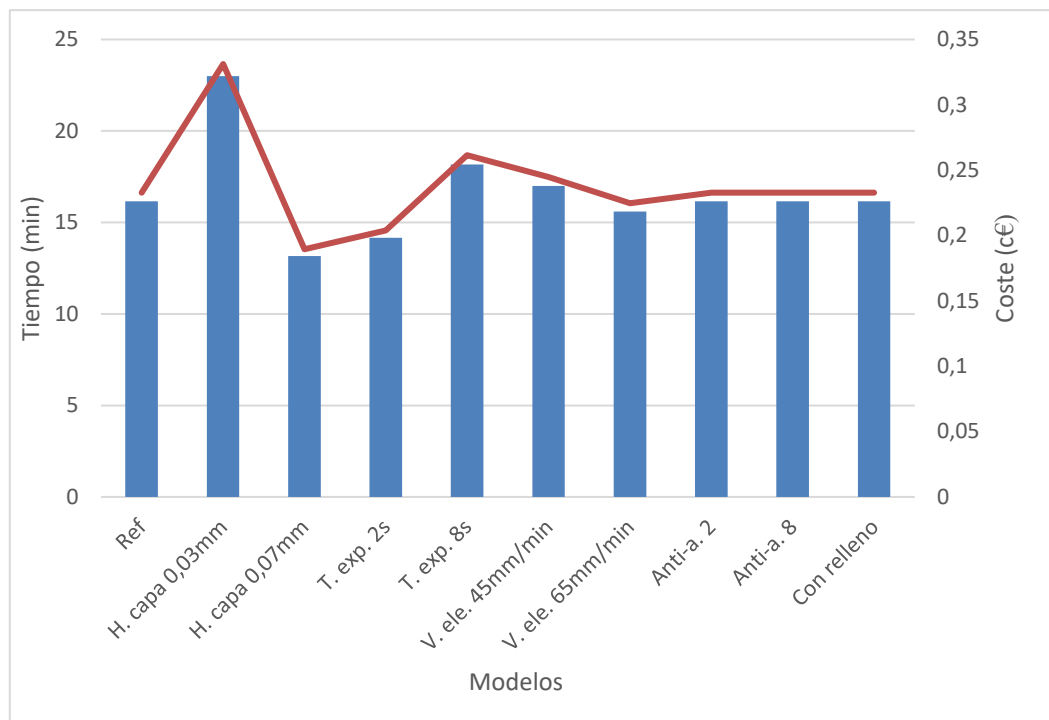


Figura 4-5 Gráfica Tiempo de impresión-Coste para cada uno de los modelos

4.2 Ensayos de pandeo

Se seguirá el siguiente procedimiento: primero se expondrán los datos extraídos de los ensayos. A continuación, el procedimiento y los cálculos realizados para obtener el valor del módulo elástico de Young (E). Por último, se hará una comparativa de los resultados obtenidos.

Cabe destacar que durante la realización de los ensayos todas las probetas han sufrido una rotura frágil en la zona central en su mayoría, y en algún caso se produjo la rotura por pandeo en la zona los empotramientos.

Como se dijo en el apartado 3.6.2 el fin de estos ensayos va a ser la obtención del módulo de Young a través del valor de tensión crítica extraído de los ensayos. Primero se expondrán los datos obtenidos de los ensayos y después los cálculos realizados. Para los distintos cálculos se ha seguido el procedimiento que define Russell C. Hibbeler en su libro *Mecánica de Materiales* [17].

Los valores empleados en los distintos modelos pueden consultarse en la Figura 3-9.

4.2.1 Modificación de la altura de capa

Las probetas empleadas en el estudio de este parámetro fueron las 1, 2 y 3. Tras los datos obtenidos en los ensayos se ha elaborado una gráfica que resume los ensayos. En la primera probeta se analizará con detalle y numéricamente el proceso seguido para la obtención de los datos. Para el resto de los diseños solo se expondrán los resultados, ya que el proceso a seguir es el mismo para todas.

a) Probeta 1 de referencia (altura de capa = 0,05mm).

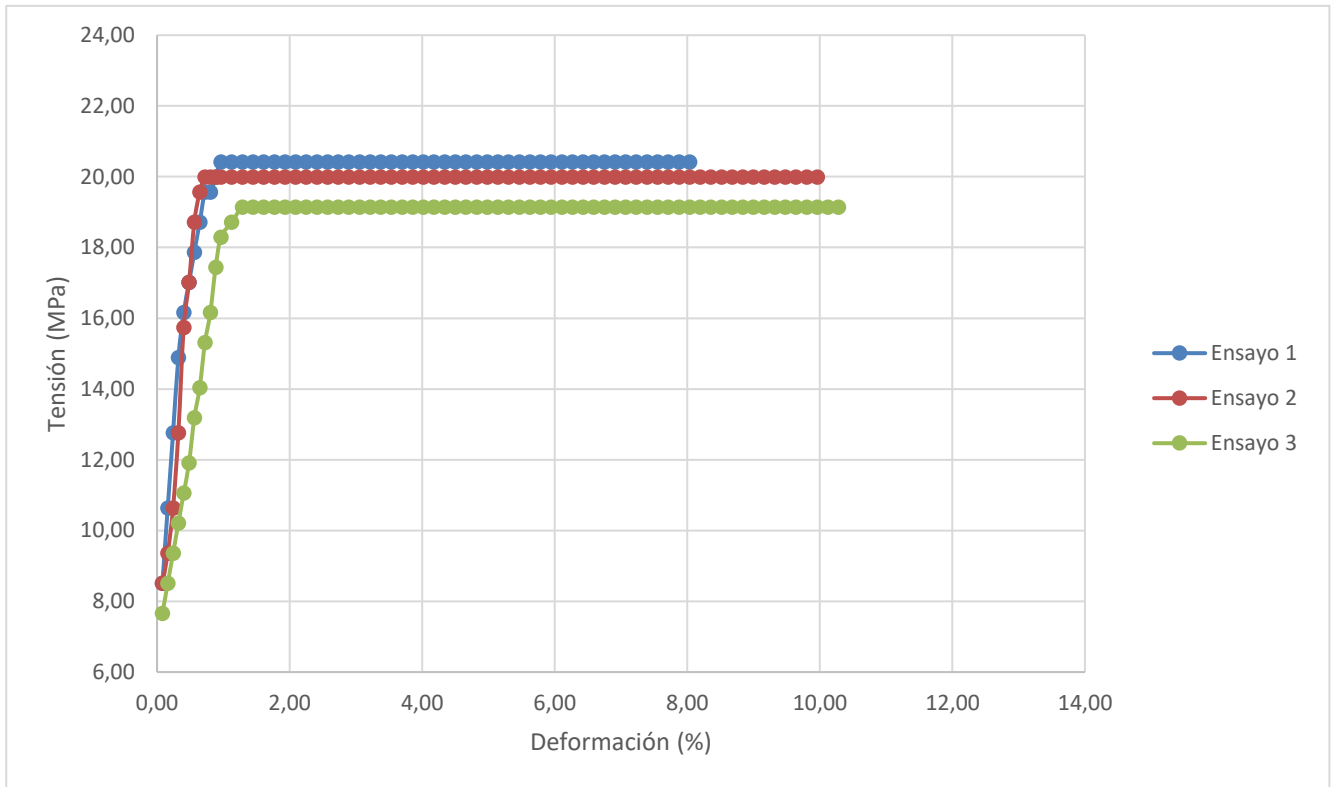


Figura 4-6 Gráfica Tensión-Deformación de los ensayos con la Probeta 1

En la Figura 4-6 Gráfica Tensión-Deformación de los ensayos con la Probeta 1 se puede apreciar como las curvas comienzan a aumentar de una forma continua hasta alcanzar un punto (tensión crítica de pandeo), en el que se observa que la pieza comienza a pandear y la curva a aplanarse hasta alcanzar un valor a partir del cual no es necesaria una mayor tensión para continuar con la deformación. Para el cálculo de las tensiones se han utilizado los valores de fuerza durante los ensayos con la siguiente fórmula:

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

Utilizando como área de la sección: $A = 2,4\text{mm (grosor)} * 9,8\text{mm (ancho de la zona central de rotura)}$.

Una vez realizadas las curvas, extraemos el valor de tensión crítica de pandeo de cada uno de los ensayos y aplicamos la fórmula de Euler para obtener el valor del módulo de Young.

$$F_{cr} = \frac{\pi^2 * E * I}{(K * L)^2}$$

Tomando como valores:

- $F_{cr} = 350\text{N}$, 370N y 380N para los ensayos 1, 2 y 3 respectivamente.
- $K = 0,5$ ya que se trata de un doble empotramiento.
- $L = 0,051\text{m}$ de distancia entre empotramientos.
- $I = 1,129 * 10^{-11} \text{ m}^4$. Obtenido de la fórmula del momento de inercia de un rectángulo:

$$I = \frac{b * h^3}{12}$$

Utilizando los siguientes valores:

- $b = 0,0098\text{m}$.
- $h = 0,0024\text{m}$.

A partir de los cálculos anteriores se obtienen tres valores de módulo de Young, uno por cada ensayo:

- E ensayo 1 = 2,042538 GPa.
- E ensayo 2 = 2,159254 GPa.
- E ensayo 3 = 2,217612 GPa.

Por lo tanto, para estimar un valor asociado a esta probeta se ha hecho la media de los tres valores obtenidos en los ensayos, por lo que el valor asociado al diseño número 1 es:

E probeta 1 = 2,139802 GPa.

b) Probeta 2 (altura de capa = 0,03mm)

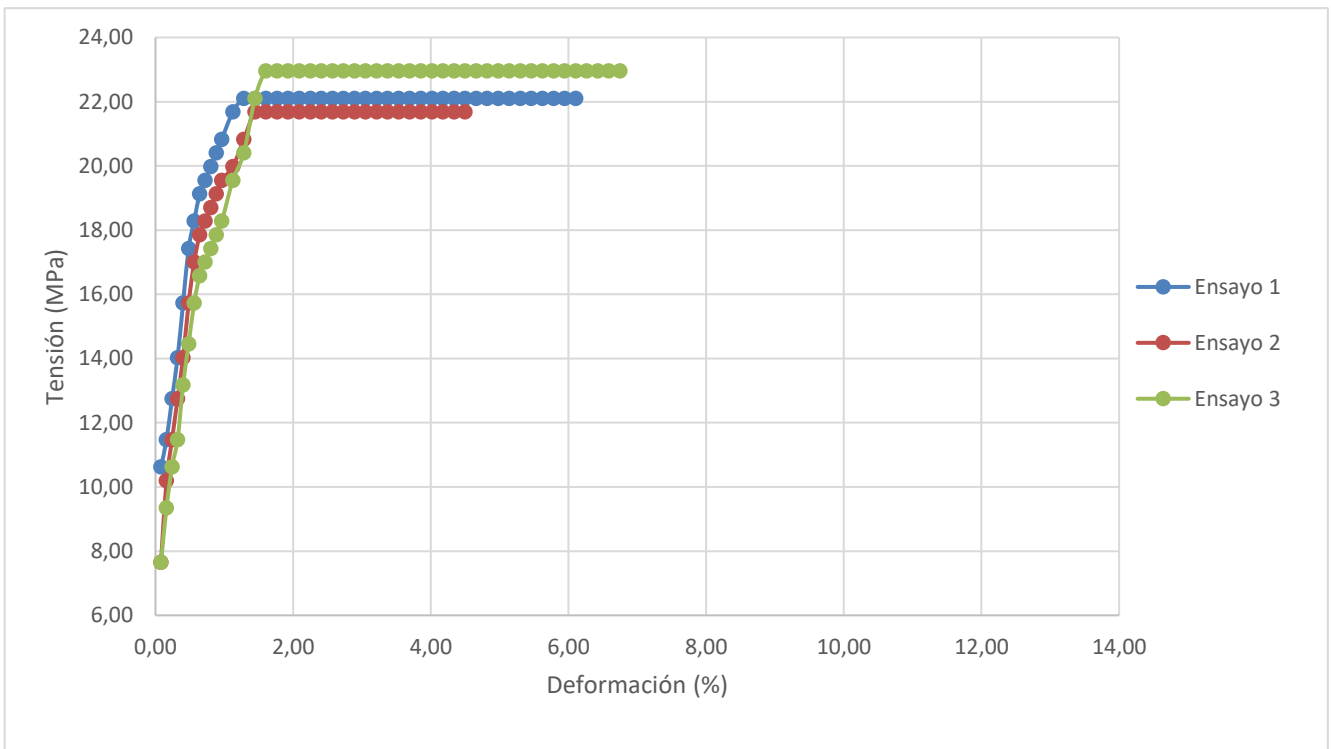


Figura 4-7 Gráfica Tensión-Deformación de los ensayos con la Probeta 2

c) Probeta 3 (altura de capa = 0,07mm).

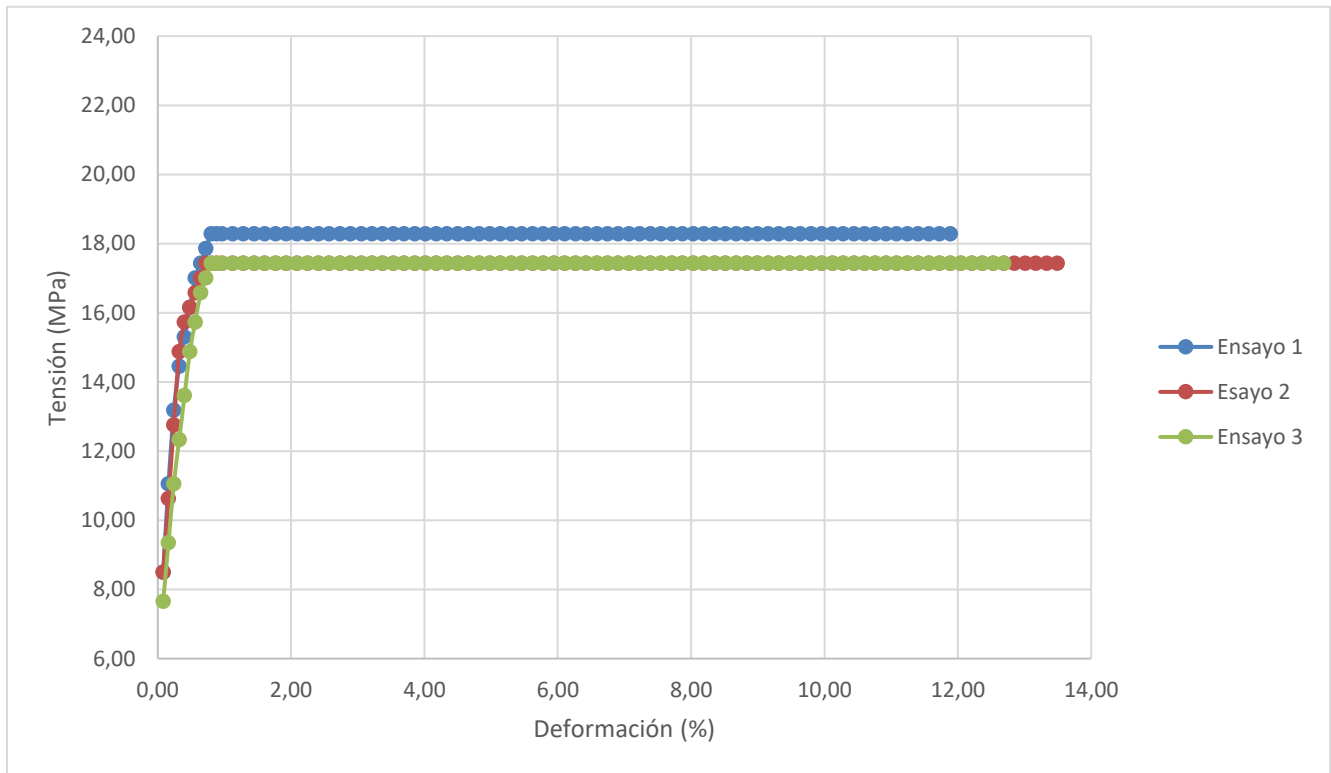


Figura 4-8 Gráfica Tensión-Deformación de los ensayos con la Probeta 3

En las Figura 4-7 y Figura 4-8 se pueden observar las gráficas Tensión-Deformación referentes a los ensayos con las probetas 2 y 3 y en la Figura 4-9 se puede ver la comparación de los tres valores obtenidos de módulo elástico E.

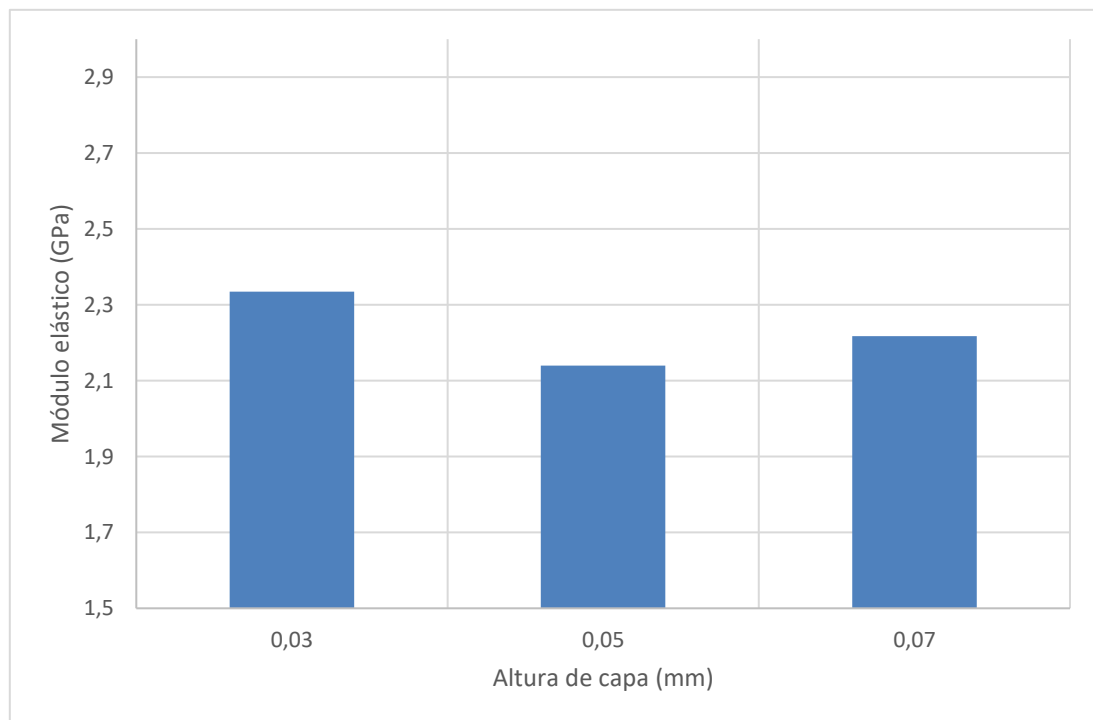


Figura 4-9 Gráfico comparativo del Módulo Elástico según la altura de capa

4.2.2 Modificación de tiempo de exposición

a) Probeta 4 (tiempo de exposición = 2s)

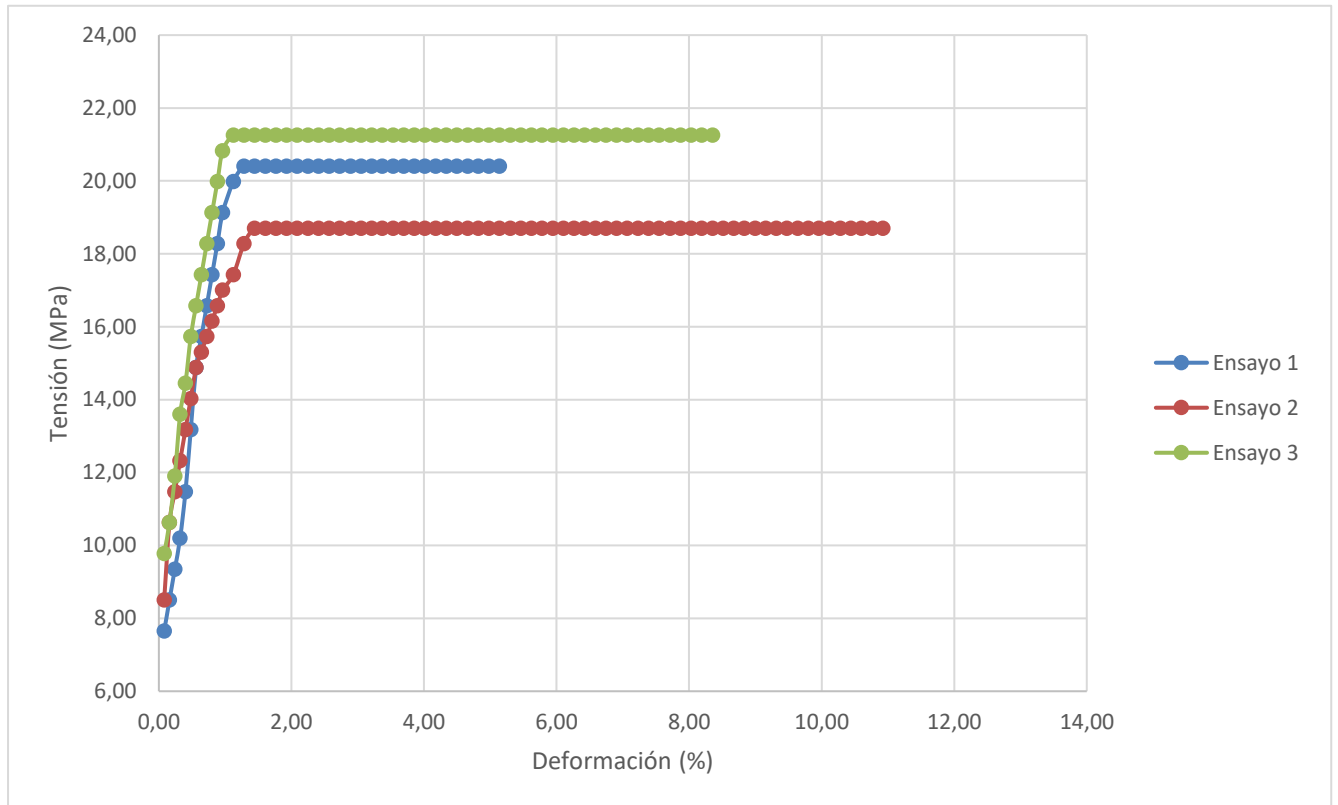


Figura 4-10 Gráfica Tensión-Deformación de los ensayos con la Probeta 4

b) Probeta 5 (tiempo de exposición = 8s)

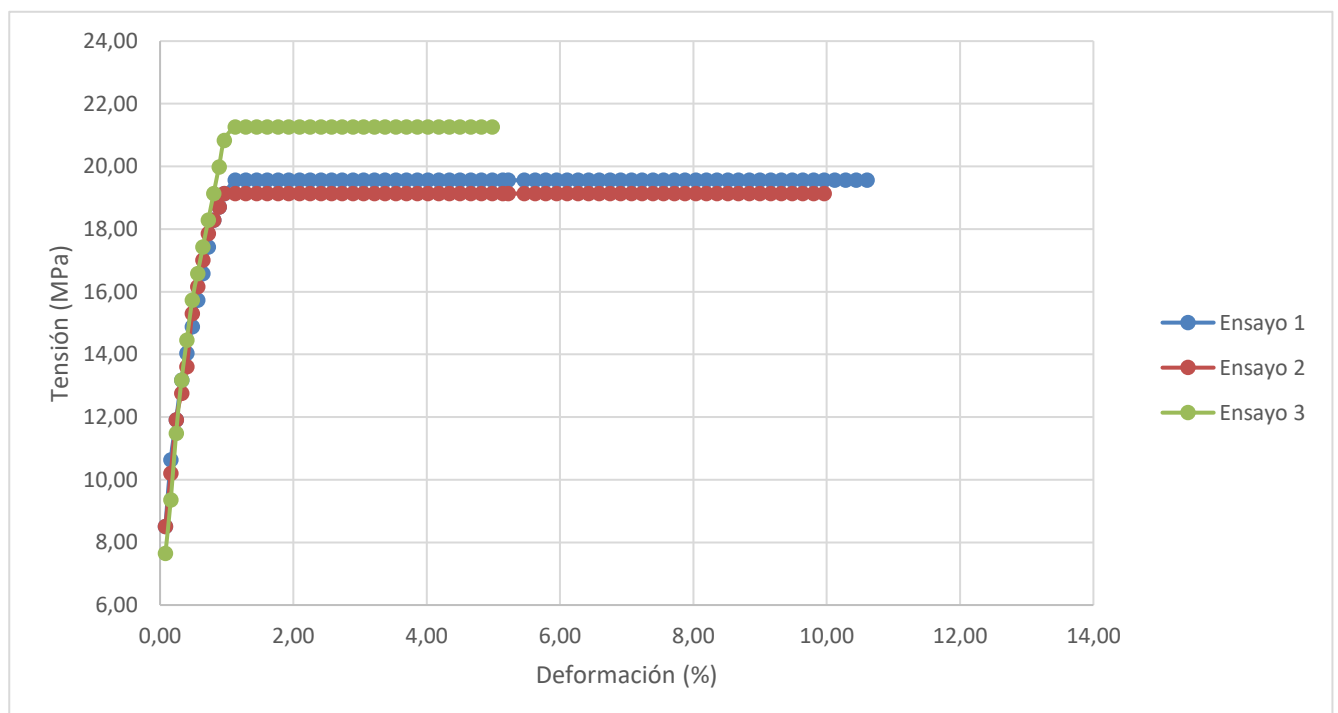


Figura 4-11 Gráfica Tensión-Deformación de los ensayos con la Probeta 5

En las Figura 4-10 y Figura 4-11 se pueden observar las gráficas Tensión-Deformación referentes a los ensayos con las probetas 4 y 5 y en la Figura 4-12 se puede ver la comparación de los tres valores obtenidos de módulo elástico E.

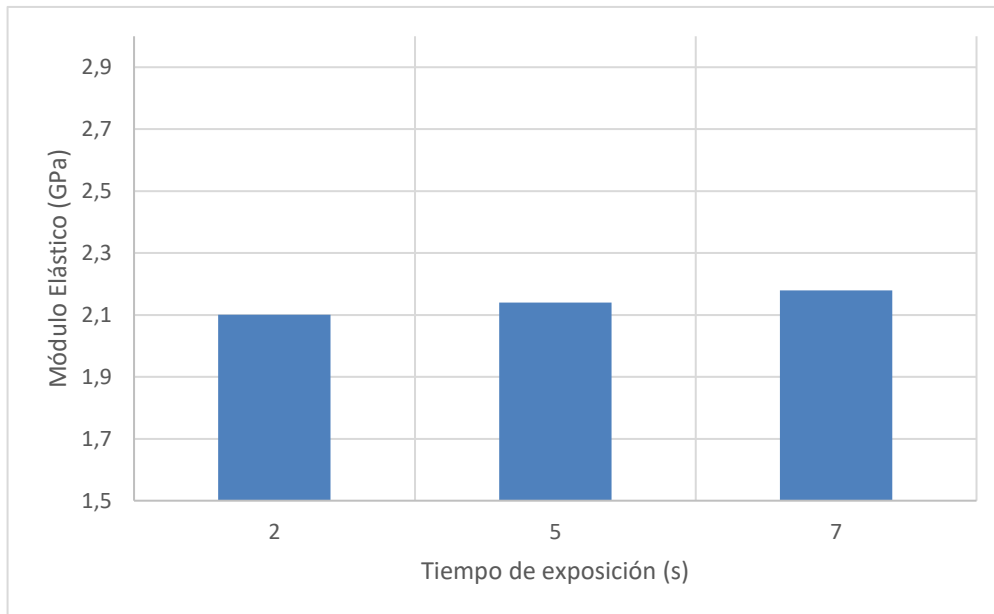


Figura 4-12 Gráfico comparativo de los módulos elásticos según el tiempo de exposición

4.2.3 Modificación de la velocidad de elevación

a) Probeta 6 (velocidad de elevación = 45mm/min).

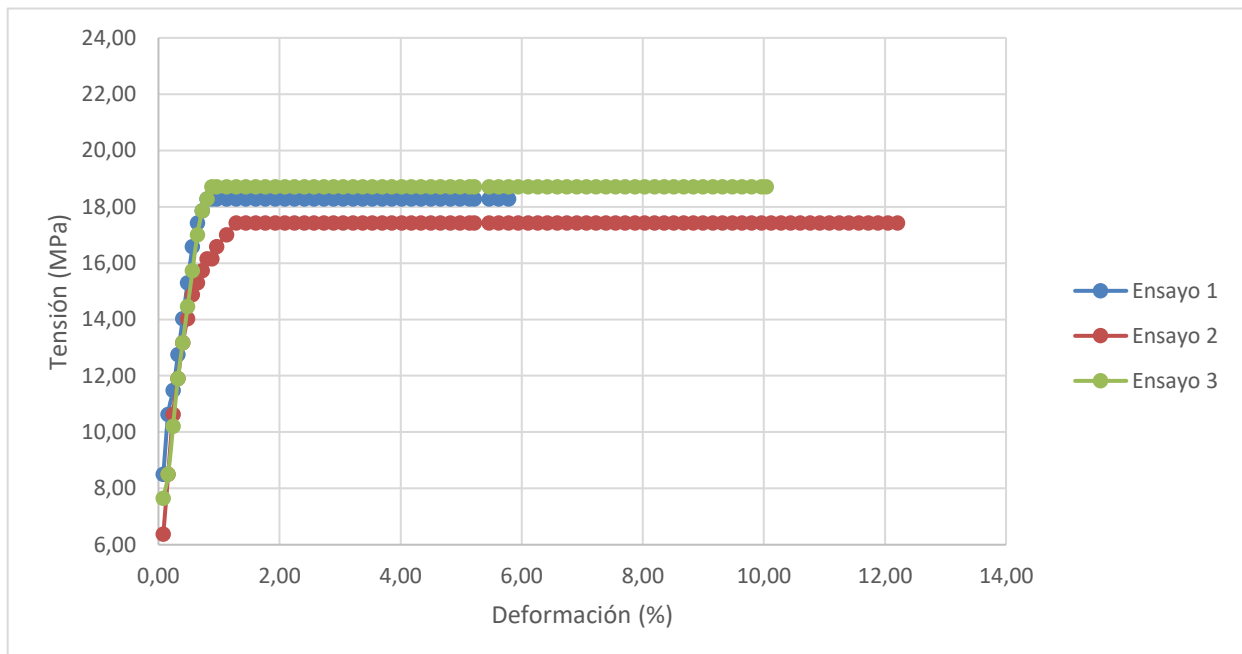
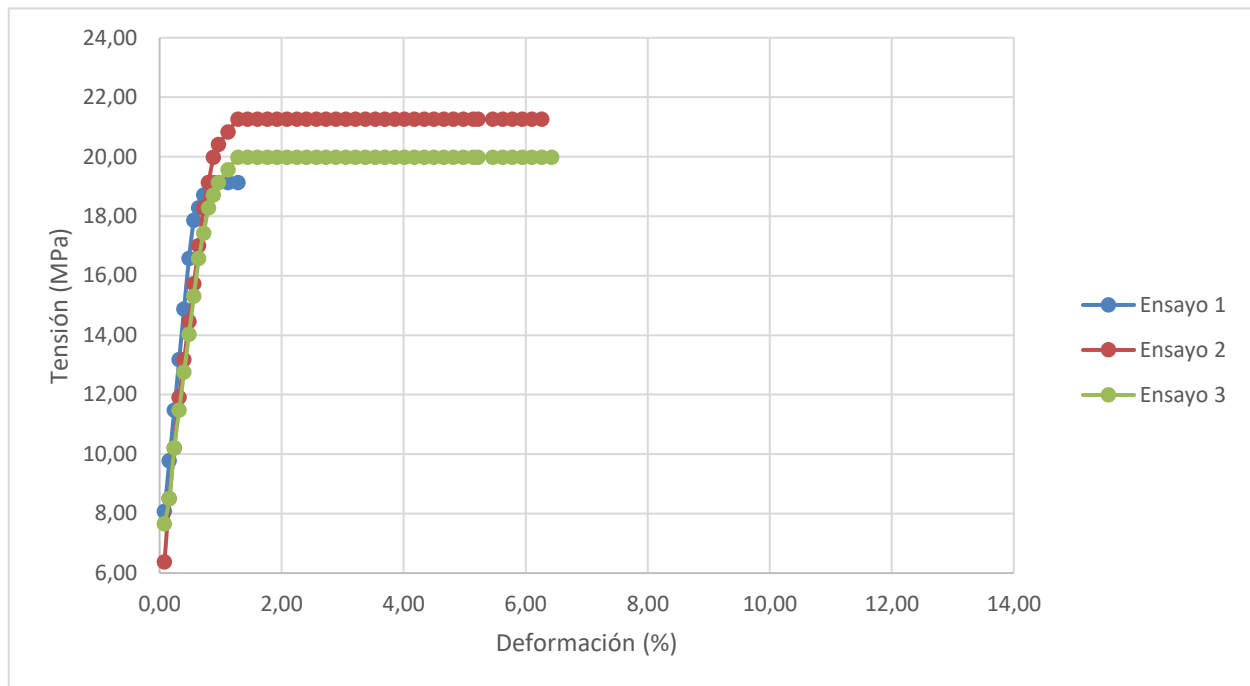
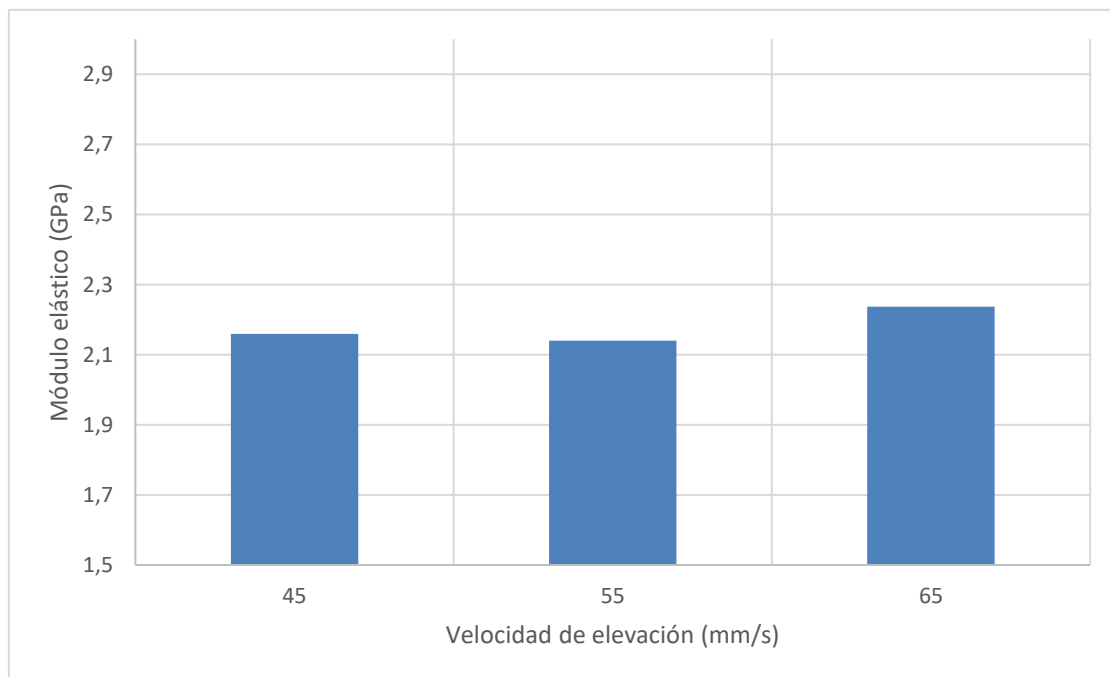


Figura 4-13 Gráfica Tensión-Deformación de ensayos con la Probeta 6

b) Probeta 7 (velocidad de elevación = 65mm/min).**Figura 4-14 Gráfica Tensión-Deformación de ensayos con la Probeta 7**

En las Figura 4-13 Figura 4-14 se pueden observar las gráficas Tensión-Deformación referentes a las probetas 6 y 7 y en la Figura 4-15 se puede ver la comparación de los tres valores obtenidos de módulo elástico E.

**Figura 4-15 Gráfico comparativo de los módulos elásticos según la velocidad de elevación**

4.2.4 Modificación del anti-aliasing

a) Probeta 8 (anti-aliasing = 2).

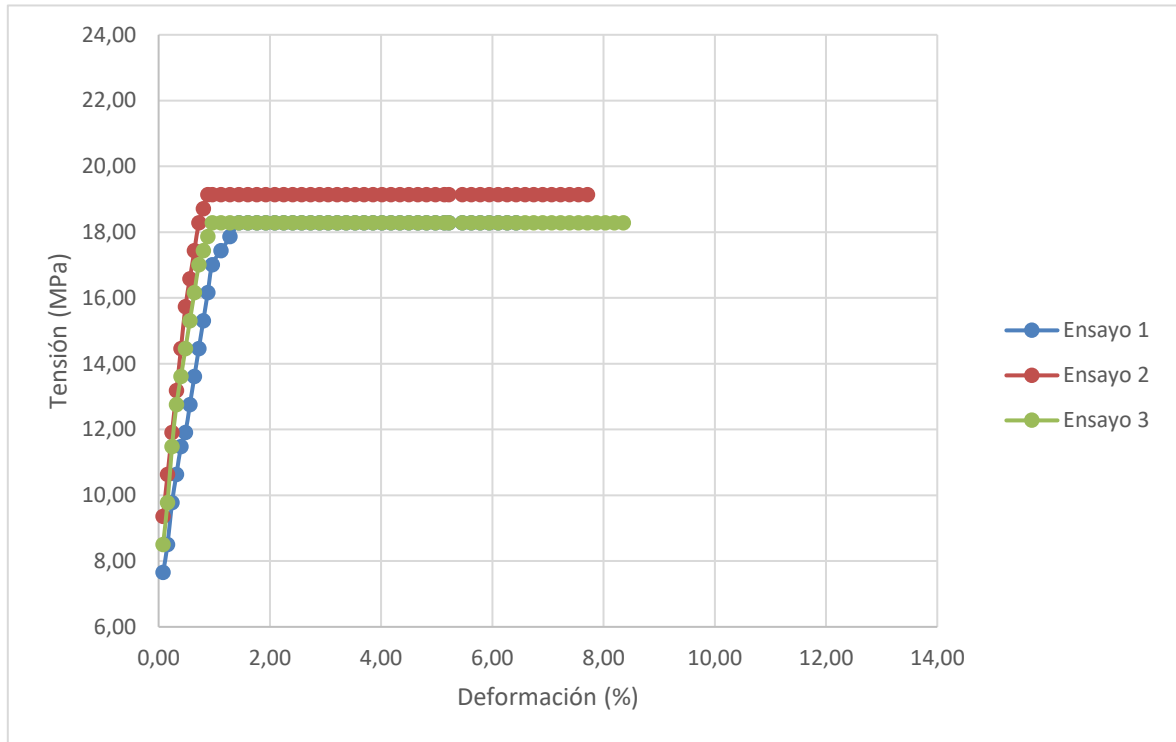


Figura 4-16 Gráfica Tensión-Deformación de ensayos con la Probeta 8

b) Probeta 9 (anti-aliasing = 8).

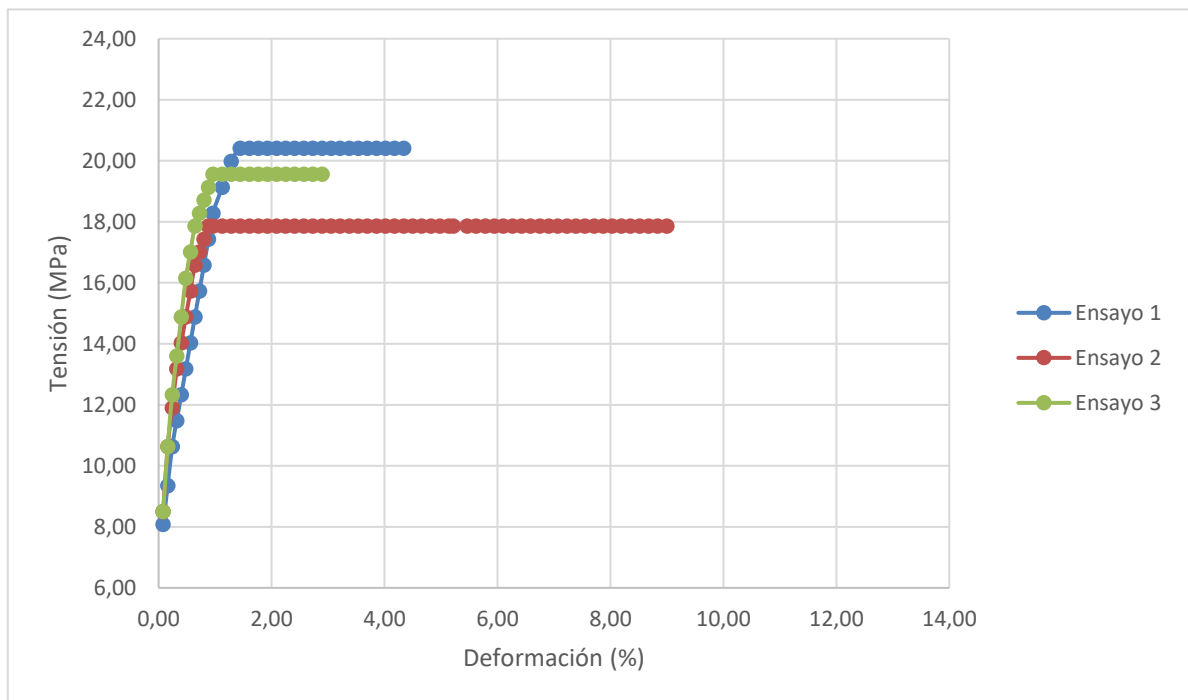


Figura 4-17 Gráfica Tensión-Deformación de ensayos con la Probeta 9

En las Figura 4-16 Figura 4-17 se pueden observar las gráficas Tensión-Deformación referentes a los ensayos con las probetas 8 y 9 y en la Figura 4-18 se puede ver la comparación de los tres valores obtenidos de módulo elástico E.

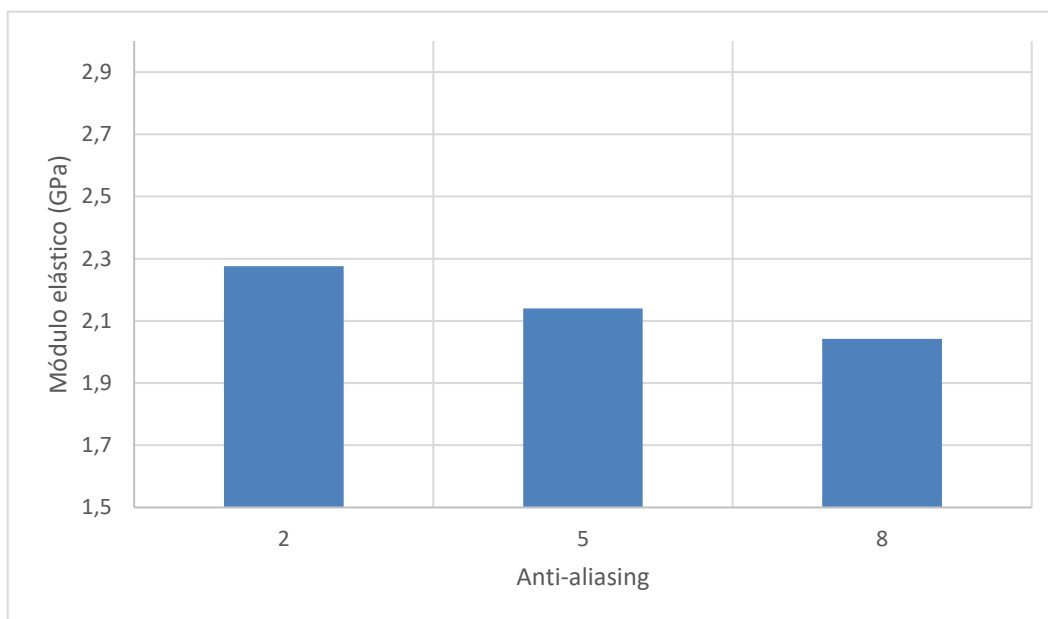


Figura 4-18 Gráfico comparativo de los módulos elásticos según el anti-aliasing

4.2.5 Incorporación del relleno

En la Figura 4-19 se puede observar la gráfica tensión deformación a partir de la cual se han obtenido los valores para calcular el módulo elástico que se puede ver comparado con el del primer diseño en la Figura 4-20 se puede observar la comparación del décimo y último diseño, en el que se han utilizado los mismos valores que en el modelo de referencia, con el modelo de referencia. Así se podrá comprobar la diferencia de módulos elásticos al implementar este parámetro.

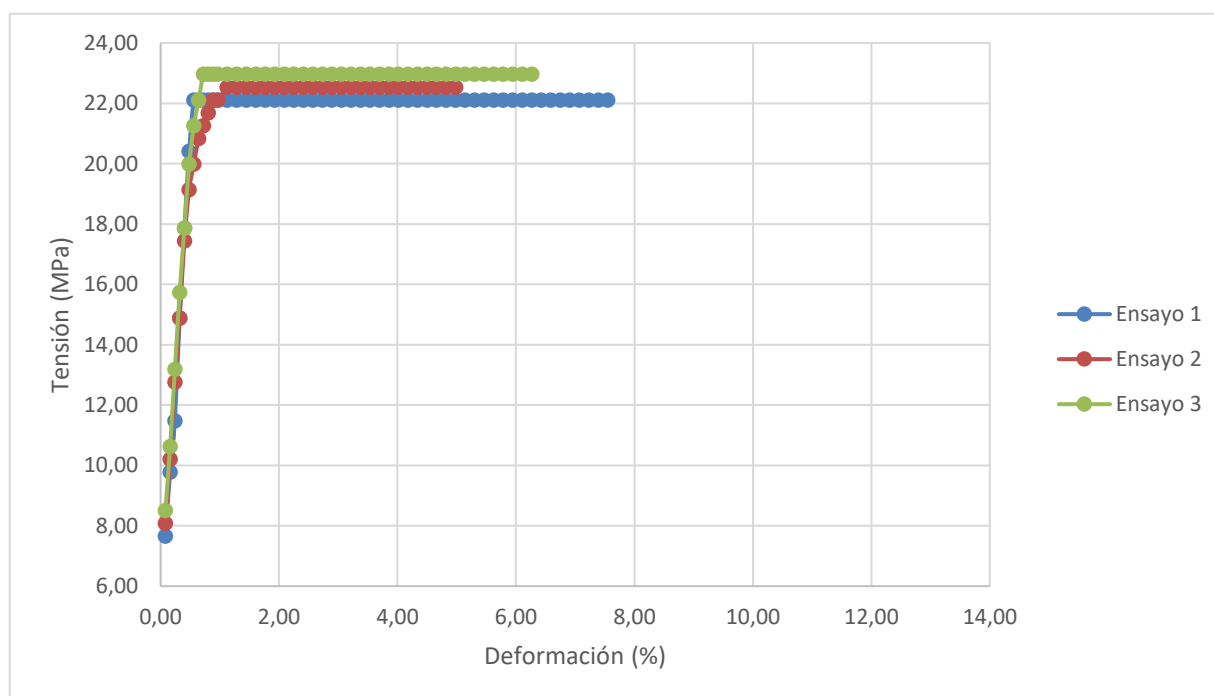


Figura 4-19 Gráfica Tensión-Deformación de ensayos con la Probeta 10

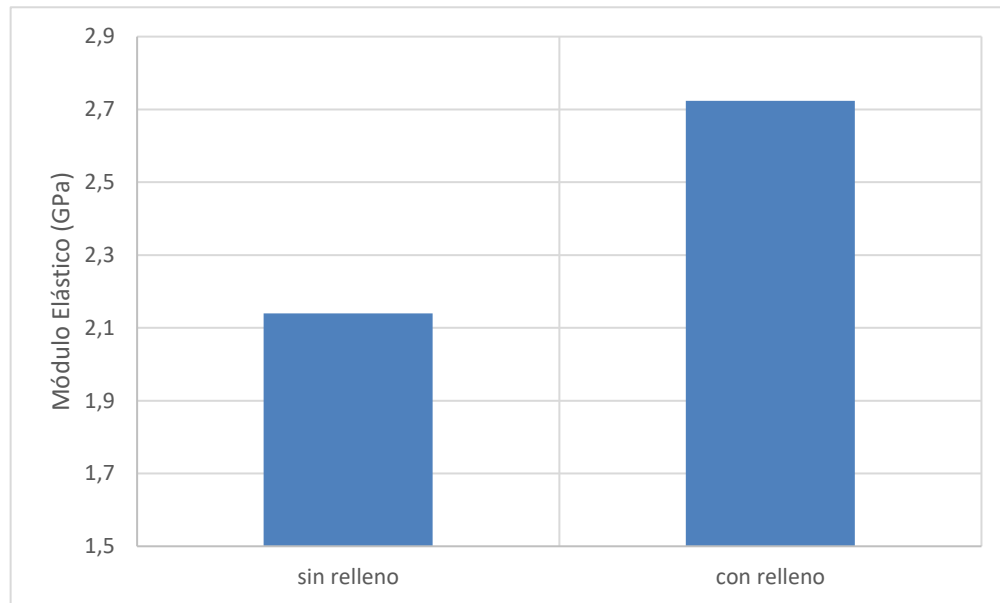


Figura 4-20 Gráfico comparativo al añadir relleno

En la Figura 4-21 se pueden ver comparados todos los distintos módulos elásticos en función de la modificación de cada uno de los diferentes parámetros. Como se puede observar el mayor aumento se produce al aplicar el relleno, observando que es convenientemente superior.

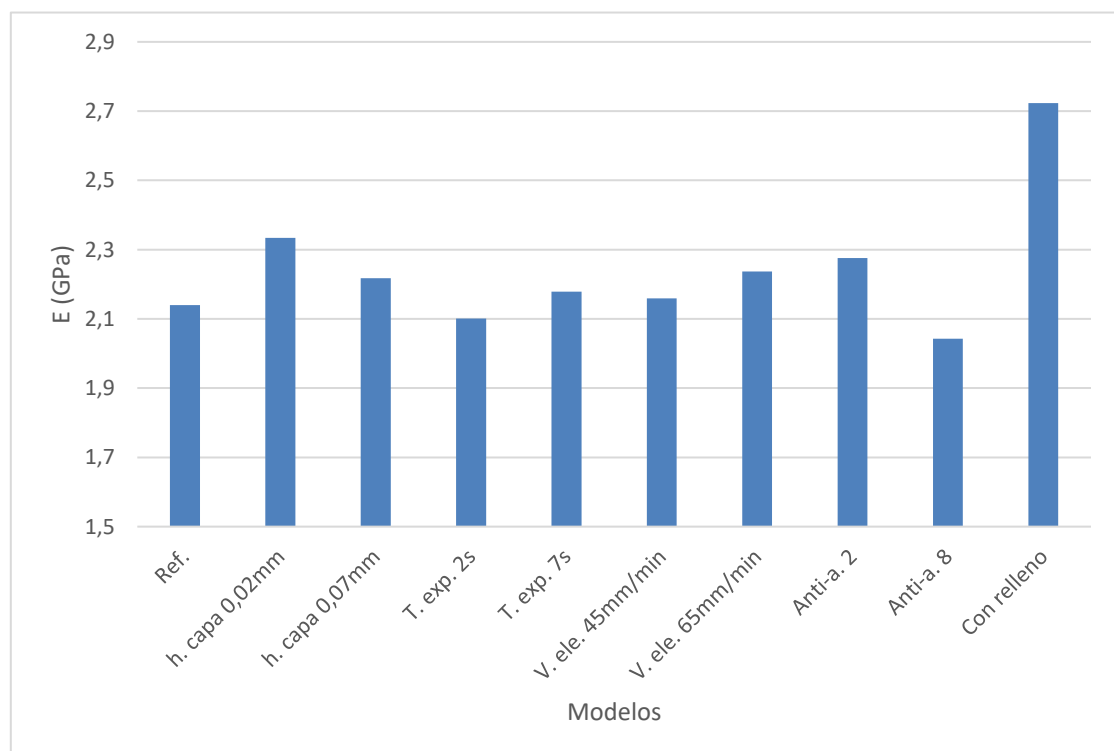


Figura 4-21 Gráfico comparativo del Módulo Elástico de todos los modelos

4.3 Ensayos de dureza

Se seguirá el siguiente procedimiento: primero se expondrán los datos extraídos de los ensayos. A continuación, se hará una comparativa de los resultados obtenidos. Por último, el procedimiento y los cálculos realizados para obtener el valor de la tensión de rotura.

Como en el apartado anterior los datos se expondrán según el parámetro de impresión que se haya decidido modificar. El valor de dureza de cada probeta se ha obtenido haciendo la media de los valores en los distintos puntos de medición en ambas caras.

4.3.1 Variación de la altura de capa

Las distintas alturas de capa son las de 0,03, 0,05 y 0,07 mm en las probetas 2, 1 y 3 respectivamente. En la Figura 4-22 se puede observar gráficamente los valores de dureza de las probetas 1, 2 y 3. Aunque la diferencia de valores es mínima, se puede apreciar que cuanto menor sea la altura de capa menor será la dureza de la pieza a imprimir.

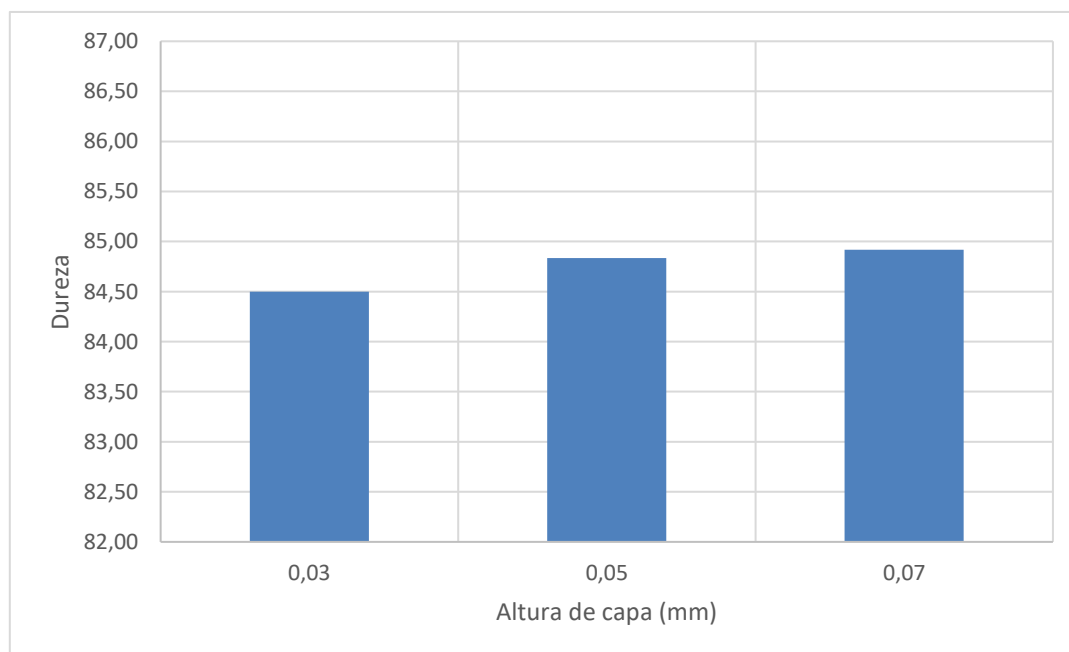


Figura 4-22 Dureza según la altura de capa

4.3.2 Variación del tiempo de exposición

Los distintos tiempos de exposición de los modelos 1, 4 y 5 son de 5, 2 y 8 segundos respectivamente. En la Figura 4-23 se puede observar gráficamente la variación de la dureza con el tiempo de exposición. Se puede apreciar que a mayor tiempo de exposición mayor será la dureza de las piezas.

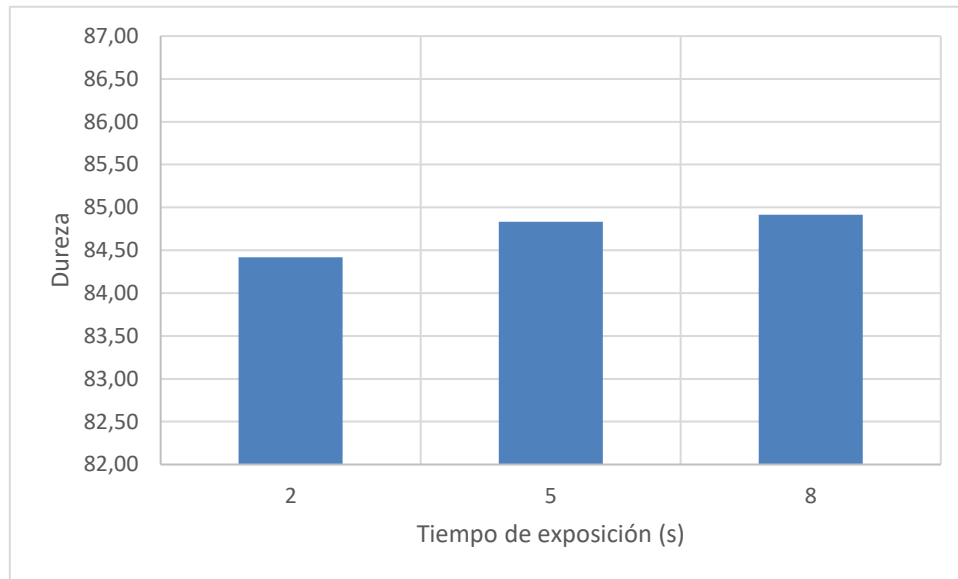


Figura 4-23 Dureza según el tiempo de exposición

4.3.3 Variación de la velocidad de elevación

Los distintos tiempos de elevación de los modelos 1, 6 y 7 son de 55, 45 y 65 mm/min respectivamente. Como podemos observar en la Figura 4-24 la dureza aumenta a medida que disminuimos la velocidad de elevación, obteniendo los mayores valores de dureza con una velocidad de elevación de 45 mm/min.

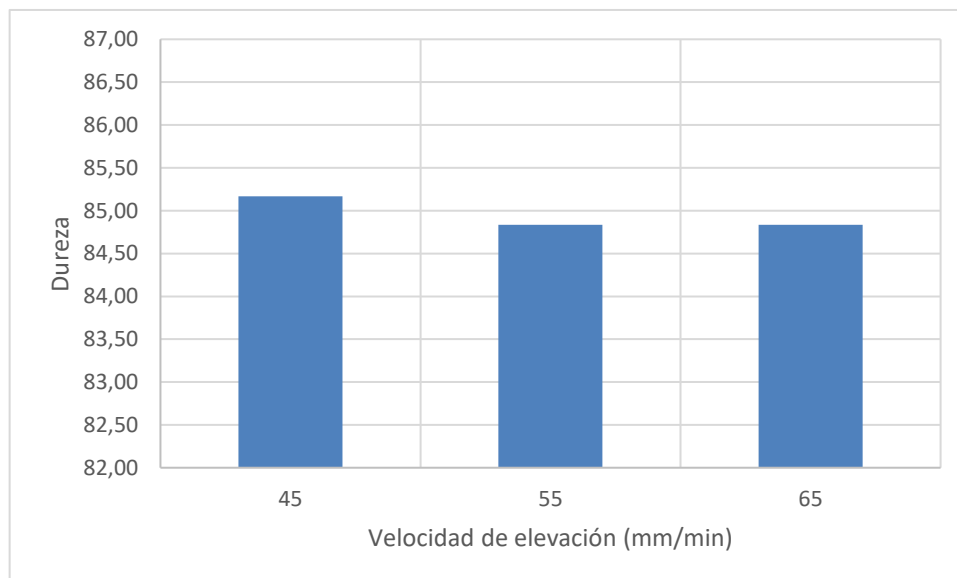


Figura 4-24 Dureza según la velocidad de elevación

4.3.4 Variación de anti-aliasing

Se han aplicado distintos valores de anti-aliasing para los diferentes modelos. Estos valores son 5, 2 y 8 para las probetas 1, 8 y 9 respectivamente. Como podemos observar en la Figura 4-25 se pueden ver los valores de dureza obtenidos en los ensayos de dureza. Con la variación de este parámetro es con la que mayor diferencia se nota en los valores de dureza obtenidos, resultando que cuanto mayor sea el valor de anti-aliasing mayor será la dureza de las probetas.

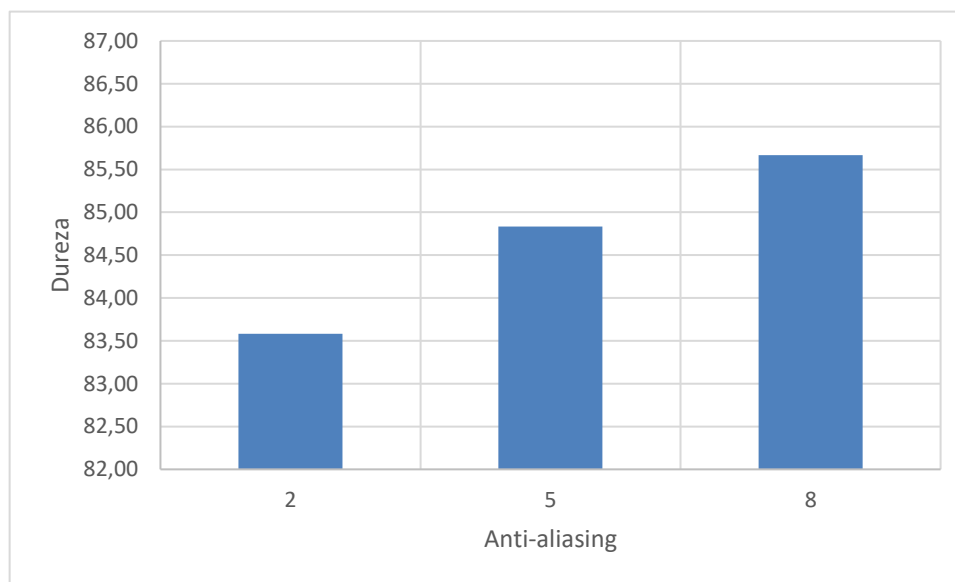


Figura 4-25 Dureza según el Anti-aliasing

4.3.5 Aplicación del relleno

En la Figura 4-26 se puede observar la comparación del décimo y último diseño, en el que se han utilizado los mismos valores que en el modelo de referencia, con el modelo de referencia. Así se podrá comprobar la diferencia de módulos elásticos al implementar este parámetro.

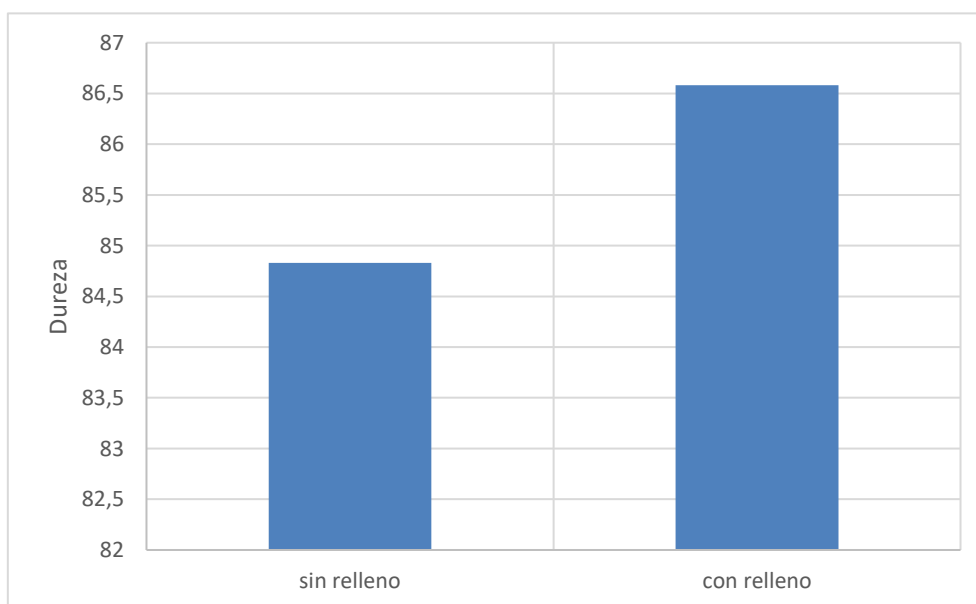


Figura 4-26 Dureza según el relleno

Los valores de dureza oscilan entre 84 y 85 aproximadamente, a excepción del modelo en el que se aplica el relleno que se ampliamente superior a los demás como se puede apreciar en la Figura 4-27. Valores muy similares a los que las propiedades de la resina nos indica en su tabla de características, Figura 4-28. Además, se ha estimado un valor de tensión crítica de rotura tracción a partir de los valores obtenidos, como todos estos resultados están entorno al valor 85 de dureza se ha definido un solo valor de tensión de rotura. Este valor se ha obtenido por medio de la Figura 4-29. El valor medio que se ha estimado para la dureza ha sido 84,8 cuyo valor relacionado de resistencia a tracción es **2,094435 GPa** y de 86,6 de dureza con relleno lo que supone una resistencia a tracción de **2,172915 GPa**. Valores superiores a la Tensión crítica de pandeo, que durante los ensayos se ha visto que es del orden de MPa.

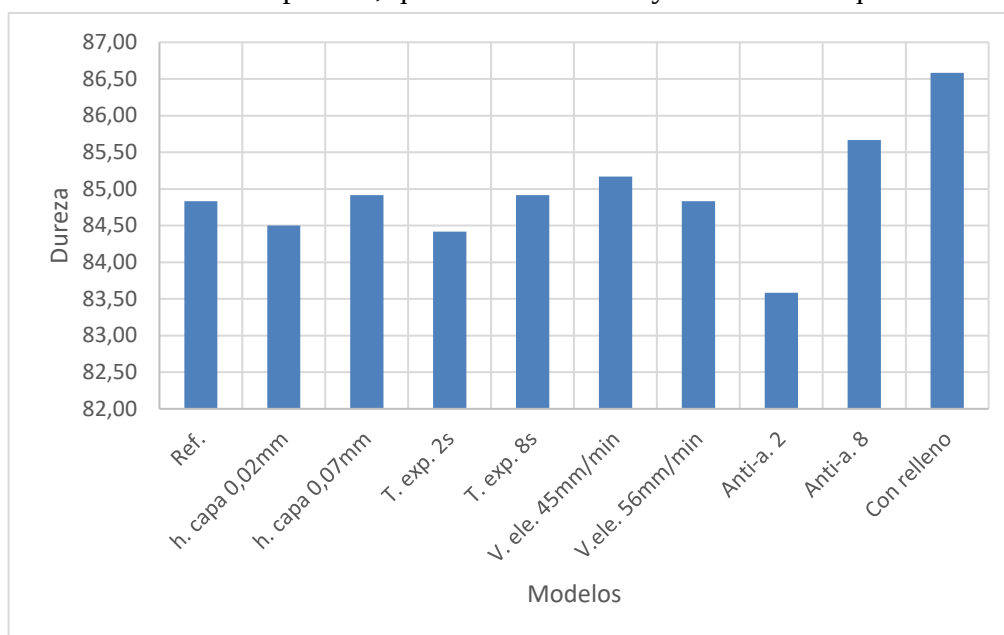


Figura 4-27 Gráfico comparativo de dureza de todos los modelos

Exposure parameter: first layer exposure 20-60s normal exposure 5-15

Resin parameter	Unit	Measurement data
Solidification wave-length	nm	405
Hardness(D)	/	84
Viscosity(25°C)	mPa.s	150-200
Liquid density	g/cm³	1.100
Solid density	g/cm³	1.195
Flexure strength	Mpa	59-70
Extension strength	Mpa	36-53

Figura 4-28 Características de la resina

Brinell Dureza HB	Rockwell Dureza HRb	Rockwell Dureza HRc	Vickers Dureza HV	Shore	Resistencia a la tracción Kg/mm2
682	-	65	885	91.0	232.9
652	-	63	820	87.2	221.5
627	-	61	765	84.8	213.5
600	-	59	633	76.5	188.7
578	-	59	717	81.5	204.0
555	120	57	675	78.5	195.1
534	119	54	598	73.5	181.3
514	119	52	567	71.0	174.9
495	117	51	540	68.5	168.0
477	117	49	515	66.7	162.2
461	116	48	494	65.0	157.0
444	115	46	472	63.0	150.6
429	115	45	454	61.0	145.6
415	114	44	437	59.0	140.0
401	113	42	420	57.2	136.0
388	112	41	404	65.8	132.0
375	112	40	389	54.0	127.5
363	110	39	375	52.2	123.4
	110	38	363	50.5	120.0
341	109	36	350	49.2	115.9
331	109	35	339	48.0	112.4
321	108	34	327	46.7	109.1
311	108	33	316	45.2	105.6
302	107	32	305	44.5	102.7
293	106	31	296	43.2	99.6
285	105	30	287	42.0	96.9
277	104	29	279	41.0	94.2
269	104	28	270	40.0	91.5
262	103	27	263	39.2	89.1
255	102	25	256	38.5	86.7
248	102	24	248	37.5	84.3
241	100	23	241	36.5	81.9
235	100	22	235	35.7	79.9
229	99	21	229	35.0	77.9
223	98	20	223	34.0	75.8

Figura 4-29 Tabla dureza-tensión de rotura [18].

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

En este apartado se hará una síntesis de los resultados obtenidos en el apartado anterior. Se ha decidido dividirlo en dos secciones: la primera será una conclusión obtenida según los ensayos de pandeo y dureza y después se expondrán las posibles líneas futuras.

5.1 Conclusiones

Durante estos ensayos se obtuvieron unos valores de módulo elástico, así que se sacaran una serie de conclusiones a partir de los valores de módulo elástico obtenidos en función de los parámetros de impresión que se han modificado:

5.1.1 *Altura de capa*

De estos ensayos se ve claramente diferenciado el valor obtenido con una altura de capa de 0,02mm con respecto a los demás ensayos. En cambio, entre los otros dos valores la diferencia es mínima, siendo incluso mayor el valor obtenido en los ensayos con una altura de capa de 0,07mm que en los realizados con la probeta de serie (0,05mm).

La conclusión sacada de estos ensayos es que con los ensayos realizados y debido al medidor de fuerza, el cual no nos permite la precisión deseada para la obtención de datos, no se considera un parámetro especialmente relevante, pero sí se puede intuir que a menor altura de capa mayor será el valor del módulo elástico de los modelos.

Además, este parámetro, es especialmente útil ante la necesidad de unos acabados más refinados. Cuanto menor sea la altura de capa, mejor será su acabado. En cambio, a medida que disminuimos la altura de la capa, aumenta el número de capas y con ello su tiempo de impresión. En estos diseños no se aprecia gran diferencia, pero en diseños de mayores magnitudes deberíamos sopesar si el acabado de la pieza es tan importante como para aumentar el tiempo de impresión de forma considerable.

5.1.2 *Tiempo de exposición*

Los resultados obtenidos durante los ensayos de las probetas 1 (5s), 4 (2s) y 5 (8s), nos han permitido definir que a mayor tiempo de exposición mayor será el módulo elástico. Esto se debe a que con los valores más altos la resina se somete a la fotocuración durante más tiempo, así lo hará hasta alcanzar el valor máximo que cada resina nos permita según sus características.

En cambio, a mayor tiempo de exposición mayor será el tiempo de impresión. En el caso del presente TFG no se aprecian grandes diferencias ya que los tiempos de impresión son relativamente pequeños, por lo que en el caso de querer imprimir un diseño de mayores dimensiones este sería un parámetro que habría que tener muy en cuenta y sopesar si preferimos un diseño rápido y con menor valor de módulo de elasticidad o si compensa ahorrar tiempo en detrimento de un diseño menos resistente.

Como en este trabajo nos estamos centrando en la resistencia de los diseños el valor óptimo en resistencia entre los utilizados sería el correspondiente a la probeta 4 con un tiempo de exposición de 8 segundos. Mientras que 2 segundos sería el mejor refiriéndonos a los tiempos y por lo tanto en costes.

5.1.3 Velocidad de elevación

Este parámetro afecta principalmente al tiempo de impresión, pero como hemos podido observar durante los resultados también se ven afectadas otras características de los diseños. Se hacen comparaciones entre los diseños 1 (55mm/min), 6 (45mm/min) y 7 (65mm/min). Con el diseño número 7 hemos obtenido el mayor valor de módulo elástico y además disminuyendo el tiempo de impresión dado que en este diseño se aplicó el mayor de los tres modelos. Es por ello por lo que no hemos considerado este parámetro como relevante en los que características mecánicas se refiere.

Como conclusión, hemos elegido el valor asociado a la probeta número 7 como el óptimo, ya que en este modelo se ha obtenido un mayor módulo elástico unido con un menor tiempo de impresión lo que resultaría realmente útil para los ensayos de pandeo.

5.1.4 Anti-aliasing

Durante el estudio de este parámetro se pudo ver que cuanto menor sea el valor de este parámetro mayor será el módulo elástico de los diseños. Se han hecho ensayos con los diseños 1, 8 y 9 con unos valores de este parámetro de 5, 2 y 8 respectivamente. El que mejores resultados ha dado es el diseño número 8, además sin aumentar su tiempo de impresión por lo que se considera un valor de especial importancia para el módulo elástico.

5.1.5 Aplicación del relleno

Como se pudo observar en la este es el parámetro más relevante a lo hora de aumentar el de la tensión crítica de pandeo y por consiguiente un mayor valor del módulo elástico. Además, no supone un mayor consumo de resina ni energético ni un mayor tiempo de impresión por lo que se podría aplicar a cualquier diseño para mejorar sus propiedades mecánicas.

5.1.6 Influencia de la modificación de parámetros en la dureza

La modificación de los distintos parámetros ha variado ligeramente los valores de dureza, rondando todos los valores que nos especifica el fabricante en las características de la resina. Además, se aprecia muy poca diferencia al modificar los parámetros.

Los valores óptimos sustraídos de los ensayos son los siguientes:

- Altura de capa: el valor que mayor dureza nos ha proporcionado es el del diseño 3 con una altura de capa de 0,07 mm además acortando el tiempo de impresión, por lo que sería el mejor valor de los tres probados.
- Tiempo de exposición: el valor que nos has proporcionado una mayor dureza es el correspondiente al quinto diseño, que se corresponde con un tiempo de exposición de 7 segundos, en detrimento de aumentar el tiempo de impresión. Para diseños sencillos y que no conlleven un gran tiempo este parámetro sería bueno tenerlo en cuenta y sopesar si preferimos un mayor tiempo y una mayor dureza o al revés.
- Velocidad elevación: el diseño con el que mejores resultados hemos obtenido es con el sexto, además es el modelo que más beneficios nos otorga ya que lleva asociada la menor velocidad de elevación de los tres comparados. Así que este valor es que señalamos como óptimo en cuanto a características de dureza.

- Anti-aliasing: en este parámetro es donde mejor se aprecia la diferencia entre los tres valores aplicados, siendo el mejor el asociado al diseño número 9. Se aprecia claramente que a medida que aumentamos el valor aumenta su dureza. Por otro lado, los aumentos de dureza que sufre no son de magnitudes especialmente grandes. Así que la conclusión obtenida de este parámetro es que a la hora de realizar una impresión habrá que sopesar si nos interesa una mayor dureza o un mayor módulo elástico ya que han resultado ser inversamente proporcionales en lo que a este parámetro se refiere.
- Aplicación del relleno: como sucedió en los cálculos del módulo elástico, en la dureza también es el parámetro más relevante, esto se puede observar en la Figura 4-27, y no supone mayor coste ni tiempo por lo que se podría aplicar a todos los diseños para obtener mayores valores de dureza. Además, este aumento de dureza está ligado a un aumento de su tensión crítica de rotura, por lo que si se tiene la intención de realizar ensayos de tracción siempre convendría aplicar este parámetro.

5.2 Líneas futuras

A continuación, se expondrán algunas de las posibles líneas de investigación que podrían realizarse en un futuro. El objetivo es que estas líneas estén encuadradas dentro del ámbito de la Armada, para su posible implantación en las unidades en tierra o en la mar.

- Realizar ensayos con otros diseños en los que se puedan someter a ensayos de tracción para obtener unos valores más precisos de la tensión de rotura. Por ejemplo, reduciendo la sección central a $\frac{3}{4}$, Figura 5-1, o a la mitad, Figura 5-2, de la aplicada en el presente TFG para forzar su rotura por la sección central en lugar de por los agarres.

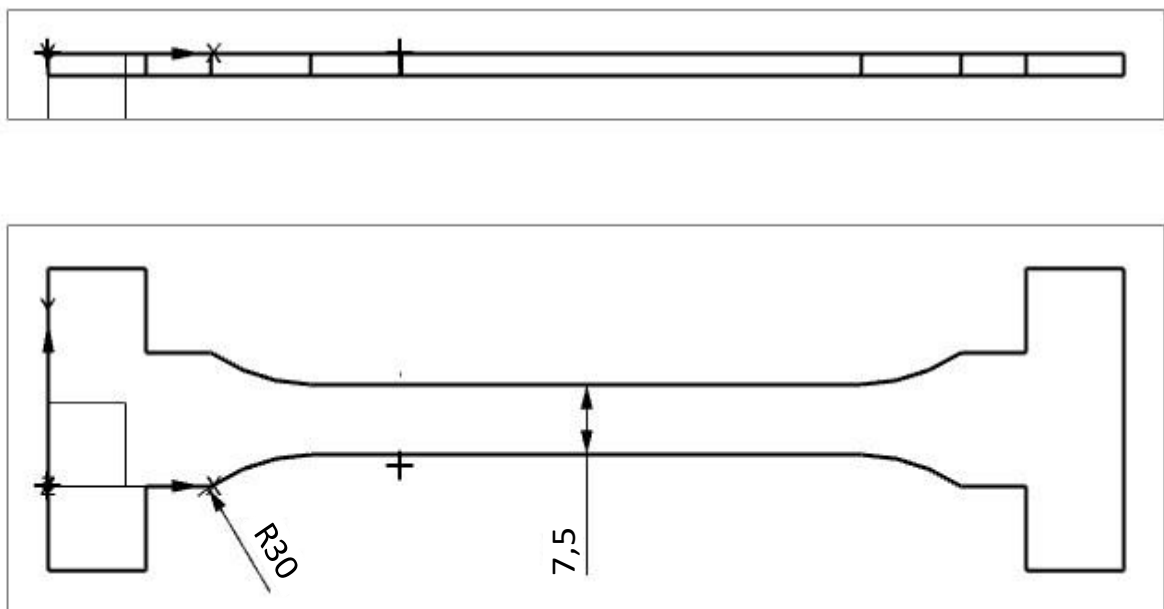


Figura 5-1 Nuevo diseño con tres cuartos de la sección central en mm.

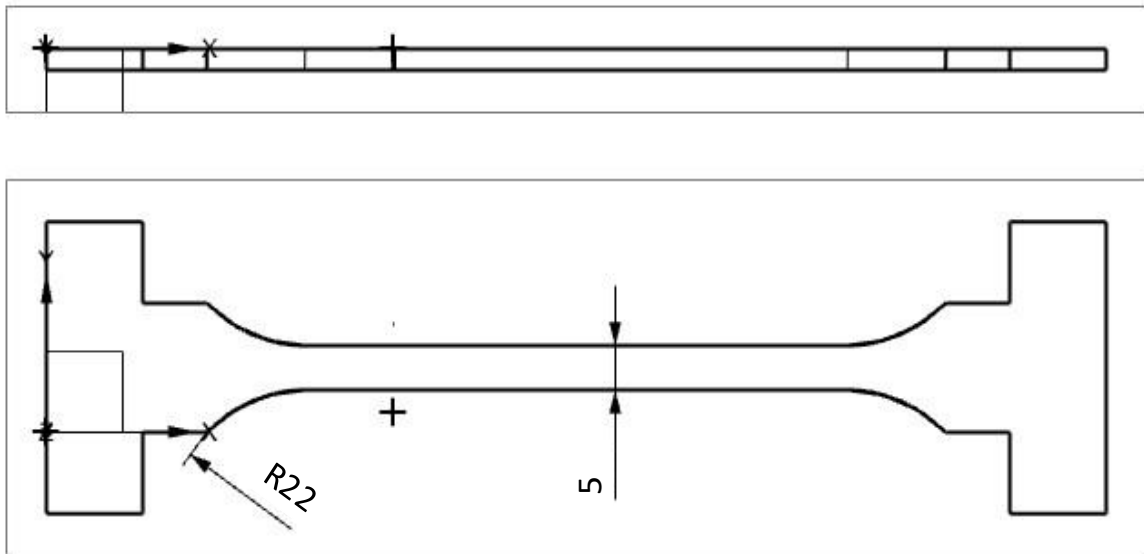


Figura 5-2 Nuevo diseño con la mitad de la sección central en mm.

- Realizar una comparativa con otro tipo de tecnologías de fabricación aditiva como la FDM.
- Realización de ensayos con otros diseños que no sean probetas y puedan ser de interés particular de la Armada, como tuercas u otros repuestos necesarios en las unidades.
- Aplicación de postprocesados, como recocidos entre otros, a los diseños y estudio de su comportamiento a los diferentes ensayos.
- Un estudio basado en las ventajas que proporciona esta tecnología en la fabricación de repuestos para las distintas unidades, el ahorro que supondría de tiempo y dinero para la Armada.
- Optimización del material empleado en la impresión mediante resina fotocurable por medio de ensayos de flexión. Sería muy similar al presente TFG, pero sin el inconveniente de las agarraderas, además se pueden estudiar otras propiedades del material y una aplicación de una normativa distinta.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] i-AMdigital, «interempresas,» 16 Julio 2019. [En línea]. Available: <https://www.interempresas.net/Fabricacion-aditiva/Articulos/251885-El-mercado-de-talentos-de-la-impresion-3D-en-Espana.html>. [Último acceso: 2 Marzo 2021].
- [2] J. C. Baños, 22 Mayo 2019. [En línea]. Available: <https://www.frikipandi.com/tecnologia/20190522/las-5-tendencias-de-impresion-3d-para-2019/>. [Último acceso: 3 Marzo 2019].
- [3] Mizar Additive Manufacturing, «Mizar Additive Manufacturing,» 14 Julio 2016. [En línea]. Available: <http://mizaradditive.com/que-es-fabricacion-aditiva/>.
- [4] 3DNATIVES, «3DNATIVES,» [En línea].
- [5] B. Molero, «Diseño Generativo con Solid Edge,» 12 Mayo 2018. [En línea]. Available: <https://generativedesignpro.wordpress.com/2018/05/12/procesos-de-fabricacion-aditiva-am/>.
- [6] R. L.-G. R. D. F. A. D. E. López-Alba, «Aplicación de correlación digital de imágenes para el análisis de problemas de contacto,» Jaén, 2012.
- [7] L. C. Howard, «3DNatives,» 5 Octubre 2016. [En línea]. Available: <https://www.3dnatives.com/es/top-10-aplicaciones-militares-3d-05102016/>. [Último acceso: Enero 24 2021].
- [8] D. Q. Díaz, «Naval Sea Systems Command,» 14 Marzo 2016. [En línea]. Available: <https://www.navsea.navy.mil/Media/News/SavedNewsModule/Article/692636/make-lab-opens-additive-manufacturing-opportunities-to-nswc-carderock-employees/>. [Último acceso: 26 Enero 2021].
- [9] División de Comunicaciones Corporativas de NSWCDD, «Naval Sea Systems Command,» 22 Marzo 2017. [En línea]. Available: <https://www.navsea.navy.mil/Media/News/Article/1126465/navy-and-marine-corps-showcase-3d-printing-innovations-and-impact-at-pentagon-e/>. [Último acceso: 26 Enero 2021].
- [10] D. Daglis, «Naval Sea Systems Command,» Centro Naval de Guerra de Superficie, Carderock Division, 17 Agosto 2017. [En línea]. Available: <https://www.navsea.navy.mil/Media/News/SavedNewsModule/Article/1286877/marines-using-additive-manufacturing-to-bring-innovation-to-the-battlefield/>. [Último acceso: 27 Enero 2021].
- [11] K. Longstaff, «Naval Sea Systems Command,» 10 Septiembre 2020. [En línea]. Available: <https://www.navsea.navy.mil/Media/News/SavedNewsModule/Article/2342649/millions-saved-through-rapid-additive-manufacturing-solution/>. [Último acceso: 31 Enero 2021].
- [12] L. Contreras, «3D Natives,» 7 Noviembre 2019. [En línea]. Available: <https://www.3dnatives.com/es/bioimpresion-futuro-medicina-180520172/>. [Último acceso: 1 Febrero 2021].
- [13] TRESDE, «TRESDE,» 19 Diciembre 2019. [En línea]. Available: <https://tresde.pe/entendiendo-los-parametros-de-la-impresion-3d-de-resina/>. [Último acceso: 4 Febrero 2021].

- [14] ASTM International , *ASTM D638-14 Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*, 2019.
- [15] ASTM International, *ASTM D695-15 Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics*, 2015.
- [16] ASTM International, *ASTM D2240-15 Standard Test Method for Rubber Property - Durometer Hardness*, 2017.
- [17] R. C. Hibbeler, *Mecánica de Materiales*, México D.F: PEARSON, 2011.
- [18] 3D HUBS, «3D HUBS,» [En línea]. Available: <https://www.3dhubs.com/guides/3d-printing/>.
- [19] Manufacturing Guide, «ManufacturingGuide,» [En línea]. Available: <https://www.manufacturingguide.com/en/laminated-object-manufacturing-lom>.
- [20] Ingemecánica, «Ingemecanica,» [En línea]. Available: <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn218.html>. [Último acceso: 28 Febrero 2021].

ANEXO I: DATOS EXTRAÍDOS DE LOS ENSAYOS DE PANDEO

a) Valores correspondientes a la Probeta 1:

P1 Ensayo 1			
Deformación	Fuerza	Deformación %	Tensión
10	0,2	0,08	8,50
20	0,25	0,16	10,63
30	0,3	0,24	12,76
40	0,35	0,32	14,88
50	0,38	0,40	16,16
60	0,4	0,48	17,01
70	0,42	0,56	17,86
80	0,44	0,64	18,71
90	0,46	0,72	19,56
100	0,46	0,80	19,56
110	0,47	0,88	19,98
120	0,48	0,96	20,41
140	0,48	1,12	20,41
160	0,48	1,29	20,41
180	0,48	1,45	20,41
200	0,48	1,61	20,41
220	0,48	1,77	20,41
240	0,48	1,93	20,41
260	0,48	2,09	20,41
280	0,48	2,25	20,41
300	0,48	2,41	20,41
320	0,48	2,57	20,41
340	0,48	2,73	20,41
360	0,48	2,89	20,41
380	0,48	3,05	20,41
400	0,48	3,21	20,41
420	0,48	3,37	20,41
440	0,48	3,53	20,41
460	0,48	3,69	20,41
480	0,48	3,86	20,41
500	0,48	4,02	20,41
520	0,48	4,18	20,41
540	0,48	4,34	20,41
560	0,48	4,50	20,41
580	0,48	4,66	20,41
600	0,48	4,82	20,41
620	0,48	4,98	20,41
640	0,48	5,14	20,41
660	0,48	5,30	20,41

680	0,48	5,46	20,41
700	0,48	5,62	20,41
720	0,48	5,78	20,41
740	0,48	5,94	20,41
760	0,48	6,10	20,41
780	0,48	6,27	20,41
800	0,48	6,43	20,41
820	0,48	6,59	20,41
840	0,48	6,75	20,41
860	0,48	6,91	20,41
880	0,48	7,07	20,41
900	0,48	7,23	20,41
920	0,48	7,39	20,41
940	0,48	7,55	20,41
960	0,48	7,71	20,41
980	0,48	7,87	20,41
1000	0,48	8,03	20,41
1020	0	8,19	0,00

Tabla A1-0-1 Datos extraídos del primer ensayo con la Probeta 1

P1 Ensayo 2			
Deformación	Fuerza	Deformación %	Tensión (Mpa)
10	0,2	0,08	8,50
20	0,22	0,16	9,35
30	0,25	0,24	10,63
40	0,3	0,32	12,76
50	0,37	0,40	15,73
60	0,4	0,48	17,01
70	0,44	0,56	18,71
80	0,46	0,64	19,56
90	0,47	0,72	19,98
100	0,47	0,80	19,98
110	0,47	0,88	19,98
120	0,47	0,96	19,98
140	0,47	1,12	19,98
160	0,47	1,29	19,98
180	0,47	1,45	19,98
200	0,47	1,61	19,98
220	0,47	1,77	19,98
240	0,47	1,93	19,98
260	0,47	2,09	19,98
280	0,47	2,25	19,98
300	0,47	2,41	19,98
320	0,47	2,57	19,98
340	0,47	2,73	19,98
360	0,47	2,89	19,98

OPTIMIZACIÓN DE MATERIAL EMPLEADO EN LA FABRICACIÓN ADITIVA DE
RESINA FOTOCURABLE MEDIANTE VARIACIÓN DE PARÁMETROS DE IMPRESIÓN

380	0,47	3,05	19,98
400	0,47	3,21	19,98
420	0,47	3,37	19,98
440	0,47	3,53	19,98
460	0,47	3,69	19,98
480	0,47	3,86	19,98
500	0,47	4,02	19,98
520	0,47	4,18	19,98
540	0,47	4,34	19,98
560	0,47	4,50	19,98
580	0,47	4,66	19,98
600	0,47	4,82	19,98
620	0,47	4,98	19,98
640	0,47	5,14	19,98
660	0,47	5,30	19,98
680	0,47	5,46	19,98
700	0,47	5,62	19,98
720	0,47	5,78	19,98
740	0,47	5,94	19,98
760	0,47	6,10	19,98
780	0,47	6,27	19,98
800	0,47	6,43	19,98
820	0,47	6,59	19,98
840	0,47	6,75	19,98
860	0,47	6,91	19,98
880	0,47	7,07	19,98
900	0,47	7,23	19,98
920	0,47	7,39	19,98
940	0,47	7,55	19,98
960	0,47	7,71	19,98
980	0,47	7,87	19,98
1000	0,47	8,03	19,98
1020	0,47	8,19	19,98
1040	0,47	8,35	19,98
1060	0,47	8,51	19,98
1080	0,47	8,67	19,98
1100	0,47	8,84	19,98
1120	0,47	9,00	19,98
1140	0,47	9,16	19,98
1160	0,47	9,32	19,98
1180	0,47	9,48	19,98
1200	0,47	9,64	19,98
1220	0,47	9,80	19,98
1240	0,47	9,96	19,98
1250	0	10,04	0,00

Tabla A1-0-2 Datos extraídos en el segundo ensayo con la Probeta 1

P1 Ensayo 3			
Deformación	Fuerza	Deformación %	Tensión (Mpa)
10	0,18	0,08	7,65
20	0,2	0,16	8,50
30	0,22	0,24	9,35
40	0,24	0,32	10,20
50	0,26	0,40	11,05
60	0,28	0,48	11,90
70	0,31	0,56	13,18
80	0,33	0,64	14,03
90	0,36	0,72	15,31
100	0,38	0,80	16,16
110	0,41	0,88	17,43
120	0,43	0,96	18,28
140	0,44	1,12	18,71
160	0,45	1,29	19,13
180	0,45	1,45	19,13
200	0,45	1,61	19,13
220	0,45	1,77	19,13
240	0,45	1,93	19,13
260	0,45	2,09	19,13
280	0,45	2,25	19,13
300	0,45	2,41	19,13
320	0,45	2,57	19,13
340	0,45	2,73	19,13
360	0,45	2,89	19,13
380	0,45	3,05	19,13
400	0,45	3,21	19,13
420	0,45	3,37	19,13
440	0,45	3,53	19,13
460	0,45	3,69	19,13
480	0,45	3,86	19,13
500	0,45	4,02	19,13
520	0,45	4,18	19,13
540	0,45	4,34	19,13
560	0,45	4,50	19,13
580	0,45	4,66	19,13
600	0,45	4,82	19,13
620	0,45	4,98	19,13
640	0,45	5,14	19,13
660	0,45	5,30	19,13
680	0,45	5,46	19,13
700	0,45	5,62	19,13
720	0,45	5,78	19,13
740	0,45	5,94	19,13
760	0,45	6,10	19,13
780	0,45	6,27	19,13

OPTIMIZACIÓN DE MATERIAL EMPLEADO EN LA FABRICACIÓN ADITIVA DE
RESINA FOTOCURABLE MEDIANTE VARIACIÓN DE PARÁMETROS DE IMPRESIÓN

800	0,45	6,43	19,13
820	0,45	6,59	19,13
840	0,45	6,75	19,13
860	0,45	6,91	19,13
880	0,45	7,07	19,13
900	0,45	7,23	19,13
920	0,45	7,39	19,13
940	0,45	7,55	19,13
960	0,45	7,71	19,13
980	0,45	7,87	19,13
1000	0,45	8,03	19,13
1020	0,45	8,19	19,13
1040	0,45	8,35	19,13
1060	0,45	8,51	19,13
1080	0,45	8,67	19,13
1100	0,45	8,84	19,13
1120	0,45	9,00	19,13
1140	0,45	9,16	19,13
1160	0,45	9,32	19,13
1180	0,45	9,48	19,13
1200	0,45	9,64	19,13
1220	0,45	9,80	19,13
1240	0,45	9,96	19,13
1260	0,45	10,12	19,13
1280	0,45	10,28	19,13
1300	0	10,44	0,00

Tabla A1-0-3 Datos extraídos del tercer ensayo con la Probeta 1

b) Valores correspondientes a la Probeta 2:

P2 Ensayo 1			
Deformación	Fuerza (KN)	Deformación %	Tensión (Mpa)
10	0,25	0,08	10,63
20	0,27	0,16	11,48
30	0,3	0,24	12,76
40	0,33	0,32	14,03
50	0,37	0,40	15,73
60	0,41	0,48	17,43
70	0,43	0,56	18,28
80	0,45	0,64	19,13
90	0,46	0,72	19,56
100	0,47	0,80	19,98
110	0,48	0,88	20,41
120	0,49	0,96	20,83
140	0,51	1,12	21,68
160	0,52	1,29	22,11
180	0,52	1,45	22,11
200	0,52	1,61	22,11
220	0,52	1,77	22,11
240	0,52	1,93	22,11
260	0,52	2,09	22,11
280	0,52	2,25	22,11
300	0,52	2,41	22,11
320	0,52	2,57	22,11
340	0,52	2,73	22,11
360	0,52	2,89	22,11
380	0,52	3,05	22,11
400	0,52	3,21	22,11
420	0,52	3,37	22,11
440	0,52	3,53	22,11
460	0,52	3,69	22,11
480	0,52	3,86	22,11
500	0,52	4,02	22,11
520	0,52	4,18	22,11
540	0,52	4,34	22,11
560	0,52	4,50	22,11
580	0,52	4,66	22,11
600	0,52	4,82	22,11
620	0,52	4,98	22,11
640	0,52	5,14	22,11
660	0,52	5,30	22,11
680	0,52	5,46	22,11
700	0,52	5,62	22,11
720	0,52	5,78	22,11
740	0,52	5,94	22,11

760	0,52	6,10	22,11
766	0	6,15	0,00

Tabla A1-0-4 Datos extraídos del primer ensayo con la Probeta 2

P2 Ensayo 2			
Deformación	Fuerza (KN)	Deformación %	Tensión (Mpa)
10	0,18	0,08	7,65
20	0,24	0,16	10,20
30	0,27	0,24	11,48
40	0,3	0,32	12,76
50	0,33	0,40	14,03
60	0,37	0,48	15,73
70	0,4	0,56	17,01
80	0,42	0,64	17,86
90	0,43	0,72	18,28
100	0,44	0,80	18,71
110	0,45	0,88	19,13
120	0,46	0,96	19,56
140	0,47	1,12	19,98
160	0,49	1,29	20,83
180	0,51	1,45	21,68
200	0,51	1,61	21,68
220	0,51	1,77	21,68
240	0,51	1,93	21,68
260	0,51	2,09	21,68
280	0,51	2,25	21,68
300	0,51	2,41	21,68
320	0,51	2,57	21,68
340	0,51	2,73	21,68
360	0,51	2,89	21,68
380	0,51	3,05	21,68
400	0,51	3,21	21,68
420	0,51	3,37	21,68
440	0,51	3,53	21,68
460	0,51	3,69	21,68
480	0,51	3,86	21,68
500	0,51	4,02	21,68
520	0,51	4,18	21,68
540	0,51	4,34	21,68
560	0,51	4,50	21,68
565	0	4,54	0,00

Tabla A1-0-5 Datos extraídos del segundo ensayo con la Probeta 2

P2 Ensayo 3			
Deformación	Fuerza (KN)	Deformación %	Tensión (Mpa)
10	0,18	0,08	7,65
20	0,22	0,16	9,35
30	0,25	0,24	10,63
40	0,27	0,32	11,48
50	0,31	0,40	13,18
60	0,34	0,48	14,46
70	0,37	0,56	15,73
80	0,39	0,64	16,58
90	0,4	0,72	17,01
100	0,41	0,80	17,43
110	0,42	0,88	17,86
120	0,43	0,96	18,28
140	0,46	1,12	19,56
160	0,48	1,29	20,41
180	0,52	1,45	22,11
200	0,54	1,61	22,96
220	0,54	1,77	22,96
240	0,54	1,93	22,96
260	0,54	2,09	22,96
280	0,54	2,25	22,96
300	0,54	2,41	22,96
320	0,54	2,57	22,96
340	0,54	2,73	22,96
360	0,54	2,89	22,96
380	0,54	3,05	22,96
400	0,54	3,21	22,96
420	0,54	3,37	22,96
440	0,54	3,53	22,96
460	0,54	3,69	22,96
480	0,54	3,86	22,96
500	0,54	4,02	22,96
520	0,54	4,18	22,96
540	0,54	4,34	22,96
560	0,54	4,50	22,96
580	0,54	4,66	22,96
600	0,54	4,82	22,96
620	0,54	4,98	22,96
640	0,54	5,14	22,96
660	0,54	5,30	22,96
680	0,54	5,46	22,96
700	0,54	5,62	22,96
720	0,54	5,78	22,96
740	0,54	5,94	22,96
760	0,54	6,10	22,96
780	0,54	6,27	22,96

OPTIMIZACIÓN DE MATERIAL EMPLEADO EN LA FABRICACIÓN ADITIVA DE
RESINA FOTOCURABLE MEDIANTE VARIACIÓN DE PARÁMETROS DE IMPRESIÓN

800	0,54	6,43	22,96
820	0,54	6,59	22,96
840	0,54	6,75	22,96
855	0	6,87	0,00

Tabla A1-0-6 Datos extraídos del tercer ensayo con la Probeta 2

c) Valores correspondientes a la Probeta 3:

P3 Ensayo 1			
Deformación	Fuerza (KN)	Deformación %	Tensión (Mpa)
10	0,2	0,08	8,50
20	0,26	0,16	11,05
30	0,31	0,24	13,18
40	0,34	0,32	14,46
50	0,36	0,40	15,31
60	0,38	0,48	16,16
70	0,4	0,56	17,01
80	0,41	0,64	17,43
90	0,42	0,72	17,86
100	0,43	0,80	18,28
110	0,43	0,88	18,28
120	0,43	0,96	18,28
140	0,43	1,12	18,28
160	0,43	1,29	18,28
180	0,43	1,45	18,28
200	0,43	1,61	18,28
220	0,43	1,77	18,28
240	0,43	1,93	18,28
260	0,43	2,09	18,28
280	0,43	2,25	18,28
300	0,43	2,41	18,28
320	0,43	2,57	18,28
340	0,43	2,73	18,28
360	0,43	2,89	18,28
380	0,43	3,05	18,28
400	0,43	3,21	18,28
420	0,43	3,37	18,28
440	0,43	3,53	18,28
460	0,43	3,69	18,28
480	0,43	3,86	18,28
500	0,43	4,02	18,28
520	0,43	4,18	18,28
540	0,43	4,34	18,28
560	0,43	4,50	18,28
580	0,43	4,66	18,28
600	0,43	4,82	18,28
620	0,43	4,98	18,28
640	0,43	5,14	18,28
660	0,43	5,30	18,28
680	0,43	5,46	18,28
700	0,43	5,62	18,28
720	0,43	5,78	18,28
740	0,43	5,94	18,28

OPTIMIZACIÓN DE MATERIAL EMPLEADO EN LA FABRICACIÓN ADITIVA DE
RESINA FOTOCURABLE MEDIANTE VARIACIÓN DE PARÁMETROS DE IMPRESIÓN

760	0,43	6,10	18,28
780	0,43	6,27	18,28
800	0,43	6,43	18,28
820	0,43	6,59	18,28
840	0,43	6,75	18,28
860	0,43	6,91	18,28
880	0,43	7,07	18,28
900	0,43	7,23	18,28
920	0,43	7,39	18,28
940	0,43	7,55	18,28
960	0,43	7,71	18,28
980	0,43	7,87	18,28
1000	0,43	8,03	18,28
1020	0,43	8,19	18,28
1040	0,43	8,35	18,28
1060	0,43	8,51	18,28
1080	0,43	8,67	18,28
1100	0,43	8,84	18,28
1120	0,43	9,00	18,28
1140	0,43	9,16	18,28
1160	0,43	9,32	18,28
1180	0,43	9,48	18,28
1200	0,43	9,64	18,28
1220	0,43	9,80	18,28
1240	0,43	9,96	18,28
1260	0,43	10,12	18,28
1280	0,43	10,28	18,28
1300	0,43	10,44	18,28
1320	0,43	10,60	18,28
1340	0,43	10,76	18,28
1360	0,43	10,92	18,28
1380	0,43	11,08	18,28
1400	0,43	11,24	18,28
1420	0,43	11,41	18,28
1440	0,43	11,57	18,28
1460	0,43	11,73	18,28
1480	0,43	11,89	18,28
1500	0	12,05	0,00

Tabla A1-0-7 Datos extraídos del primer ensayo con la Probeta 3

P3 Ensayo 2			
Deformación	Fuerza (KN)	Deformación %	Tensión (Mpa)
10	0,2	0,08	8,50
20	0,25	0,16	10,63
30	0,3	0,24	12,76

40	0,35	0,32	14,88
50	0,37	0,40	15,73
60	0,38	0,48	16,16
70	0,39	0,56	16,58
80	0,4	0,64	17,01
90	0,41	0,72	17,43
100	0,41	0,80	17,43
110	0,41	0,88	17,43
120	0,41	0,96	17,43
140	0,41	1,12	17,43
160	0,41	1,29	17,43
180	0,41	1,45	17,43
200	0,41	1,61	17,43
220	0,41	1,77	17,43
240	0,41	1,93	17,43
260	0,41	2,09	17,43
280	0,41	2,25	17,43
300	0,41	2,41	17,43
320	0,41	2,57	17,43
340	0,41	2,73	17,43
360	0,41	2,89	17,43
380	0,41	3,05	17,43
400	0,41	3,21	17,43
420	0,41	3,37	17,43
440	0,41	3,53	17,43
460	0,41	3,69	17,43
480	0,41	3,86	17,43
500	0,41	4,02	17,43
520	0,41	4,18	17,43
540	0,41	4,34	17,43
560	0,41	4,50	17,43
580	0,41	4,66	17,43
600	0,41	4,82	17,43
620	0,41	4,98	17,43
640	0,41	5,14	17,43
660	0,41	5,30	17,43
680	0,41	5,46	17,43
700	0,41	5,62	17,43
720	0,41	5,78	17,43
740	0,41	5,94	17,43
760	0,41	6,10	17,43
780	0,41	6,27	17,43
800	0,41	6,43	17,43
820	0,41	6,59	17,43
840	0,41	6,75	17,43
860	0,41	6,91	17,43
880	0,41	7,07	17,43

OPTIMIZACIÓN DE MATERIAL EMPLEADO EN LA FABRICACIÓN ADITIVA DE
RESINA FOTOCURABLE MEDIANTE VARIACIÓN DE PARÁMETROS DE IMPRESIÓN

900	0,41	7,23	17,43
920	0,41	7,39	17,43
940	0,41	7,55	17,43
960	0,41	7,71	17,43
980	0,41	7,87	17,43
1000	0,41	8,03	17,43
1020	0,41	8,19	17,43
1040	0,41	8,35	17,43
1060	0,41	8,51	17,43
1080	0,41	8,67	17,43
1100	0,41	8,84	17,43
1120	0,41	9,00	17,43
1140	0,41	9,16	17,43
1160	0,41	9,32	17,43
1180	0,41	9,48	17,43
1200	0,41	9,64	17,43
1220	0,41	9,80	17,43
1240	0,41	9,96	17,43
1260	0,41	10,12	17,43
1280	0,41	10,28	17,43
1300	0,41	10,44	17,43
1320	0,41	10,60	17,43
1340	0,41	10,76	17,43
1360	0,41	10,92	17,43
1380	0,41	11,08	17,43
1400	0,41	11,24	17,43
1420	0,41	11,41	17,43
1440	0,41	11,57	17,43
1460	0,41	11,73	17,43
1480	0,41	11,89	17,43
1500	0,41	12,05	17,43
1520	0,41	12,21	17,43
1540	0,41	12,37	17,43
1560	0,41	12,53	17,43
1580	0,41	12,69	17,43
1600	0,41	12,85	17,43
1620	0,41	13,01	17,43
1640	0,41	13,17	17,43
1660	0,41	13,33	17,43
1680	0,41	13,49	17,43
1685	0	13,53	0,00

Tabla A1-0-8 Datos extraídos del segundo ensayo con la Probeta 3

P3 Ensayo 3			
Deformación	Fuerza (KN)	Deformación %	Tensión (Mpa)
10	0,18	0,08	7,65
20	0,22	0,16	9,35

30	0,26	0,24	11,05
40	0,29	0,32	12,33
50	0,32	0,40	13,61
60	0,35	0,48	14,88
70	0,37	0,56	15,73
80	0,39	0,64	16,58
90	0,4	0,72	17,01
100	0,41	0,80	17,43
110	0,41	0,88	17,43
120	0,41	0,96	17,43
140	0,41	1,12	17,43
160	0,41	1,29	17,43
180	0,41	1,45	17,43
200	0,41	1,61	17,43
220	0,41	1,77	17,43
240	0,41	1,93	17,43
260	0,41	2,09	17,43
280	0,41	2,25	17,43
300	0,41	2,41	17,43
320	0,41	2,57	17,43
340	0,41	2,73	17,43
360	0,41	2,89	17,43
380	0,41	3,05	17,43
400	0,41	3,21	17,43
420	0,41	3,37	17,43
440	0,41	3,53	17,43
460	0,41	3,69	17,43
480	0,41	3,86	17,43
500	0,41	4,02	17,43
520	0,41	4,18	17,43
540	0,41	4,34	17,43
560	0,41	4,50	17,43
580	0,41	4,66	17,43
600	0,41	4,82	17,43
620	0,41	4,98	17,43
640	0,41	5,14	17,43
660	0,41	5,30	17,43
680	0,41	5,46	17,43
700	0,41	5,62	17,43
720	0,41	5,78	17,43
740	0,41	5,94	17,43
760	0,41	6,10	17,43
780	0,41	6,27	17,43
800	0,41	6,43	17,43
820	0,41	6,59	17,43
840	0,41	6,75	17,43
860	0,41	6,91	17,43

OPTIMIZACIÓN DE MATERIAL EMPLEADO EN LA FABRICACIÓN ADITIVA DE
RESINA FOTOCURABLE MEDIANTE VARIACIÓN DE PARÁMETROS DE IMPRESIÓN

880	0,41	7,07	17,43
900	0,41	7,23	17,43
920	0,41	7,39	17,43
940	0,41	7,55	17,43
960	0,41	7,71	17,43
980	0,41	7,87	17,43
1000	0,41	8,03	17,43
1020	0,41	8,19	17,43
1040	0,41	8,35	17,43
1060	0,41	8,51	17,43
1080	0,41	8,67	17,43
1100	0,41	8,84	17,43
1120	0,41	9,00	17,43
1140	0,41	9,16	17,43
1160	0,41	9,32	17,43
1180	0,41	9,48	17,43
1200	0,41	9,64	17,43
1220	0,41	9,80	17,43
1240	0,41	9,96	17,43
1260	0,41	10,12	17,43
1280	0,41	10,28	17,43
1300	0,41	10,44	17,43
1320	0,41	10,60	17,43
1340	0,41	10,76	17,43
1360	0,41	10,92	17,43
1380	0,41	11,08	17,43
1400	0,41	11,24	17,43
1420	0,41	11,41	17,43
1440	0,41	11,57	17,43
1460	0,41	11,73	17,43
1480	0,41	11,89	17,43
1500	0,41	12,05	17,43
1520	0,41	12,21	17,43
1540	0,41	12,37	17,43
1560	0,41	12,53	17,43
1580	0,41	12,69	17,43
1585	0	12,73	0,00

Tabla A1-0-9 Datos extraídos del tercer ensayo con la Probeta 3

d) Valores correspondientes a la Probeta 4:

P4 Ensayo 1			
Deformación	Fuerza (KN)	Deformación %	Tensión (Mpa)
10	0,18	0,08	7,65
20	0,2	0,16	8,50
30	0,22	0,24	9,35
40	0,24	0,32	10,20
50	0,27	0,40	11,48
60	0,31	0,48	13,18
70	0,35	0,56	14,88
80	0,37	0,64	15,73
90	0,39	0,72	16,58
100	0,41	0,80	17,43
110	0,43	0,88	18,28
120	0,45	0,96	19,13
140	0,47	1,12	19,98
160	0,48	1,29	20,41
180	0,48	1,45	20,41
200	0,48	1,61	20,41
220	0,48	1,77	20,41
240	0,48	1,93	20,41
260	0,48	2,09	20,41
280	0,48	2,25	20,41
300	0,48	2,41	20,41
320	0,48	2,57	20,41
340	0,48	2,73	20,41
360	0,48	2,89	20,41
380	0,48	3,05	20,41
400	0,48	3,21	20,41
420	0,48	3,37	20,41
440	0,48	3,53	20,41
460	0,48	3,69	20,41
480	0,48	3,86	20,41
500	0,48	4,02	20,41
520	0,48	4,18	20,41
540	0,48	4,34	20,41
560	0,48	4,50	20,41
580	0,48	4,66	20,41
600	0,48	4,82	20,41
620	0,48	4,98	20,41
640	0,48	5,14	20,41
650	0	5,22	0,00

Tabla A1-0-10 Datos extraídos del primer ensayo con la Probeta 4

OPTIMIZACIÓN DE MATERIAL EMPLEADO EN LA FABRICACIÓN ADITIVA DE
RESINA FOTOCURABLE MEDIANTE VARIACIÓN DE PARÁMETROS DE IMPRESIÓN

P4 Ensayo 2			
Deformación	Fuerza (KN)	Deformación %	Tensión (Mpa)
10	0,2	0,08	8,50
20	0,25	0,16	10,63
30	0,27	0,24	11,48
40	0,29	0,32	12,33
50	0,31	0,40	13,18
60	0,33	0,48	14,03
70	0,35	0,56	14,88
80	0,36	0,64	15,31
90	0,37	0,72	15,73
100	0,38	0,80	16,16
110	0,39	0,88	16,58
120	0,4	0,96	17,01
140	0,41	1,12	17,43
160	0,43	1,29	18,28
180	0,44	1,45	18,71
200	0,44	1,61	18,71
220	0,44	1,77	18,71
240	0,44	1,93	18,71
260	0,44	2,09	18,71
280	0,44	2,25	18,71
300	0,44	2,41	18,71
320	0,44	2,57	18,71
340	0,44	2,73	18,71
360	0,44	2,89	18,71
380	0,44	3,05	18,71
400	0,44	3,21	18,71
420	0,44	3,37	18,71
440	0,44	3,53	18,71
460	0,44	3,69	18,71
480	0,44	3,86	18,71
500	0,44	4,02	18,71
520	0,44	4,18	18,71
540	0,44	4,34	18,71
560	0,44	4,50	18,71
580	0,44	4,66	18,71
600	0,44	4,82	18,71
620	0,44	4,98	18,71
640	0,44	5,14	18,71
660	0,44	5,30	18,71
680	0,44	5,46	18,71
700	0,44	5,62	18,71
720	0,44	5,78	18,71
740	0,44	5,94	18,71
760	0,44	6,10	18,71
780	0,44	6,27	18,71

800	0,44	6,43	18,71
820	0,44	6,59	18,71
840	0,44	6,75	18,71
860	0,44	6,91	18,71
880	0,44	7,07	18,71
900	0,44	7,23	18,71
920	0,44	7,39	18,71
940	0,44	7,55	18,71
960	0,44	7,71	18,71
980	0,44	7,87	18,71
1000	0,44	8,03	18,71
1020	0,44	8,19	18,71
1040	0,44	8,35	18,71
1060	0,44	8,51	18,71
1080	0,44	8,67	18,71
1100	0,44	8,84	18,71
1120	0,44	9,00	18,71
1140	0,44	9,16	18,71
1160	0,44	9,32	18,71
1180	0,44	9,48	18,71
1200	0,44	9,64	18,71
1220	0,44	9,80	18,71
1240	0,44	9,96	18,71
1260	0,44	10,12	18,71
1280	0,44	10,28	18,71
1300	0,44	10,44	18,71
1320	0,44	10,60	18,71
1340	0,44	10,76	18,71
1360	0,44	10,92	18,71
1380	0	11,08	0,00

Tabla A1-0-11 Datos extraídos del segundo ensayo con la Probeta 4

P4 Ensayo 3			
Deformación	Fuerza (KN)	Deformación %	Tensión (Mpa)
10	0,23	0,08	9,78
20	0,25	0,16	10,63
30	0,28	0,24	11,90
40	0,32	0,32	13,61
50	0,34	0,40	14,46
60	0,37	0,48	15,73
70	0,39	0,56	16,58
80	0,41	0,64	17,43
90	0,43	0,72	18,28
100	0,45	0,80	19,13
110	0,47	0,88	19,98
120	0,49	0,96	20,83
140	0,5	1,12	21,26
160	0,5	1,29	21,26

OPTIMIZACIÓN DE MATERIAL EMPLEADO EN LA FABRICACIÓN ADITIVA DE
RESINA FOTOCURABLE MEDIANTE VARIACIÓN DE PARÁMETROS DE IMPRESIÓN

180	0,5	1,45	21,26
200	0,5	1,61	21,26
220	0,5	1,77	21,26
240	0,5	1,93	21,26
260	0,5	2,09	21,26
280	0,5	2,25	21,26
300	0,5	2,41	21,26
320	0,5	2,57	21,26
340	0,5	2,73	21,26
360	0,5	2,89	21,26
380	0,5	3,05	21,26
400	0,5	3,21	21,26
420	0,5	3,37	21,26
440	0,5	3,53	21,26
460	0,5	3,69	21,26
480	0,5	3,86	21,26
500	0,5	4,02	21,26
520	0,5	4,18	21,26
540	0,5	4,34	21,26
560	0,5	4,50	21,26
580	0,5	4,66	21,26
600	0,5	4,82	21,26
620	0,5	4,98	21,26
640	0,5	5,14	21,26
660	0,5	5,30	21,26
680	0,5	5,46	21,26
700	0,5	5,62	21,26
720	0,5	5,78	21,26
740	0,5	5,94	21,26
760	0,5	6,10	21,26
780	0,5	6,27	21,26
800	0,5	6,43	21,26
820	0,5	6,59	21,26
840	0,5	6,75	21,26
860	0,5	6,91	21,26
880	0,5	7,07	21,26
900	0,5	7,23	21,26
920	0,5	7,39	21,26
940	0,5	7,55	21,26
960	0,5	7,71	21,26
980	0,5	7,87	21,26
1000	0,5	8,03	21,26
1020	0,5	8,19	21,26
1040	0,5	8,35	21,26
1055	0	8,47	0,00

Tabla A1-0-12 Datos extraídos del tercer ensayo con la Probeta 4

e) Valores correspondientes a la Probeta 5:

P5 Ensayo 1			
Deformación	Fuerza (KN)	Deformación %	Tensión (Mpa)
10	0,2	0,08	8,50
20	0,25	0,16	10,63
30	0,28	0,24	11,90
40	0,31	0,32	13,18
50	0,33	0,40	14,03
60	0,35	0,48	14,88
70	0,37	0,56	15,73
80	0,39	0,64	16,58
90	0,41	0,72	17,43
100	0,43	0,80	18,28
110	0,44	0,88	18,71
120	0,45	0,96	19,13
140	0,46	1,12	19,56
160	0,46	1,29	19,56
180	0,46	1,45	19,56
200	0,46	1,61	19,56
220	0,46	1,77	19,56
240	0,46	1,93	19,56
260	0,46	2,09	19,56
280	0,46	2,25	19,56
300	0,46	2,41	19,56
320	0,46	2,57	19,56
340	0,46	2,73	19,56
360	0,46	2,89	19,56
380	0,46	3,05	19,56
400	0,46	3,21	19,56
420	0,46	3,37	19,56
440	0,46	3,53	19,56
460	0,46	3,69	19,56
480	0,46	3,86	19,56
500	0,46	4,02	19,56
520	0,46	4,18	19,56
540	0,46	4,34	19,56
560	0,46	4,50	19,56
580	0,46	4,66	19,56
600	0,46	4,82	19,56
620	0,46	4,98	19,56
640	0,46	5,14	19,56
650	0,46	5,22	19,56
680	0,46	5,46	19,56
700	0,46	5,62	19,56
720	0,46	5,78	19,56
740	0,46	5,94	19,56

OPTIMIZACIÓN DE MATERIAL EMPLEADO EN LA FABRICACIÓN ADITIVA DE
RESINA FOTOCURABLE MEDIANTE VARIACIÓN DE PARÁMETROS DE IMPRESIÓN

760	0,46	6,10	19,56
780	0,46	6,27	19,56
800	0,46	6,43	19,56
820	0,46	6,59	19,56
840	0,46	6,75	19,56
860	0,46	6,91	19,56
880	0,46	7,07	19,56
900	0,46	7,23	19,56
920	0,46	7,39	19,56
940	0,46	7,55	19,56
960	0,46	7,71	19,56
980	0,46	7,87	19,56
1000	0,46	8,03	19,56
1020	0,46	8,19	19,56
1040	0,46	8,35	19,56
1060	0,46	8,51	19,56
1080	0,46	8,67	19,56
1100	0,46	8,84	19,56
1120	0,46	9,00	19,56
1140	0,46	9,16	19,56
1160	0,46	9,32	19,56
1180	0,46	9,48	19,56
1200	0,46	9,64	19,56
1220	0,46	9,80	19,56
1240	0,46	9,96	19,56
1260	0,46	10,12	19,56
1280	0,46	10,28	19,56
1300	0,46	10,44	19,56
1320	0,46	10,60	19,56
1335	0	10,72	0,00

Tabla A1-0-13 Datos extraídos del primer ensayo con la Probeta 5

P5 Ensayo 2			
Deformación	Fuerza (KN)	Deformación %	Tensión (Mpa)
10	0,2	0,08	8,50
20	0,24	0,16	10,20
30	0,28	0,24	11,90
40	0,3	0,32	12,76
50	0,32	0,40	13,61
60	0,36	0,48	15,31
70	0,38	0,56	16,16
80	0,4	0,64	17,01
90	0,42	0,72	17,86
100	0,43	0,80	18,28
110	0,44	0,88	18,71
120	0,45	0,96	19,13

140	0,45	1,12	19,13
160	0,45	1,29	19,13
180	0,45	1,45	19,13
200	0,45	1,61	19,13
220	0,45	1,77	19,13
240	0,45	1,93	19,13
260	0,45	2,09	19,13
280	0,45	2,25	19,13
300	0,45	2,41	19,13
320	0,45	2,57	19,13
340	0,45	2,73	19,13
360	0,45	2,89	19,13
380	0,45	3,05	19,13
400	0,45	3,21	19,13
420	0,45	3,37	19,13
440	0,45	3,53	19,13
460	0,45	3,69	19,13
480	0,45	3,86	19,13
500	0,45	4,02	19,13
520	0,45	4,18	19,13
540	0,45	4,34	19,13
560	0,45	4,50	19,13
580	0,45	4,66	19,13
600	0,45	4,82	19,13
620	0,45	4,98	19,13
640	0,45	5,14	19,13
650	0,45	5,22	19,13
680	0,45	5,46	19,13
700	0,45	5,62	19,13
720	0,45	5,78	19,13
740	0,45	5,94	19,13
760	0,45	6,10	19,13
780	0,45	6,27	19,13
800	0,45	6,43	19,13
820	0,45	6,59	19,13
840	0,45	6,75	19,13
860	0,45	6,91	19,13
880	0,45	7,07	19,13
900	0,45	7,23	19,13
920	0,45	7,39	19,13
940	0,45	7,55	19,13
960	0,45	7,71	19,13
980	0,45	7,87	19,13
1000	0,45	8,03	19,13
1020	0,45	8,19	19,13
1040	0,45	8,35	19,13
1060	0,45	8,51	19,13

OPTIMIZACIÓN DE MATERIAL EMPLEADO EN LA FABRICACIÓN ADITIVA DE
RESINA FOTOCURABLE MEDIANTE VARIACIÓN DE PARÁMETROS DE IMPRESIÓN

1080	0,45	8,67	19,13
1100	0,45	8,84	19,13
1120	0,45	9,00	19,13
1140	0,45	9,16	19,13
1160	0,45	9,32	19,13
1180	0,45	9,48	19,13
1200	0,45	9,64	19,13
1220	0,45	9,80	19,13
1240	0,45	9,96	19,13
1250	0	10,04	0,00

Tabla A1-0-14 Datos extraídos del segundo ensayo con la Probeta 5

P5 Ensayo 3			
Deformación	Fuerza (KN)	Deformación %	Tensión (Mpa)
10	0,18	0,08	7,65
20	0,22	0,16	9,35
30	0,27	0,24	11,48
40	0,31	0,32	13,18
50	0,34	0,40	14,46
60	0,37	0,48	15,73
70	0,39	0,56	16,58
80	0,41	0,64	17,43
90	0,43	0,72	18,28
100	0,45	0,80	19,13
110	0,47	0,88	19,98
120	0,49	0,96	20,83
140	0,5	1,12	21,26
160	0,5	1,29	21,26
180	0,5	1,45	21,26
200	0,5	1,61	21,26
220	0,5	1,77	21,26
240	0,5	1,93	21,26
260	0,5	2,09	21,26
280	0,5	2,25	21,26
300	0,5	2,41	21,26
320	0,5	2,57	21,26
340	0,5	2,73	21,26
360	0,5	2,89	21,26
380	0,5	3,05	21,26
400	0,5	3,21	21,26
420	0,5	3,37	21,26
440	0,5	3,53	21,26
460	0,5	3,69	21,26
480	0,5	3,86	21,26
500	0,5	4,02	21,26
520	0,5	4,18	21,26

540	0,5	4,34	21,26
560	0,5	4,50	21,26
580	0,5	4,66	21,26
600	0,5	4,82	21,26
620	0,5	4,98	21,26
640	0	5,14	0,00

Tabla A1-0-15 Datos extraídos del tercer ensayo con la Probeta 5

f) Valores correspondientes a la Probeta 6:

P6 Ensayo 1			
Deformación	Fuerza (KN)	Deformación %	Tensión (Mpa)
10	0,2	0,08	8,50
20	0,25	0,16	10,63
30	0,27	0,24	11,48
40	0,3	0,32	12,76
50	0,33	0,40	14,03
60	0,36	0,48	15,31
70	0,39	0,56	16,58
80	0,41	0,64	17,43
90	0,42	0,72	17,86
100	0,43	0,80	18,28
110	0,43	0,88	18,28
120	0,43	0,96	18,28
140	0,43	1,12	18,28
160	0,43	1,29	18,28
180	0,43	1,45	18,28
200	0,43	1,61	18,28
220	0,43	1,77	18,28
240	0,43	1,93	18,28
260	0,43	2,09	18,28
280	0,43	2,25	18,28
300	0,43	2,41	18,28
320	0,43	2,57	18,28
340	0,43	2,73	18,28
360	0,43	2,89	18,28
380	0,43	3,05	18,28
400	0,43	3,21	18,28
420	0,43	3,37	18,28
440	0,43	3,53	18,28
460	0,43	3,69	18,28
480	0,43	3,86	18,28
500	0,43	4,02	18,28
520	0,43	4,18	18,28
540	0,43	4,34	18,28
560	0,43	4,50	18,28
580	0,43	4,66	18,28
600	0,43	4,82	18,28
620	0,43	4,98	18,28
640	0,43	5,14	18,28
650	0,43	5,22	18,28
680	0,43	5,46	18,28
700	0,43	5,62	18,28

720	0,43	5,78	18,28
735	0	5,90	0,00

Tabla A1-0-16 Datos extraídos del primer ensayo con la Probeta 6

P6 Ensayo 2			
Deformación	Fuerza (KN)	Deformación %	Tensión (Mpa)
10	0,15	0,08	6,38
20	0,2	0,16	8,50
30	0,25	0,24	10,63
40	0,28	0,32	11,90
50	0,31	0,40	13,18
60	0,33	0,48	14,03
70	0,35	0,56	14,88
80	0,36	0,64	15,31
90	0,37	0,72	15,73
100	0,38	0,80	16,16
110	0,38	0,88	16,16
120	0,39	0,96	16,58
140	0,4	1,12	17,01
160	0,41	1,29	17,43
180	0,41	1,45	17,43
200	0,41	1,61	17,43
220	0,41	1,77	17,43
240	0,41	1,93	17,43
260	0,41	2,09	17,43
280	0,41	2,25	17,43
300	0,41	2,41	17,43
320	0,41	2,57	17,43
340	0,41	2,73	17,43
360	0,41	2,89	17,43
380	0,41	3,05	17,43
400	0,41	3,21	17,43
420	0,41	3,37	17,43
440	0,41	3,53	17,43
460	0,41	3,69	17,43
480	0,41	3,86	17,43
500	0,41	4,02	17,43
520	0,41	4,18	17,43
540	0,41	4,34	17,43
560	0,41	4,50	17,43
580	0,41	4,66	17,43
600	0,41	4,82	17,43
620	0,41	4,98	17,43
640	0,41	5,14	17,43
650	0,41	5,22	17,43
680	0,41	5,46	17,43

OPTIMIZACIÓN DE MATERIAL EMPLEADO EN LA FABRICACIÓN ADITIVA DE
RESINA FOTOCURABLE MEDIANTE VARIACIÓN DE PARÁMETROS DE IMPRESIÓN

700	0,41	5,62	17,43
720	0,41	5,78	17,43
740	0,41	5,94	17,43
760	0,41	6,10	17,43
780	0,41	6,27	17,43
800	0,41	6,43	17,43
820	0,41	6,59	17,43
840	0,41	6,75	17,43
860	0,41	6,91	17,43
880	0,41	7,07	17,43
900	0,41	7,23	17,43
920	0,41	7,39	17,43
940	0,41	7,55	17,43
960	0,41	7,71	17,43
980	0,41	7,87	17,43
1000	0,41	8,03	17,43
1020	0,41	8,19	17,43
1040	0,41	8,35	17,43
1060	0,41	8,51	17,43
1080	0,41	8,67	17,43
1100	0,41	8,84	17,43
1120	0,41	9,00	17,43
1140	0,41	9,16	17,43
1160	0,41	9,32	17,43
1180	0,41	9,48	17,43
1200	0,41	9,64	17,43
1220	0,41	9,80	17,43
1240	0,41	9,96	17,43
1260	0,41	10,12	17,43
1280	0,41	10,28	17,43
1300	0,41	10,44	17,43
1320	0,41	10,60	17,43
1340	0,41	10,76	17,43
1360	0,41	10,92	17,43
1380	0,41	11,08	17,43
1400	0,41	11,24	17,43
1420	0,41	11,41	17,43
1440	0,41	11,57	17,43
1460	0,41	11,73	17,43
1480	0,41	11,89	17,43
1500	0,41	12,05	17,43
1520	0,41	12,21	17,43
1525	0	12,25	0,00

Tabla A1-0-17 Datos extraídos del segundo ensayo con la Probeta 6

P6 Ensayo 3			
Deformación	Fuerza (KN)	Deformación %	Tensión (Mpa)
10	0,18	0,08	7,65
20	0,2	0,16	8,50
30	0,24	0,24	10,20
40	0,28	0,32	11,90
50	0,31	0,40	13,18
60	0,34	0,48	14,46
70	0,37	0,56	15,73
80	0,4	0,64	17,01
90	0,42	0,72	17,86
100	0,43	0,80	18,28
110	0,44	0,88	18,71
120	0,44	0,96	18,71
140	0,44	1,12	18,71
160	0,44	1,29	18,71
180	0,44	1,45	18,71
200	0,44	1,61	18,71
220	0,44	1,77	18,71
240	0,44	1,93	18,71
260	0,44	2,09	18,71
280	0,44	2,25	18,71
300	0,44	2,41	18,71
320	0,44	2,57	18,71
340	0,44	2,73	18,71
360	0,44	2,89	18,71
380	0,44	3,05	18,71
400	0,44	3,21	18,71
420	0,44	3,37	18,71
440	0,44	3,53	18,71
460	0,44	3,69	18,71
480	0,44	3,86	18,71
500	0,44	4,02	18,71
520	0,44	4,18	18,71
540	0,44	4,34	18,71
560	0,44	4,50	18,71
580	0,44	4,66	18,71
600	0,44	4,82	18,71
620	0,44	4,98	18,71
640	0,44	5,14	18,71
650	0,44	5,22	18,71
680	0,44	5,46	18,71
700	0,44	5,62	18,71
720	0,44	5,78	18,71
740	0,44	5,94	18,71
760	0,44	6,10	18,71
780	0,44	6,27	18,71

OPTIMIZACIÓN DE MATERIAL EMPLEADO EN LA FABRICACIÓN ADITIVA DE
RESINA FOTOCURABLE MEDIANTE VARIACIÓN DE PARÁMETROS DE IMPRESIÓN

800	0,44	6,43	18,71
820	0,44	6,59	18,71
840	0,44	6,75	18,71
860	0,44	6,91	18,71
880	0,44	7,07	18,71
900	0,44	7,23	18,71
920	0,44	7,39	18,71
940	0,44	7,55	18,71
960	0,44	7,71	18,71
980	0,44	7,87	18,71
1000	0,44	8,03	18,71
1020	0,44	8,19	18,71
1040	0,44	8,35	18,71
1060	0,44	8,51	18,71
1080	0,44	8,67	18,71
1100	0,44	8,84	18,71
1120	0,44	9,00	18,71
1140	0,44	9,16	18,71
1160	0,44	9,32	18,71
1180	0,44	9,48	18,71
1200	0,44	9,64	18,71
1220	0,44	9,80	18,71
1240	0,44	9,96	18,71
1250	0,44	10,04	18,71
1255	0	10,08	0,00

Tabla A1-0-18 Datos extraídos del tercer ensayo con la Probeta

g) Valores correspondientes a la Probeta 7:

P7 Ensayo 1			
Deformación	Fuerza (KN)	Deformación %	Tensión (Mpa)
10	0,19	0,08	8,08
20	0,23	0,16	9,78
30	0,27	0,24	11,48
40	0,31	0,32	13,18
50	0,35	0,40	14,88
60	0,39	0,48	16,58
70	0,42	0,56	17,86
80	0,43	0,64	18,28
90	0,44	0,72	18,71
100	0,45	0,80	19,13
110	0,45	0,88	19,13
120	0,45	0,96	19,13
140	0,45	1,12	19,13
160	0,45	1,29	19,13
170	0	1,37	0,00

Tabla A1-0-19 Datos extraídos del primer ensayo con la Probeta 7

P7 Ensayo 2			
Deformación	Fuerza (KN)	Deformación %	Tensión (Mpa)
10	0,15	0,08	6,38
20	0,2	0,16	8,50
30	0,24	0,24	10,20
40	0,28	0,32	11,90
50	0,31	0,40	13,18
60	0,34	0,48	14,46
70	0,37	0,56	15,73
80	0,4	0,64	17,01
90	0,43	0,72	18,28
100	0,45	0,80	19,13
110	0,47	0,88	19,98
120	0,48	0,96	20,41
140	0,49	1,12	20,83
160	0,5	1,29	21,26
180	0,5	1,45	21,26
200	0,5	1,61	21,26
220	0,5	1,77	21,26
240	0,5	1,93	21,26
260	0,5	2,09	21,26
280	0,5	2,25	21,26
300	0,5	2,41	21,26
320	0,5	2,57	21,26
340	0,5	2,73	21,26

OPTIMIZACIÓN DE MATERIAL EMPLEADO EN LA FABRICACIÓN ADITIVA DE
RESINA FOTOCURABLE MEDIANTE VARIACIÓN DE PARÁMETROS DE IMPRESIÓN

360	0,5	2,89	21,26
380	0,5	3,05	21,26
400	0,5	3,21	21,26
420	0,5	3,37	21,26
440	0,5	3,53	21,26
460	0,5	3,69	21,26
480	0,5	3,86	21,26
500	0,5	4,02	21,26
520	0,5	4,18	21,26
540	0,5	4,34	21,26
560	0,5	4,50	21,26
580	0,5	4,66	21,26
600	0,5	4,82	21,26
620	0,5	4,98	21,26
640	0,5	5,14	21,26
650	0,5	5,22	21,26
680	0,5	5,46	21,26
700	0,5	5,62	21,26
720	0,5	5,78	21,26
740	0,5	5,94	21,26
760	0,5	6,10	21,26
780	0,5	6,27	21,26
790	0	6,35	0

Tabla A1-0-20 Datos extraídos en el segundo ensayo con la Probeta 7

P7 Ensayo 3			
Deformación	Fuerza (KN)	Deformación %	Tensión (Mpa)
10	0,18	0,08	7,65
20	0,2	0,16	8,50
30	0,24	0,24	10,20
40	0,27	0,32	11,48
50	0,3	0,40	12,76
60	0,33	0,48	14,03
70	0,36	0,56	15,31
80	0,39	0,64	16,58
90	0,41	0,72	17,43
100	0,43	0,80	18,28
110	0,44	0,88	18,71
120	0,45	0,96	19,13
140	0,46	1,12	19,56
160	0,47	1,29	19,98
180	0,47	1,45	19,98
200	0,47	1,61	19,98
220	0,47	1,77	19,98
240	0,47	1,93	19,98
260	0,47	2,09	19,98

280	0,47	2,25	19,98
300	0,47	2,41	19,98
320	0,47	2,57	19,98
340	0,47	2,73	19,98
360	0,47	2,89	19,98
380	0,47	3,05	19,98
400	0,47	3,21	19,98
420	0,47	3,37	19,98
440	0,47	3,53	19,98
460	0,47	3,69	19,98
480	0,47	3,86	19,98
500	0,47	4,02	19,98
520	0,47	4,18	19,98
540	0,47	4,34	19,98
560	0,47	4,50	19,98
580	0,47	4,66	19,98
600	0,47	4,82	19,98
620	0,47	4,98	19,98
640	0,47	5,14	19,98
650	0,47	5,22	19,98
680	0,47	5,46	19,98
700	0,47	5,62	19,98
720	0,47	5,78	19,98
740	0,47	5,94	19,98
760	0,47	6,10	19,98
780	0,47	6,27	19,98
800	0,47	6,43	19,98
810	0	6,51	0,00

Tabla A1-0-21 Datos extraídos del tercer ensayo con la Probeta 7

h) Valores correspondientes a la Probeta 8:

P8 Ensayo 1			
Deformación	Fuerza (KN)	Deformación %	Tensión (Mpa)
10	0,18	0,08	7,65
20	0,2	0,16	8,50
30	0,23	0,24	9,78
40	0,25	0,32	10,63
50	0,27	0,40	11,48
60	0,28	0,48	11,90
70	0,3	0,56	12,76
80	0,32	0,64	13,61
90	0,34	0,72	14,46
100	0,36	0,80	15,31
110	0,38	0,88	16,16
120	0,4	0,96	17,01
140	0,41	1,12	17,43
160	0,42	1,29	17,86
180	0,43	1,45	18,28
200	0,43	1,61	18,28
220	0,43	1,77	18,28
240	0,43	1,93	18,28
260	0,43	2,09	18,28
280	0,43	2,25	18,28
300	0,43	2,41	18,28
320	0,43	2,57	18,28
340	0,43	2,73	18,28
360	0,43	2,89	18,28
380	0,43	3,05	18,28
400	0,43	3,21	18,28
420	0,43	3,37	18,28
440	0,43	3,53	18,28
460	0,43	3,69	18,28
480	0,43	3,86	18,28
500	0,43	4,02	18,28
520	0,43	4,18	18,28
540	0,43	4,34	18,28
560	0,43	4,50	18,28
580	0,43	4,66	18,28
600	0,43	4,82	18,28
620	0,43	4,98	18,28
640	0,43	5,14	18,28
650	0,43	5,22	18,28
680	0,43	5,46	18,28
700	0,43	5,62	18,28
720	0,43	5,78	18,28

740	0,43	5,94	18,28
760	0,43	6,10	18,28
780	0,43	6,27	18,28
800	0,43	6,43	18,28
820	0,00	6,59	0,00

Tabla A1-0-22 Datos extraídos del primer ensayo con la Probeta 8

P8 Ensayo 2			
Deformación	Fuerza (KN)	Deformación %	Tensión (Mpa)
10	0,22	0,08	9,35
20	0,25	0,16	10,63
30	0,28	0,24	11,90
40	0,31	0,32	13,18
50	0,34	0,40	14,46
60	0,37	0,48	15,73
70	0,39	0,56	16,58
80	0,41	0,64	17,43
90	0,43	0,72	18,28
100	0,44	0,80	18,71
110	0,45	0,88	19,13
120	0,45	0,96	19,13
140	0,45	1,12	19,13
160	0,45	1,29	19,13
180	0,45	1,45	19,13
200	0,45	1,61	19,13
220	0,45	1,77	19,13
240	0,45	1,93	19,13
260	0,45	2,09	19,13
280	0,45	2,25	19,13
300	0,45	2,41	19,13
320	0,45	2,57	19,13
340	0,45	2,73	19,13
360	0,45	2,89	19,13
380	0,45	3,05	19,13
400	0,45	3,21	19,13
420	0,45	3,37	19,13
440	0,45	3,53	19,13
460	0,45	3,69	19,13
480	0,45	3,86	19,13
500	0,45	4,02	19,13
520	0,45	4,18	19,13
540	0,45	4,34	19,13
560	0,45	4,50	19,13
580	0,45	4,66	19,13
600	0,45	4,82	19,13
620	0,45	4,98	19,13

OPTIMIZACIÓN DE MATERIAL EMPLEADO EN LA FABRICACIÓN ADITIVA DE
RESINA FOTOCURABLE MEDIANTE VARIACIÓN DE PARÁMETROS DE IMPRESIÓN

640	0,45	5,14	19,13
650	0,45	5,22	19,13
680	0,45	5,46	19,13
700	0,45	5,62	19,13
720	0,45	5,78	19,13
740	0,45	5,94	19,13
760	0,45	6,10	19,13
780	0,45	6,27	19,13
800	0,45	6,43	19,13
820	0,45	6,59	19,13
840	0,45	6,75	19,13
860	0,45	6,91	19,13
880	0,45	7,07	19,13
900	0,45	7,23	19,13
920	0,45	7,39	19,13
940	0,45	7,55	19,13
960	0,45	7,71	19,13
975	0,00	7,83	0,00

Tabla A1-0-23 Datos extraídos del segundo ensayo con la Probeta 8

P8 Ensayo 3			
Deformación	Fuerza (KN)	Deformación %	Tensión (Mpa)
10	0,2	0,08	8,50
20	0,23	0,16	9,78
30	0,27	0,24	11,48
40	0,3	0,32	12,76
50	0,32	0,40	13,61
60	0,34	0,48	14,46
70	0,36	0,56	15,31
80	0,38	0,64	16,16
90	0,4	0,72	17,01
100	0,41	0,80	17,43
110	0,42	0,88	17,86
120	0,43	0,96	18,28
140	0,43	1,12	18,28
160	0,43	1,29	18,28
180	0,43	1,45	18,28
200	0,43	1,61	18,28
220	0,43	1,77	18,28
240	0,43	1,93	18,28
260	0,43	2,09	18,28
280	0,43	2,25	18,28
300	0,43	2,41	18,28
320	0,43	2,57	18,28
340	0,43	2,73	18,28
360	0,43	2,89	18,28

380	0,43	3,05	18,28
400	0,43	3,21	18,28
420	0,43	3,37	18,28
440	0,43	3,53	18,28
460	0,43	3,69	18,28
480	0,43	3,86	18,28
500	0,43	4,02	18,28
520	0,43	4,18	18,28
540	0,43	4,34	18,28
560	0,43	4,50	18,28
580	0,43	4,66	18,28
600	0,43	4,82	18,28
620	0,43	4,98	18,28
640	0,43	5,14	18,28
650	0,43	5,22	18,28
680	0,43	5,46	18,28
700	0,43	5,62	18,28
720	0,43	5,78	18,28
740	0,43	5,94	18,28
760	0,43	6,10	18,28
780	0,43	6,27	18,28
800	0,43	6,43	18,28
820	0,43	6,59	18,28
840	0,43	6,75	18,28
860	0,43	6,91	18,28
880	0,43	7,07	18,28
900	0,43	7,23	18,28
920	0,43	7,39	18,28
940	0,43	7,55	18,28
960	0,43	7,71	18,28
980	0,43	7,87	18,28
1000	0,43	8,03	18,28
1020	0,43	8,19	18,28
1040	0,43	8,35	18,28
1055	0,00	8,47	0,00

Tabla A1-0-24 Datos extraídos del tercer ensayo con la Probeta

i) **Valores correspondientes a la Probeta 9:**

P9 Ensayo 1			
Deformación	Fuerza (KN)	Deformación %	Tensión (Mpa)
10	0,19	0,08	8,08
20	0,22	0,16	9,35
30	0,25	0,24	10,63
40	0,27	0,32	11,48
50	0,29	0,40	12,33
60	0,31	0,48	13,18
70	0,33	0,56	14,03
80	0,35	0,64	14,88
90	0,37	0,72	15,73
100	0,39	0,80	16,58
110	0,41	0,88	17,43
120	0,43	0,96	18,28
140	0,45	1,12	19,13
160	0,47	1,29	19,98
180	0,48	1,45	20,41
200	0,48	1,61	20,41
220	0,48	1,77	20,41
240	0,48	1,93	20,41
260	0,48	2,09	20,41
280	0,48	2,25	20,41
300	0,48	2,41	20,41
320	0,48	2,57	20,41
340	0,48	2,73	20,41
360	0,48	2,89	20,41
380	0,48	3,05	20,41
400	0,48	3,21	20,41
420	0,48	3,37	20,41
440	0,48	3,53	20,41
460	0,48	3,69	20,41
480	0,48	3,86	20,41
500	0,48	4,02	20,41
520	0,48	4,18	20,41
540	0,48	4,34	20,41
555	0	4,46	0,00

Tabla A1-0-25 Datos extraídos del primer ensayo con la Probeta 9

P9 Ensayo 2			
Deformación	Fuerza (KN)	Deformación %	Tensión (Mpa)
10	0,2	0,08	8,50
20	0,25	0,16	10,63
30	0,28	0,24	11,90

40	0,31	0,32	13,18
50	0,33	0,40	14,03
60	0,35	0,48	14,88
70	0,37	0,56	15,73
80	0,39	0,64	16,58
90	0,4	0,72	17,01
100	0,41	0,80	17,43
110	0,42	0,88	17,86
120	0,42	0,96	17,86
140	0,42	1,12	17,86
160	0,42	1,29	17,86
180	0,42	1,45	17,86
200	0,42	1,61	17,86
220	0,42	1,77	17,86
240	0,42	1,93	17,86
260	0,42	2,09	17,86
280	0,42	2,25	17,86
300	0,42	2,41	17,86
320	0,42	2,57	17,86
340	0,42	2,73	17,86
360	0,42	2,89	17,86
380	0,42	3,05	17,86
400	0,42	3,21	17,86
420	0,42	3,37	17,86
440	0,42	3,53	17,86
460	0,42	3,69	17,86
480	0,42	3,86	17,86
500	0,42	4,02	17,86
520	0,42	4,18	17,86
540	0,42	4,34	17,86
560	0,42	4,50	17,86
580	0,42	4,66	17,86
600	0,42	4,82	17,86
620	0,42	4,98	17,86
640	0,42	5,14	17,86
650	0,42	5,22	17,86
680	0,42	5,46	17,86
700	0,42	5,62	17,86
720	0,42	5,78	17,86
740	0,42	5,94	17,86
760	0,42	6,10	17,86
780	0,42	6,27	17,86
800	0,42	6,43	17,86
820	0,42	6,59	17,86
840	0,42	6,75	17,86
860	0,42	6,91	17,86
880	0,42	7,07	17,86

900	0,42	7,23	17,86
920	0,42	7,39	17,86
940	0,42	7,55	17,86
960	0,42	7,71	17,86
980	0,42	7,87	17,86
1000	0,42	8,03	17,86
1020	0,42	8,19	17,86
1040	0,42	8,35	17,86
1060	0,42	8,51	17,86
1080	0,42	8,67	17,86
1100	0,42	8,84	17,86
1120	0,42	9,00	17,86
1125	0	9,04	0,00

Tabla A1-0-26 Datos extraídos del segundo ensayo con la Probeta 9

P9 Ensayo 3			
Deformación	Fuerza (KN)	Deformación %	Tensión (Mpa)
10	0,2	0,08	8,50
20	0,25	0,16	10,63
30	0,29	0,24	12,33
40	0,32	0,32	13,61
50	0,35	0,40	14,88
60	0,38	0,48	16,16
70	0,4	0,56	17,01
80	0,42	0,64	17,86
90	0,43	0,72	18,28
100	0,44	0,80	18,71
110	0,45	0,88	19,13
120	0,46	0,96	19,56
140	0,46	1,12	19,56
160	0,46	1,29	19,56
180	0,46	1,45	19,56
200	0,46	1,61	19,56
220	0,46	1,77	19,56
240	0,46	1,93	19,56
260	0,46	2,09	19,56
280	0,46	2,25	19,56
300	0,46	2,41	19,56
320	0,46	2,57	19,56
340	0,46	2,73	19,56
360	0,46	2,89	19,56
370	0	2,97	0,00

Tabla A1-0-27 Datos extraídos del tercer ensayo con la Probeta 9

j) Valores correspondientes a la Probeta 10:

P10 Ensayo 1			
Deformación	Fuerza	Deformación %	Tensión (Mpa)
10	0,18	0,08	7,65
20	0,23	0,16	9,78
30	0,27	0,24	11,48
40	0,35	0,32	14,88
50	0,42	0,40	17,86
60	0,48	0,48	20,41
70	0,52	0,56	22,11
80	0,52	0,64	22,11
90	0,52	0,72	22,11
100	0,52	0,80	22,11
110	0,52	0,88	22,11
120	0,52	0,96	22,11
140	0,52	1,12	22,11
160	0,52	1,29	22,11
180	0,52	1,45	22,11
200	0,52	1,61	22,11
220	0,52	1,77	22,11
240	0,52	1,93	22,11
260	0,52	2,09	22,11
280	0,52	2,25	22,11
300	0,52	2,41	22,11
320	0,52	2,57	22,11
340	0,52	2,73	22,11
360	0,52	2,89	22,11
380	0,52	3,05	22,11
400	0,52	3,21	22,11
420	0,52	3,37	22,11
440	0,52	3,53	22,11
460	0,52	3,69	22,11
480	0,52	3,86	22,11
500	0,52	4,02	22,11
520	0,52	4,18	22,11
540	0,52	4,34	22,11
560	0,52	4,50	22,11
580	0,52	4,66	22,11
600	0,52	4,82	22,11
620	0,52	4,98	22,11
640	0,52	5,14	22,11
660	0,52	5,30	22,11
680	0,52	5,46	22,11
700	0,52	5,62	22,11
720	0,52	5,78	22,11

740	0,52	5,94	22,11
760	0,52	6,10	22,11
780	0,52	6,27	22,11
800	0,52	6,43	22,11
820	0,52	6,59	22,11
840	0,52	6,75	22,11
860	0,52	6,91	22,11
880	0,52	7,07	22,11
900	0,52	7,23	22,11
920	0,52	7,39	22,11
940	0,52	7,55	22,11
960	0	7,71	0

Tabla A1-0-28 Datos extraídos del primer ensayo con la Probeta 10

P10 Ensayo 2			
Deformación	Fuerza	Deformación %	Tensión (Mpa)
10	0,19	0,08	8,08
20	0,24	0,16	10,20
30	0,3	0,24	12,76
40	0,35	0,32	14,88
50	0,41	0,40	17,43
60	0,45	0,48	19,13
70	0,47	0,56	19,98
80	0,49	0,64	20,83
90	0,5	0,72	21,26
100	0,51	0,80	21,68
110	0,52	0,88	22,11
120	0,52	0,96	22,11
140	0,53	1,12	22,53
160	0,53	1,29	22,53
180	0,53	1,45	22,53
200	0,53	1,61	22,53
220	0,53	1,77	22,53
240	0,53	1,93	22,53
260	0,53	2,09	22,53
280	0,53	2,25	22,53
300	0,53	2,41	22,53
320	0,53	2,57	22,53
340	0,53	2,73	22,53
360	0,53	2,89	22,53
380	0,53	3,05	22,53
400	0,53	3,21	22,53
420	0,53	3,37	22,53
440	0,53	3,53	22,53
460	0,53	3,69	22,53
480	0,53	3,86	22,53

500	0,53	4,02	22,53
520	0,53	4,18	22,53
540	0,53	4,34	22,53
560	0,53	4,50	22,53
580	0,53	4,66	22,53
600	0,53	4,82	22,53
620	0,53	4,98	22,53
630	0	5,06	0,00

Tabla A1-0-29 Datos extraídos del segundo ensayo con la Probeta 10

P10 Ensayo 3			
Deformación	Fuerza	Deformación %	Tensión (Mpa)
10	0,2	0,08	8,50
20	0,25	0,16	10,63
30	0,31	0,24	13,18
40	0,37	0,32	15,73
50	0,42	0,40	17,86
60	0,47	0,48	19,98
70	0,5	0,56	21,26
80	0,52	0,64	22,11
90	0,54	0,72	22,96
100	0,54	0,80	22,96
110	0,54	0,88	22,96
120	0,54	0,96	22,96
140	0,54	1,12	22,96
160	0,54	1,29	22,96
180	0,54	1,45	22,96
200	0,54	1,61	22,96
220	0,54	1,77	22,96
240	0,54	1,93	22,96
260	0,54	2,09	22,96
280	0,54	2,25	22,96
300	0,54	2,41	22,96
320	0,54	2,57	22,96
340	0,54	2,73	22,96
360	0,54	2,89	22,96
380	0,54	3,05	22,96
400	0,54	3,21	22,96
420	0,54	3,37	22,96
440	0,54	3,53	22,96
460	0,54	3,69	22,96
480	0,54	3,86	22,96
500	0,54	4,02	22,96
520	0,54	4,18	22,96
540	0,54	4,34	22,96
560	0,54	4,50	22,96

OPTIMIZACIÓN DE MATERIAL EMPLEADO EN LA FABRICACIÓN ADITIVA DE
RESINA FOTOCURABLE MEDIANTE VARIACIÓN DE PARÁMETROS DE IMPRESIÓN

580	0,54	4,66	22,96
600	0,54	4,82	22,96
620	0,54	4,98	22,96
640	0,54	5,14	22,96
660	0,54	5,30	22,96
680	0,54	5,46	22,96
700	0,54	5,62	22,96
720	0,54	5,78	22,96
740	0,54	5,94	22,96
760	0,54	6,10	22,96
780	0,54	6,27	22,96
790	0	6,35	0

Tabla A1-0-30 Datos extraídos del tercer ensayo con la Probeta 10

ANEXO II: DATOS EXTRAÍDOS DE LOS ENSAYOS DE DUREZA

	1	2	3	4	5
AGARRES	84,5	84,25	84,25	84,75	84,5
ZONA ANCHA	84,5	85,25	85,5	85	85,25
ZONA ESTRECHA	85,5	84	85	83,5	85
MEDIA TOTAL	84,83	84,50	84,92	84,42	84,92

Tabla A2-0-1 Datos extraídos de los ensayos de dureza con las cinco primeras probetas

	6	7	8	9	10
AGARRES	85,5	85	83,5	85,5	86,75
ZONA ANCHA	85,5	85	83,75	86	86,5
ZONA ESTRECHA	84,5	84,5	83,5	85,5	86,5
MEDIA TOTAL	85,17	84,83	83,58	85,67	86,58

Tabla A2-0-2 Datos extraídos de los ensayos de dureza con las probetas 6, 7, 8, 9 y 10