ENTREGABLE E4
PROYECTOS—
2023-2024

ESTUDIO DE ESTRATEGIAS PARA MAXIMIZAR LA PRODUCTIVIDAD MINIMIZANDO LAS DEFORMACIONES EN MATERIALES POLIMÉRICOS CON TECNOLOGIAS DE FABRICACIÓN ADITIVA SLS Y LCD PARA APLICACIONES INDUSTRIALES "ESTRATOS"

Entregable: Estrategias y desarrollo de parámetros para el aumento de la productividad.

Programa: Proyectos de I+D en colaboración con empresas

Número de proyecto: 22300043

Expediente: IMDEEA/2023/15

Duración: 01/07/2023- 31/10/2024

Coordinado en AIDIMME por: Jenny Zambrano

GENERALITAT VALENCIANA
IVACE+i INSTITUTO VALENCIANO DE COMPETITIVIDAD E INNOVACIÓN
Financiado por la Unión Europea

AIDIMME
INSTITUTO TECNOLÓGICO

ÍNDICE

1 Introducción y objetivos del entregable _____ 1

1.1 Resumen del trabajo realizado _____ 3

2 Actividades realizadas _____ 4

2.1 Estudio y/o identificación de estrategias para el aumento de la productividad en materiales poliméricos con las tecnologías de fabricación aditiva SLS y LCD (T4.1) _____ 4

2.1.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA _____ 4

2.1.2 Selección de material y Estudio de estrategias para tecnología SLS _____ 7

2.1.3 Selección de material y Estudio de estrategias para tecnología LCD _____ 11

2.2 Desarrollo de parámetros siguiendo las estrategias para aumentar la productividad en tecnologías SLS y LCD (T4.2) _____ 1

2.2.1 Desarrollo de parámetros para la tecnología SLS _____ 1

2.2.2 Desarrollo de parámetros para la tecnología LCD _____ 17

2.3 Recomendaciones generales para aumento de productividad en las tecnologías de fabricación aditiva de este estudio (T4.3) _____ 35

2.3.1 Recomendaciones generales para aumento de productividad en las tecnologías de fabricación aditiva de este estudio, tecnología SLS _____ 35

2.3.2 Recomendaciones generales para aumento de productividad en las tecnologías de fabricación aditiva de este estudio, tecnología LCD. _____ 37

3 Conclusiones _____ 38

1 Introducción y objetivos del entregable

La fabricación aditiva en polímeros es un proceso de obtención de piezas en auge, debido a su capacidad para transformar materia prima en piezas en serie o a medida con muchas aplicaciones en diversos sectores.

Cuando se estudia cambiar de un proceso de fabricación convencional a un proceso de fabricación aditiva, además de buscar cumplir con los requerimientos mínimos solicitados por los clientes en función al comportamiento mecánico se considera un factor muy importante el coste de fabricación por pieza, por lo que esto justifica el estudio de mejorar la productividad del proceso.

Existen numerosos parámetros y muchos estudios en los que se ha analizado de que depende el coste de una pieza de fabricación aditiva. Entre ellos destacan los siguientes:

1. Coste de material que incluye tanto a la pieza como a los soportes, si los lleva.
2. Costes de máquina que incluye la amortización de la maquina y del equipo auxiliar que se necesita, así como la parte proporcional del mantenimiento, esto se traducirá en un coste que se le aplicará a la pieza.
3. Coste de personal que incluye el coste de los recursos humanos para la preparación de la máquina, extracción de la fabricación, tiempo del operario.
4. Otros costes donde se definen el número de piezas por ciclo de fabricación, el tiempo de fabricación de un ciclo, la ratio de producción por hora e incluso el volumen de producción total en un año.

Evaluando los costes de fabricación con los datos internos de AIDIMME se pueden observar los siguientes datos: De media en fabricación aditiva, el 15% del coste representa el coste de la materia prima, el 30% costes de personal y más del 50% los costes de máquina, de modo que la variable productividad tiene una elevada repercusión en estas tecnologías y por tanto es una gran limitante para su uso en productos comunes.

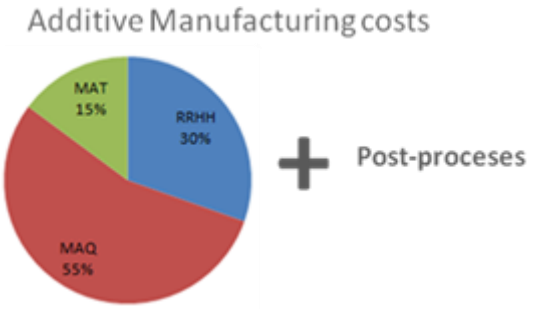

Ilustración 1.Costes de fabricación aditiva en AIDIMME

AIDIMME INSTITUTO TECNOLÓGICO
GENERALITAT VALENCIANA
IVACE+i INSTITUTO VALENCIANO DE COMPETITIVIDAD E INNOVACIÓN
Financiado por la Unión Europea

Reduciendo costes se aumenta la productividad, en las tecnologías de fabricación aditiva modificando las variables del proceso sin disminuir prestaciones mecánicas y /o morfológico-dimensionales.[1]

Los parámetros de proceso relacionados con el diseño de la pieza, material de partida, preparación de la fabricación y post proceso, influyen en la calidad final de la pieza, las propiedades mecánicas, el tiempo de fabricación y en el coste de la pieza.

Debe decirse que el hecho de aumentar la productividad implica la modificación de características de las piezas finales obtenidas, como son densidad, calidad superficial, propiedades mecánicas y control dimensional, debido a que podrían obtenerse piezas defectuosas/ deformadas/ dobladas y todo esto debe estar dentro de lo aceptable y requerido para su uso.

El objetivo general del proyecto ESTRATOS es el estudio de estrategias para maximizar la productividad minimizando las deformaciones en materiales poliméricos con tecnologías de fabricación aditiva SLS y LCD para aplicaciones industriales. Para el alcance del objetivo principal de este estudio se requieren los siguientes objetivos específicos:

1. Desarrollo de estrategias que maximicen la productividad, minimizando defectos como la deformación en la solidificación conocida como “warping”.
2. Caracterización de muestras antes y después de envejecimiento, para verificar la capacidad de estas tecnologías para su aplicación en productos finales tanto para interiores como para exteriores en materiales expuestos a la intemperie.
3. Estudio de factibilidad y/o adecuación de diferentes texturizados sobre piezas finales
4. Obtención de demostradores para diferentes aplicaciones a nivel industrial

El presente entregable está relacionado con las actividades desarrolladas en el paquete de trabajo 4, “Estudio y desarrollo de estrategias para maximizar la productividad, minimizando defectos en la fabricación (warping), con el uso las tecnologías SLS y LCD”

El objetivo de este paquete de trabajo es identificar las estrategias que permitan la obtención de piezas poliméricas de un modo más productivo, minimizando el efecto “warping” que pudiese aparecer en las tecnologías SLS y LCD de este estudio. Desarrollar los parámetros y establecer recomendaciones generales para aumentar la productividad. Para ello se han desarrollado las siguientes tareas:

[1] Douglas S. Thomas and Stanley W. Gilbert. Costs and Cost Effectiveness of Additive Manufacturing A Literature Review and Discussion. NIST Special Publication 1176. This publication is available free of charge from: http://dx.doi.org/10.6028/NIST.SP.1176

AIDIMME INSTITUTO TECNOLÓGICO
GENERALITAT VALENCIANA
IVACE+i INSTITUTO VALENCIANO DE COMPETITIVIDAD E INNOVACIÓN
Financiado por la Unión Europea

Tarea 4.1. Estudio y/o identificación de estrategias para el aumento de la productividad en materiales poliméricos con las tecnologías de fabricación aditiva SLS y LCD

Tarea 4.2. Desarrollo de parámetros siguiendo las estrategias para aumentar la productividad en tecnologías SLS y LCD

Tarea 4.3. Recomendaciones generales para aumento de productividad en las tecnologías de fabricación aditiva de este estudio

1.1 Resumen del trabajo realizado

A continuación, se muestra un resumen de las actividades técnicas del proyecto específicamente del paquete de trabajo 4:

Se ha realizado una revisión bibliográfica exhaustiva acerca de los parámetros de proceso en las tecnologías de fabricación aditiva de fusión de lecho de polvo en polímeros (PBF-LB/P), conocida como SLS y de fotopolimerización en tanque o cuba, Vat Photo Polimerization (VPP), conocido como LCD, enfocados en la optimización y en el aumento de la productividad, seleccionándose en este punto los parámetros a modificar para utilizar estrategias más eficientes y productivas de fabricación.

Se han fabricado piezas y obtenido probetas para caracterización mecánica siguiendo la estrategia propuesta de aumento del espesor de capa, fabricándose además probetas de tracción también piezas de diferentes geometrías para la verificación de la capacidad de fabricar con estos nuevos parámetros, estableciendo de manera cuantitativa los resultados obtenidos con esta implementación.

Y finalmente se dan recomendaciones generales para aumentar la productividad en las tecnologías de fabricación aditiva de este estudio.

AIDIMME INSTITUTO TECNOLÓGICO
GENERALITAT VALENCIANA
IVACE+i INSTITUTO VALENCIANO DE COMPETITIVIDAD E INNOVACIÓN
Financiado por la Unión Europea

2 Actividades realizadas

2.1 Estudio y/o identificación de estrategias para el aumento de la productividad en materiales poliméricos con las tecnologías de fabricación aditiva SLS y LCD (T4.1)

2.1.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Para aumentar la productividad nos enfocaremos en disminuir los costes asociados al proceso de fabricación, dejando fijos los referentes al equipo, materia prima y el personal. Estos costes que quedan se refieren al número de piezas por ciclo de fabricación, el tiempo de fabricación de un ciclo y la ratio de producción por hora; para este cálculo debemos conocer para las tecnologías de fabricación de este proyecto cuales son los parámetros de proceso que podemos modificar en función de su influencia y de esta manera definir las estrategias a seguir.

Cuando se habla de la tecnología de fusión de lecho de polvo en polímeros (PBF-LB/P), conocida como SLS, Wei Han *et al 2022*[2], clasifican los parámetros de proceso de esta tecnología en dos grupos principales:

Tabla 1. Parámetros del proceso PBF_LB/P

Tipo de parámetro	Parámetro	Definición
Parámetros del láser	Potencia del láser	La potencia aplicada en la zona de fabricación desde un haz láser
	Velocidad de pasada/ escaneo	La velocidad con la que un haz láser hace un vector de escaneo
	Distancia entre pasadas	La distancia entre dos escaneos paralelos
	Diámetro del haz del láser	Diámetro del haz del láser medido en la superficie del polvo.
Parámetros de construcción	Espesor de capa	La distancia que desciende el pistón en una capa, altura de capa
	Temperatura en la zona de fabricación	Temperatura controlada del polvo en la zona de fabricación
	Temperatura el polvo en los tanques	Temperatura controlada del polvo en los alimentadores

Como vemos, la tecnología de fabricación aditiva PBF_LB/P (SLS) implica numerosos parámetros de procesos que influyen en las propiedades finales de las piezas, entre

[2] Wei, H.; Kong, L.; Xu, M.; Advances in selective laser sintering of polymers. Int. J. Extrem. Manuf. 2022, 4, 042002. https://dx.doi.org/10.1088/2631-7990/ac9096

AIDIMME INSTITUTO TECNOLÓGICO GENERALITAT VALENCIANA IVACE+i INSTITUTO VALENCIANO DE COMPETITIVIDAD E INNOVACIÓN Financiado por la Unión Europea

ellos, los principales son la potencia del láser, la velocidad de pasada, la distancia de separación entre pasadas y la temperatura en la zona de fabricación (temperatura del Part bed). Optimizar estos parámetros para alcanzar las características deseadas en el producto final es complejo debido a la interrelación entre ellos. Diversos autores seleccionan un conjunto de parámetros y ven su influencia en la densificación, las propiedades mecánicas y las características de superficie y dimensionales de las piezas; han llegado incluso a utilizar procesos Gaussianos basados en aprendizaje supervisado encontrando una relación no lineal en los parámetros, también a su vez se ha utilizado la simulación numérica. A continuación, se describen estos parámetros principales y su influencia:

Potencia del láser (W): es muy importante colocar una potencia de láser adecuada, para asegurar suficiente energía de fusión mientras se evita excesiva fusión y sobrecalentamiento. Un nivel muy alto de energía promueve mejor cohesión entre las partículas, resultando en menor rugosidad superficial y disminución en el porcentaje de poros, lo que llevaría a más resistencia y dureza, pero un exceso puede producir piezas sobredimensionadas.

Velocidad de pasada (mm/s): se refiere a la velocidad con la que el láser se mueve a lo largo de la zona de fabricación. Este parámetro es importante para la calidad y exactitud de las piezas influenciadas por una distribución de energía y transferencia de calor, afecta la productividad y la resistencia. Alta velocidad puede reducir la adhesión en las partículas, pero una baja velocidad provocaría una excesiva concentración de energía.

Distancia de separación entre pasadas (mm): se refiere a la distancia entre los escaneos del láser, afecta el nivel de solape entre las pasadas y puede impactar en la densidad y resistencia de la pieza final. Si la distancia es muy baja da como resultado un sobrecalentamiento y concentración de energía excesiva que afecta adversamente la superficie.

Temperatura de la zona de fabricación (°C): juega un papel muy importante en la fusión y el sinterizado del polvo en el proceso. Cada capa que se deposita debe adherirse completamente a la capa previamente depositada, es una temperatura controlada entre la temperatura de fusión y la temperatura de cristalización. Un incremento en la temperatura de esta zona puede aumentar la densificación, pero un exceso podría ser perjudicial por producir una degradación del polímero.

Espesor de capa (mm): El espesor de capa determina la altura vertical de cada capa que es fundida. Este parámetro afecta la resolución de la parte final y se selecciona de acuerdo con el nivel de detalle deseado. Cuando se aumenta el espesor de capa, la adhesión entre las partículas disminuye, bajan las propiedades y aumenta la rugosidad.

Cuando se disminuye, se produce una disminución de la rugosidad y a más bajo espesor de capa mejores propiedades mecánicas[3].

Pilipović *et al 2018*[4]*,* enfocaron un estudio donde destacan que, en la selección de parámetros, el espesor de capa y diferentes estrategias de escaneado juegan un papel muy importante, ya que permiten acortar el tiempo y reducir el coste para fabricar un nuevo producto del inicial concepto de producción. Realizan una propuesta de modificación de parámetros incluidos la potencia del láser, la velocidad de pasada y la densidad de energía dependiendo del espesor de capa y de diferentes estrategias de escaneado tanto en contornos como en la parte interior de las piezas. La densidad de energía depende de la potencia del láser, la velocidad de pasada, de la distancia de separación de escaneo y del diámetro del haz del láser según modificaciones que han realizado a la ecuación original conocida.

En recientes investigaciones *Rahman et al 2023*[5], procesaron elastómero de poliuretano termoplástico (TPU) con la tecnología de lecho de polvo PBF-LB/P conocida como SLS, dividieron el estudio en la modificación de dos parámetros de proceso claves como son el espesor de capa y la potencia del láser, evaluando su impacto en la densidad, la dureza, módulo de elasticidad y tiempo de fabricación. Utilizaron un modelo matemático por análisis de regresión para correlacionar los datos de entrada con los de salida. Obteniendo como resultado que el tiempo de impresión disminuye con más baja potencia y mayor espesor de capa, mientras que la dureza, el módulo de elasticidad y la densidad se incrementan con disminuir el espesor de capa y aumentar la potencia. Resaltando que el espesor de capa tuvo un impacto más significativo en el tiempo de fabricación de las piezas al esperado.

Por otro lado, cuando se habla específicamente de la tecnología de Fotopolimerización en tanque o cuba (VPP), conocida como LCD, algunos autores han estudiado producir piezas con esta tecnología, enfocándose en modificar tanto el espesor de capa como el tiempo de postcurado, encontrando a través del análisis de las propiedades obtenidas a tracción, a flexión y a impacto que aumentando el espesor de la capa y minimizando el tiempo de postcurado, se pueden obtener muestras impresas con la máxima resistencia[6]

[3] Yehia, H.M.; Hamada, A.; Sebaey, T.A.; Abd-Elaziem, W. Selective Laser Sintering of Polymers: Process Parameters, Machine Learning Approaches, and Future Directions. J. Manuf. Mater. Process. 2024, 8, 197. https://doi.org/10.3390/jmmp8050197

[4] Pilipović, A.; Brajlih, T.; Drstvenšek, I. Influence of Processing Parameters on Tensile Properties of SLS Polymer Product. Polymers 2018, 10, 1208. https://doi.org/10.3390/polym10111208

[5] Rahman, M.M.; Ahmed, K.A.; Karim, M.; Hassan, J.; Roy, R.; Bustami, B.; Alam, S.M.N.; Younes, H. Optimization of Selective Laser Sintering Three-Dimensional Printing of Thermoplastic Polyurethane Elastomer: A Statistical Approach. J. Manuf. Mater. Process. 2023, 7, 144. https://doi.org/10.3390/jmmp7040144.

[6] Riyaz A. A, Mugendiran V. Effect of process parameters on mechanical properties of PLA resin through LCD 3D printing. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering. 2024;0(0). doi:10.1177/09544089231225147

Con una tecnología similar como es la DLP (procesamiento de luz digital), se pueden encontrar investigaciones donde se analiza experimentalmente el efecto del tiempo de exposición a la luz de curado UV y el espesor de las capas de un polímero de fotoresina impreso sobre algunas propiedades mecánicas relevantes como las propiedades de tracción (módulo elástico y resistencia a la tracción) y la tenacidad a la fractura. Han encontrado que aumentar el tiempo de exposición a la luz UV juega un papel relevante en la mejora de las propiedades elásticas y la resistencia del material; también encontraron que establecer un espesor de capa pequeño puede mejorar las propiedades de tracción, especialmente para los tiempos de exposición más largos. El uso de un espesor de capa demasiado grande no conduce a propiedades de tracción mecánica elevadas debido a la polimerización limitada que se produce en el material debido a su transparencia limitada, que no permite que la luz penetre profundamente en el material.[7]

Hussein et al 2023, realizaron un estudio del efecto combinado del espesor de la capa y la carga sólida, en la aplicación de tejido óseo, donde existe una posible necesidad de una matriz porosa personalizada con porosidad controlada. En estas piezas adaptadas de biocerámicos fabricadas en la tecnología de fotopolimerización LCD los principales hallazgos sugieren que una disminución del espesor de capa y aumento en la carga sólida en composición mejoran la resistencia a compresión de las piezas. Demostrando estos resultados el potencial de utilizar impresoras 3D de bajo coste en esta aplicación[8]

Se ha realizado una revisión bibliográfica para conocer distintos modos de aumentar la productividad y se han establecido las condiciones para el desarrollo de los experimentales tras el análisis de las investigaciones mencionadas. Tras esta revisión y con la experiencia de AIDIMME en procesos de fabricación aditiva por lecho de polvo (SLS) y en fotopolimerización en tanque o cuba (LCD) para polímeros, se consideró como vía principal el aumento del espesor de capa en ambas tecnologías para conseguir una mayor productividad, lo cual se describe en detalle en las siguientes tareas.

2.1.2 Selección de material y Estudio de estrategias para tecnología SLS

El equipo de tecnología Fusión de lecho de polvo en polímeros (PBF-LB/P), conocida como SLS utilizado es un equipo Lisa X de la marca Sinterit, una impresora 3D con

[7] Brighenti R., Marsavina L., Marghitas M., Montanari M., Spagnoli A., Tatar F., The effect of process parameters on mechanical characteristics of specimens obtained via DLP additive manufacturing technology, Materials Today: Proceedings, Volume 78, Part 2, 2023, Pages 331-336, ISSN 2214-7853, https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.01.092.

[8] K. Hussein, M. Elsayeh, M. Habib, N. Fatahalla, Studying the combined effect of layer thickness and solid loading percentage for improving the compressive strength of 3D printed β-TCP scaffold by LCD technique, Results in Engineering, Volume 20, 2023, 101560, ISSN 2590-1230.b. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101560

un volumen máximo de impresión de 180 x 130 x 340 (mm), equipada con un sistema de cuatro calefactores independientes capaces de mantener una temperatura hasta 180 °C y un láser de diodo de 5W que emplea un sistema de barrido tipo "Gantry". Este equipo tiene los parámetros de proceso abiertos, es decir, trae de fabrica los parámetros establecidos para los polvos poliméricos, materia prima que vende el fabricante y además brinda la opción de fabricar con otros polvos, dejando al usuario colocar los parámetros.

Selección de material: Lo primero que se ha hecho ha sido la selección del material a utilizar, para eso se dispone de un grupo de materiales suministrados por el fabricante que se pueden utilizar en este equipo, se ha resumido en la Tabla 2 las propiedades mecánicas, propiedades físicas y características generales obtenidas de las diferentes especificaciones técnicas de la página web de Sinterit [9]:

Tabla 2.Características generales de materiales poliméricos en polvo disponibles en Sinterit para el equipo Lisa X

Material	PA12-Industrial	PA11-Onyx	PA11-CF	PA11-ESD	PP	PBT-Optimal	Flexa-Performance
Módulo de tracción (MPa)	1840	1680	2950	1965	824	2718	-
Resistencia máxima a la tracción (MPa)	52,3	48	81	48	19.3	49,04	7,99
Alargamiento a la rotura (%)	7,8	55	8,19	27	44	2,55	182,63
Módulo de flexión (MPa)	1380	1420		1240	666	-	-
Resistencia a la flexión (MPa)	60,6	62	100	56	25,6	-	-
Resistencia al impacto Izod sin muescas (KJ/m^2)	29,5	179	113,65	59	30	9,18	-
Dureza (Shore D)	75	76	80	76	50	-	28
Absorción de agua (%)	0,63	0,5	0,45	0,16	0,6	3	1,265
Refresco del polvo (%)	30	33	40	60	50	20	20
Color	Gris	Negro	Negro	Gris	Gris	Negro	Gris claro
Densidad(g/cm^3)	1,03	1,03	1,1	1,03	0,9	1,238	1,05

[9] https://sinterit.com/materials/

AIDIMME INSTITUTO TECNOLÓGICO GENERALITAT VALENCIANA IVACE+i INSTITUTO VALENCIANO DE COMPETITIVIDAD E INNOVACIÓN Financiado por la Unión Europea

Los valores de módulos y resistencia a la tracción y a flexión nos indican la resistencia mecánica del material; en este aspecto el material con mayor resistencia será la PA11-CF; el alargamiento a la rotura indica cual es la capacidad de deformación del material antes de romperse bajo condiciones de tracción observándose el mayor valor para la **Flexa performance** por ser un TPU/material flexible; la resistencia al impacto nos indica la tenacidad del material, es decir, toda la energía que puede absorber antes de romperse, el mayor valor se obtiene para la PA11-ONYX, la mayor dureza la tiene la PA11-CF por su refuerzo con fibra de carbono.

Para este proyecto es de interés seleccionar un material que abarque un mercado poco o no explorado por AIDIMME, actualmente trabajamos activamente con el material PA12 para gran número de aplicaciones y se cuentan con equipos para obtener piezas rígidas fabricadas con resinas poliméricas, por lo que se ha decidido seleccionar al material **FLEXA PERFORMANCE** porque además de ser un material muy versátil para piezas flexibles, seleccionarlo para este paquete de trabajo nos ha servido para conocer a fondo al material en esta tecnología (SLS) y equipo (Lisa X), lo que nos abrirá las puertas para mercados donde AIDIMME aún no se encuentra posicionado. En la ilustración 2, puede verse un gráfico resumen de las propiedades consideradas más importantes. Otro de los factores que nos llevan a seleccionar este material y el cual es un factor muy importante en la tecnología SLS es el reúso del polvo, que en este caso se mide como el porcentaje de refresco (%), este porcentaje se define como la cantidad (%) de polvo nuevo (sin usar) que debe agregarse al polvo usado para las siguientes fabricaciones, como puede verse en la Tabla 2, el material FLEXA PERFORMANCE es uno de los que requiere menos refresco de polvo, lo cual económicamente es muy favorable.

Estudio de estrategias para la tecnología SLS: en este proceso se pueden modificar muchos parámetros, debido a que tiene la opción de parámetros abiertos, los que aparecen a continuación son los parámetros recomendados para el material Flexa Performance:

En cuanto al reparto de Polvo:

1. Espesor capa (µm): 125 µm
2. Ratio refresco: 20
3. Tiempo mínimo de capa (s): 3
4. Tiempo de espera (s): 7

En cuanto a las temperaturas de impresión:

1. Temp. PB: 119 °C
2. Temp. Cilindro: 80 °C
3. Temp. Pistón: 70 °C
4. Temp. Cámara impresión: 100 °C

AIDIMME INSTITUTO TECNOLÓGICO GENERALITAT VALENCIANA IVACE+i INSTITUTO VALENCIANO DE COMPETITIVIDAD E INNOVACIÓN Financiado por la Unión Europea

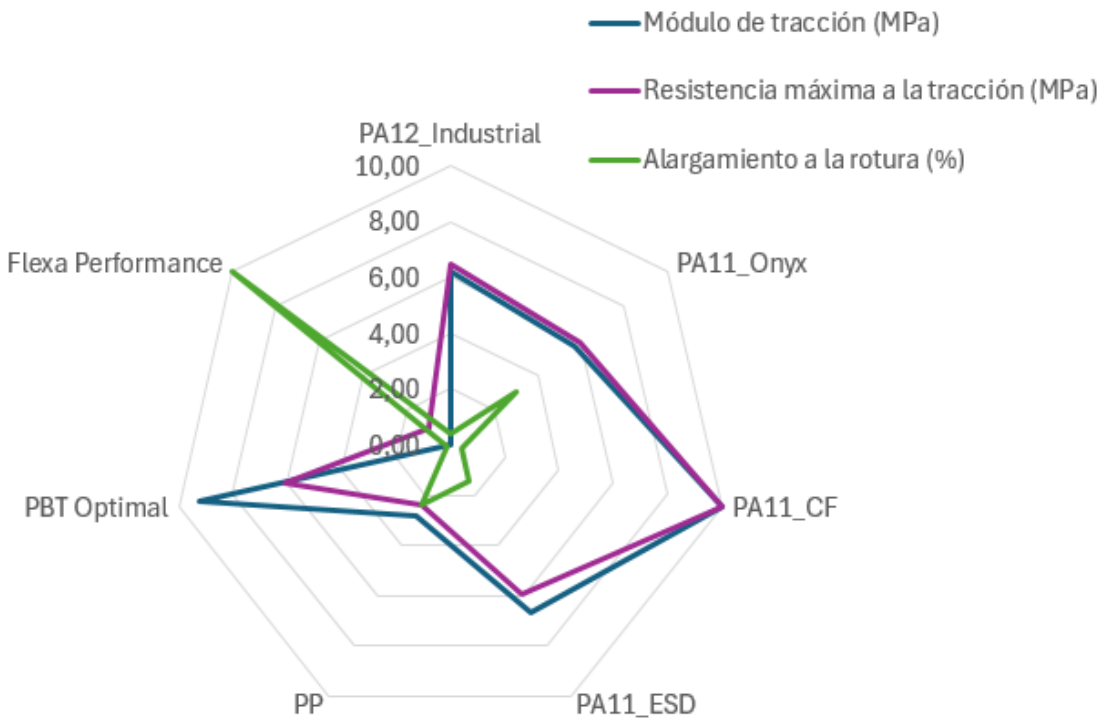

Ilustración 2. Representación de características principales de los materiales disponibles en Sinterit para el equipo Lisa X.

En cuanto a la energía aplicada con la Potencia del láser:

1. Laser Power ratio: 1
2. Escala de energía: 1
3. Max. energía por cm^3, relleno: 150
4. Constante de energía, relleno: 0.15
5. Max. Profundidad de potencia(mm), relleno: 2.3
6. Max. energía por cm^3, perímetro: 70
7. Max. Profundidad de potencia(mm), perímetro:2
8. Constante de energía, perímetro

En cuanto al Calentamiento y enfriamiento:

1. Altura de calentamiento (mm): 3
2. Tiempo de calent. aumentando Temp(s): 1800 (0.5h)
3. Altura de temperatura cte. de calentamiento (mm): 5
4. Tiempo Temp cte. de calentamiento(s): 10800(3h)
5. Altura de capa de enfriamiento (mm): 2
6. Tiempo de capa de enfriamiento(s): 750 (12.5min)
7. Tiempo de enfriamiento (s): 600 (10 min)

AIDIMME INSTITUTO TECNOLÓGICO
GENERALITAT VALENCIANA
IVACE+i INSTITUTO VALENCIANO DE COMPETITIVIDAD E INNOVACIÓN
Financiado por la Unión Europea

En cuanto al Movimiento del láser y geometría:

1. Orden de pintado: relleno primero, intercalado
2. N° perímetro: 2
3. N° relleno:2
4. Dirección relleno: alternado, ángulo cero
5. Estrategia de repetición de escaneado: Repetir la capa completa
6. Número perímetros: 1
7. Hatch spacing (mm):0.20

Los parámetros correspondientes a tiempos mínimo de capa y tiempo de espera, las temperaturas de impresión en las diferentes zonas, la energía aplicada por el láser y las etapas de calentamiento y enfriamiento están muy controlados para la obtención de piezas en Flexa Performance con propiedades mecánicas aceptables y sin defecto de doblado(warping), el valor de refresco (%) es un valor que no debería cambiarse porque está muy optimizado. Conocido todo esto, se decide modificar solo el espesor de capa (µm), pasarlo de 125 µm hasta 175 µm, esto en principio aumentará la productividad al disminuir el tiempo de fabricación, siendo ésta la estrategia a seguir. Después de la fabricación se ha realizado una verificación dimensional sencilla (no warping o doblado), verificación de propiedades mecánicas y de densificación.

2.1.3 Selección de material y Estudio de estrategias para tecnología LCD

El equipo LC Magna, es un equipo de tecnología de Fotopolimerización en tanque o cuba, Vat Photo Polimerization (VPP), conocido como LCD; con un volumen de impresión de 510 x 280 x 350mm, con una velocidad de curado de entre 2-8 s por capa de 100 µm de espesor, 16 mm por hora de impresión recomendado para imprimir grandes volúmenes de piezas y capacidad para modificar espesor de capa entre 25 y 250 µm.

La empresa fabricante *Photocentric*, tiene una gran cantidad de resinas que se pueden utilizar con este equipo, por lo que se ha realizado una tabla resumen con las propiedades mecánicas, propiedades físicas y características generales, de doce (12) de ellas que pueden considerarse para la selección, se ha colocado también la PA12 utilizada en la tecnología MJF para compararla, debido a su importancia para AIDIMME, véase la tabla 3.

En la ilustración 3, puede verse representado el módulo de tracción y módulo de flexión que describen la resistencia mecánica con valores mayores para la resina High TempDL400, el alargamiento a la rotura que describe la deformación del material antes de romperse con mayor valor lo tiene la resina FL5006 la cual es una resina flexible. La resistencia al impacto reportada mayor la tiene la resina DL110HB, los menores tiempos de impresión postcurado lo tienen las resinas DL110HB y la Durable, las resinas Durable,

AIDIMME INSTITUTO TECNOLÓGICO GENERALITAT VALENCIANA IVACE+i INSTITUTO VALENCIANO DE COMPETITIVIDAD E INNOVACIÓN Financiado por la Unión Europea

DL110Hb y Hard tienen los menores tiempos de impresión por capa. En la selección de la resina deben considerarse las propiedades mecánicas de la PA12 MJF, porque es de interés para AIDIMME ampliar el abanico de posibilidades de materiales para fabricación de piezas en tecnologías de fabricación aditiva, por lo que se busca un material con una resistencia equivalente considerando que en esta tecnología LCD las piezas que se obtienen son principalmente poliméricas rígidas.

La resina High Temp DL400 se descarta porque, aunque su resistencia mecánica es superior al resto, está resina es considerada muy frágil porque está diseñada específicamente para soportar altas temperaturas, además su tiempo de pre y postcurado es muy grande (8 y 9 h). La resina FL5006 está dentro de las resinas flexibles y con esta tecnología se ha visto la dificultad de trabajar con este tipo de resinas debido a que la fabricación se realiza subiendo la bandeja y es difícil para estas resinas soportar el peso sin deformarse durante la fabricación. Las resinas Durable, DL110HB y Hard tienen menos tiempo de impresión por capa, pero la resina durable tiene un tiene grande de postcurado (8h) por lo que se descarta. Con la resina Hard AIDIMME tiene buena experiencia de trabajo, pero es la resina **DL110HB** la que es de especial interés para AIDIMME debido a que es la que tiene mayor resistencia al impacto con resistencia superior a la PA12 MJF, por lo que es la seleccionada para este paquete de trabajo y para el Paquete de trabajo 5 (Ensayos de envejecimiento)

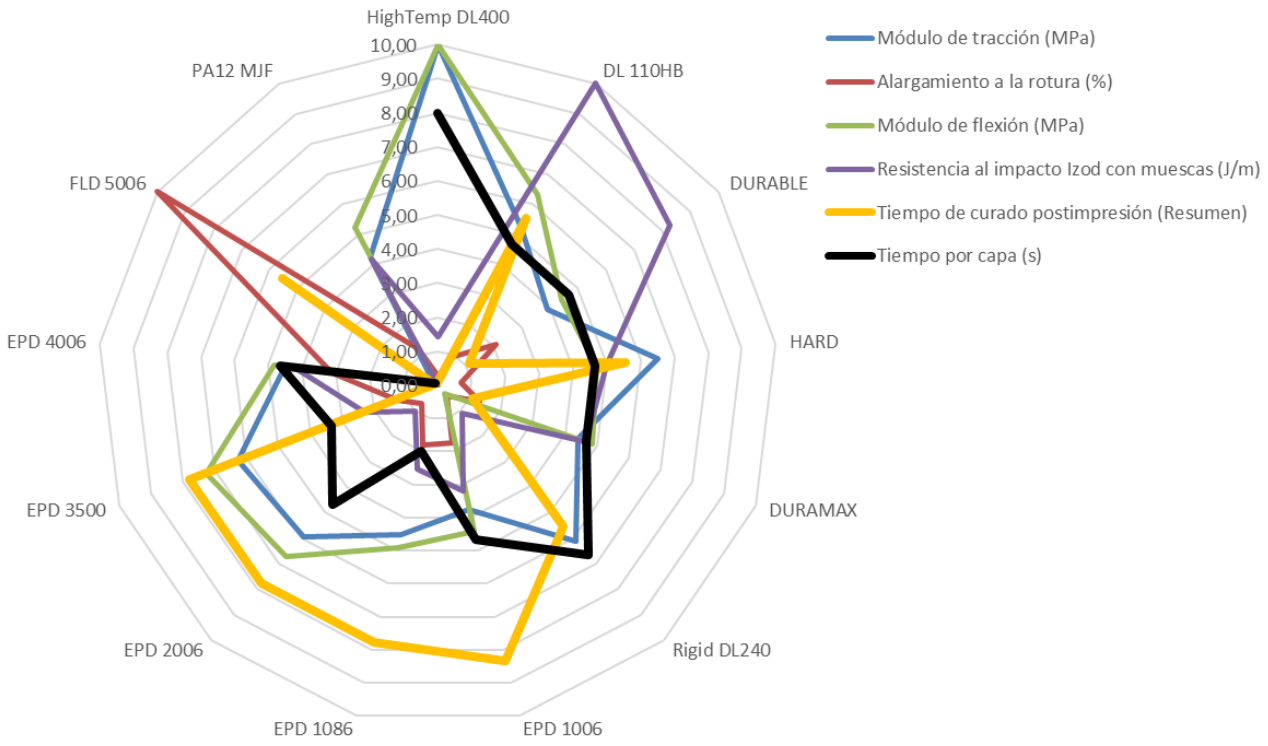

Ilustración 3.Representación de Propiedades y características generales de resinas para equipo LC Magna

AIDIMME INSTITUTO TECNOLÓGICO
GENERALITAT VALENCIANA
IVACE+i INSTITUTO VALENCIANO DE COMPETITIVIDAD E INNOVACIÓN
Financiado por la Unión Europea

Tabla 3. Características generales de Resinas para el equipo LC Magna [10]

Resina	HighTemp DL400	DURABLE 110HB	DURABLE	HARD	DURAMAX	Rigid DL240	EPD 1006	EPD 1086	EPD 2006	EPD 3500	EPD 4006	FLD 5006	PA12 MJF
Módulo de tracción (MPa)	4000	2100	1570	2600	1760	2440	1500	1810	2370	2500	1800	52,6	1700
Resistencia máxima a la tracción (MPa)	80	60	42	52	50	56,6	40	42	50	60	45	19,1	48
Alargamiento a la rotura (%)	4	14	30	10	19	6,1	25	26	10,3	18	45	144	17,5
Módulo de flexión (MPa)	3300	2080	1460	1550	1600	108	1460	1620	2210	2400	1600	N/C	1730
Resistencia a la flexión (MPa)	109	81	52	65	70	2656	52	67	90	110	70	N/C	65
Resistencia al impacto Izod con muescas (J/m)	15,6	110	91	55	51	12,2	35	28	11	25	46	N/C	46
Dureza (Shore D)	95	85	60	86	70	88	79	81	80	79	78	73	75
Absorción de agua (a corto plazo, %)	0,35	1,06	1	N/C	1,4	0,933	0,83	N/C	N/C	N/C	N/C	6,83	N/C
Densidad (g/cm^3)	1,1	1,14	1,09	1,1	1,11	1,1	1,2	1,18	1,2	-	1,18	1,07	1,01
Color	Ámbar	Negro	Negro	Negro	Negro	Roja	Negro	Negro	Negro	Ámbar	Negro	Negro	Blanca
Tiempo de curado postimpresión (resumen)	9	4	8	4	8	4	1,5	2	2	2	9	4	N/C

N/C: valor no conocido

[10] https://photocentricgroup.com/es/daylight-resins/

AIDIMME INSTITUTO TECNOLÓGICO
GENERALITAT VALENCIANA
IVACE+i INSTITUTO VALENCIANO DE COMPETITIVIDAD E INNOVACIÓN
Financiado por la Unión Europea

Estudio de estrategias para la tecnología LCD:
Los parámetros modificables en el equipo LC Magna para la tecnología LCD, son pocos y se listan a continuación, los recomendados para el material DL110 HB.

En cuanto a la fabricación completa:

- Tiempo de exposición de capa: 8000 ms
- Espesores de capa: 100 µm
- Tiempo de descanso después de la retracción/ Tiempo detenido: 1000 ms
- Distancia de elevación en Z: 10 mm
- Velocidad de elevación (desprendimiento del film): 200 mm/min
- Velocidad de retracción (Vuelta a la resina): 160 mm/min

En cuanto a las capas inferiores o iniciales de la fabricación:

- Número de capas inferiores: 5
- Tiempo de exposición de capas inferiores: 55000 ms
- Tiempo de descanso después de la retracción capas inferiores/ Tiempo detenido: 1000 ms
- Distancia de elevación en Z inferior: 5 mm
- Velocidad de elevación inferior (desprendimiento del film): 50 mm/min
- Velocidad de retracción inferior (Vuelta a la resina): 160 mm/min

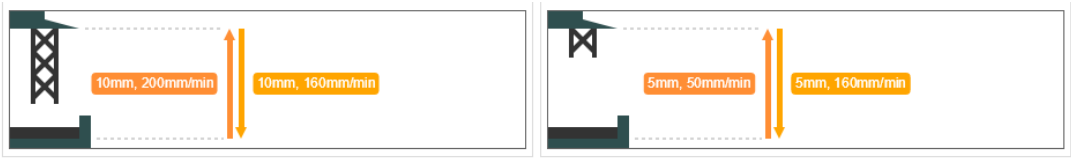

Ilustración 4.Velocidades y alturas de elevación y de retracción, en capas superiores (Izq.) e inferiores (Der.), resina DL110HB.

Hemos considerado que no es necesario modificar los parámetros de las primeras capas que se depositan (capas inferiores) debido a que deben estar muy optimizados para garantizar que las piezas comiencen a fabricarse correctamente, podrían modificarse las alturas y velocidades de elevación y retracción pero esto no garantizaría una disminución del tiempo de fabricación, por lo que se decide que la estrategia a utilizar para aumentar la productividad en esta tecnología será la de aumentar el espesor de capa desde las 100µm recomendadas hasta valores de 175 y 250 µm.

AIDIMME INSTITUTO TECNOLÓGICO
GENERALITAT VALENCIANA
IVACE+i INSTITUTO VALENCIANO DE COMPETITIVIDAD E INNOVACIÓN
Financiado por la Unión Europea

2.2 Desarrollo de parámetros siguiendo las estrategias para aumentar la productividad en tecnologías SLS y LCD (T4.2)

2.2.1 Desarrollo de parámetros para la tecnología SLS

Caracterización inicial del material FLEXA PERFORMANCE en la tecnología SLS

El primer paso que se ha realizado en este estudio es la caracterización inicial del material FLEXA PERFORMANCE con los parámetros recomendados por el fabricante del equipo, para ello se ha realizado una fabricación con la bandeja completamente llena de piezas de diferentes tamaños y se han fabricado probetas de tracción en XY y en Z, un cubo de densificación y láminas horizontales en X y en Y. En la ilustración 5 puede verse la ubicación de las probetas, cubo y láminas, así como la bandeja completa que se fabricó. Se fabrican probetas para ensayos de tracción en XY a mitad de altura de bandeja, se fabrican probetas en Z en tres alturas y tres posiciones, dando lugar a las muestras Z1 a Z9.

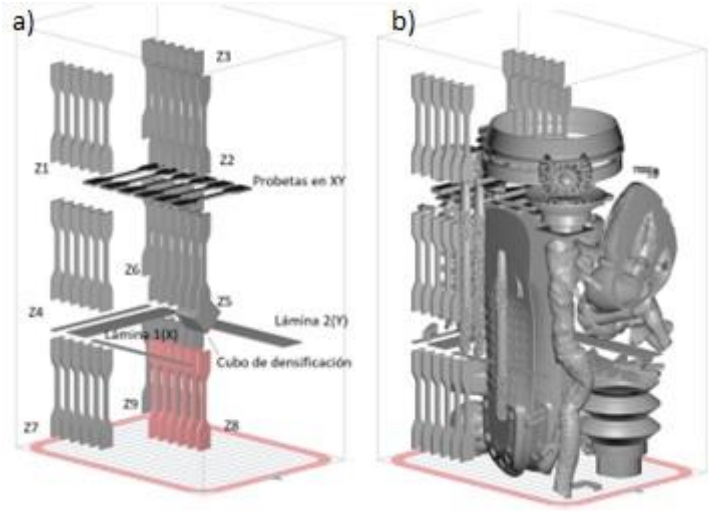

Ilustración 5.a) Ubicación de probetas en XY y en Z, cubo de densificación y láminas. b) Bandeja completa fabricada.

En la ilustración 6 se observan las piezas fabricadas, las probetas de tracción en XY presentan un pequeño reborde superior y no tienen redondeo inferior, están bien fabricadas, las probetas de tracción en Z tienen poco reborde superior y están bien en su superficie, las láminas se fabrican sin doblado (warping), doblan todas 20 veces sin romperse, las de X más fina se queda deformada después de doblarse, el cubos macizo se fabrica bien con la posición inclinado a 45°y se obtiene una densidad aproximada de

AIDIMME INSTITUTO TECNOLÓGICO
GENERALITAT VALENCIANA
IVACE+i INSTITUTO VALENCIANO DE COMPETITIVIDAD E INNOVACIÓN
Financiado por la Unión Europea

0,998 g/cm^3 determinada como masa sobre volumen, por lo que los parámetros se consideran correctos.

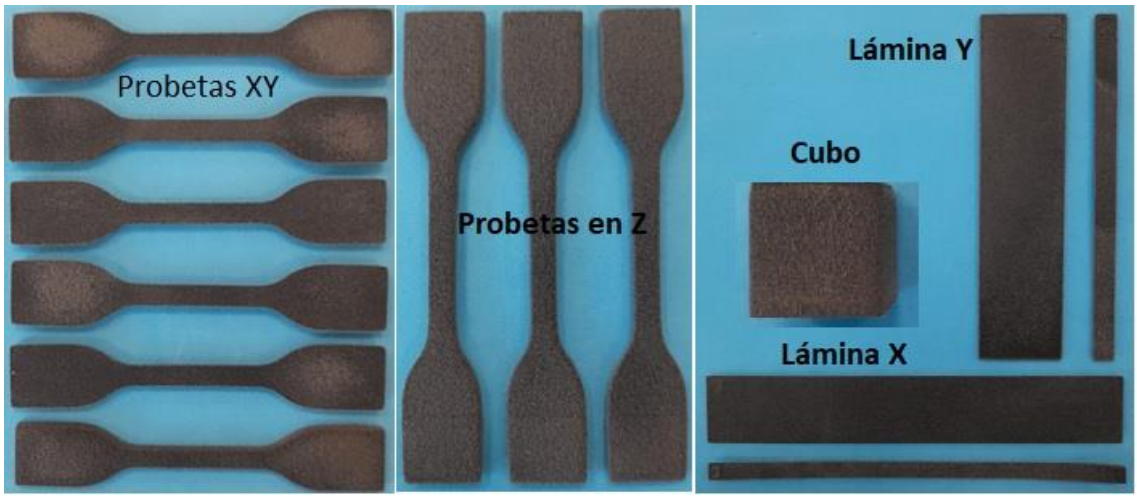

Ilustración 6.Probetas fabricadas en XY, probetas en Z, cubo y láminas, condiciones standard FLexa performance

Las probetas de tracción se han ensayado según la norma UNE ISO 37 [11], norma para elastómeros, caucho, vulcanizados o termoplásticos; los resultados se muestran en la tabla 4 y en la ilustración 7.

Tabla 4. Propiedades mecánicas determinadas en XY y en Z

	Resist. Máxima		Max Deformación	
	N/mm^2	Desv. St.	%	Desv. St.
Fabricante Sinterit (En X)	**7,99**	**-**	**182,63**[12]	**-**
XY	**9,05**	**0,42**	**273,94**	**0,42**
Altura 1: Z7	6,74	0,16	109,44	8,11
Altura 1: Z8	6,58	0,20	112,99	5,27
Altura 1: Z9	7,09	0,37	126,03	18,51
MEDIA ALTURA 1 en Z	**6,80**	**0,26**	**116,15**	**8,74**
Altura 2: Z4	5,73	0,76	70,52	17,07
Altura 2: Z5	6,08	0,14	95,30	6,85
Altura 2: Z6	6,64	0,57	97,78	22,36
MEDIA ALTURA 2 en Z	**6,15**	**0,46**	**87,86**	**15,08**
Altura 3: Z1	6,16	1,08	63,86	18,71

[11] UNE-ISO 37:2013: Elastómeros. Caucho, vulcanizados o termoplásticos. Determinación de las propiedades de esfuerzo-deformación en tracción.
[12] https://sinterit.com/materials/flexa-performance/

Altura 3: Z2	6,42	0,56	84,73	18,53
Altura 3: Z3	5,85	0,64	76,30	16,42
MEDIA ALTURA 3 en Z	**6,14**	**0,28**	**74,96**	**10,50**

Estas primeras bandejas nos sirven para establecer la cercanía que deben tener las piezas al colocarse en la bandeja y cuál debe ser su posición adecuada en XY o en Z y/o con inclinaciones.

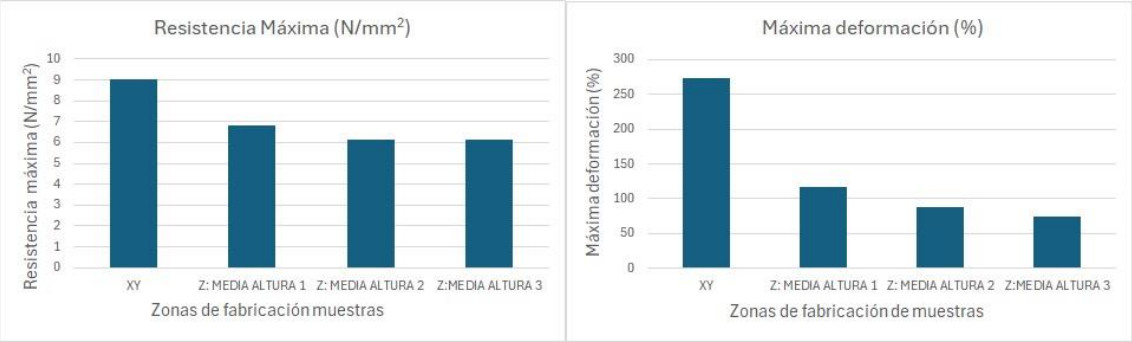

Ilustración 7. Propiedades mecánicas probetas en XY y en 3 alturas de Z, Flexa Performance, condiciones standard

Debemos comparar los resultados obtenidos en cuanto a propiedades mecánicas con los valores suministrados por el fabricante del equipo quien a su vez vende el polvo FLEXA PERFORMANCE, empresa Sinterit. En cuanto al comportamiento del material cuando las probetas se fabrican en XY, se obtiene una resistencia máxima a la tracción de 9,05 N/mm^2 valor superior al reportado por Sinterit y una deformación máxima de 273,94 % valor superior también, lo que nos indica que las propiedades de las probetas cumplen fabricadas en XY con los parámetros recomendados.

En cuanto al comportamiento en Z, se obtiene valores de resistencia máxima a la tracción inferiores a los reportados por Sinterit, pero el fabricante solo reporta las propiedades mecánicas en XY por lo que no podemos comparar con ellos y en Z normalmente se espera que la resistencia sea inferior debido a ser un proceso de deposición capa a capa; con respecto a la máxima deformación hay una disminución considerable si se compara XY con Z.

Cuando se comparan las diferentes zonas de fabricación de las probetas en Z, se tiene por un lado que la dispersión de los valores en las tres posiciones a la misma altura es pequeña y cuando se comparan las tres alturas se tiene que los valores de resistencia máxima varían poco, van desde 6,14 hasta 6,80 N/mm^2. Con respecto a la máxima deformación se observa una disminución a medida que se fabrican las piezas a mayor

AIDIMME INSTITUTO TECNOLÓGICO
GENERALITAT VALENCIANA
IVACE+i INSTITUTO VALENCIANO DE COMPETITIVIDAD E INNOVACIÓN
Financiado por la Unión Europea

altura, obteniéndose valores que van desde 116,15 hasta 74,96 %. Estos resultados son nuestro punto de partida para comparar cuando se realice la optimización de parámetros para aumento de la productividad.

Fabricación 1 para optimización de parámetros del proceso SLS:

Para la primera fabricación de optimización, se utilizaron todos los parámetros recomendados por el fabricante, modificando únicamente el espesor de capa desde 125 µm hasta 175µm. Se realizó una fabricación compuesta por láminas, probetas de tracción en XY, probetas de tracción en Z y algunas piezas demostrador-suministradas por las empresas colaboradoras, de las cuales se hablará en el paquete de trabajo 6, estas piezas nos servirán para conocer las mejores posiciones para fabricar piezas con diferentes dimensiones y complejidades. En la ilustración 8 puede verse la bandeja de fabricación.

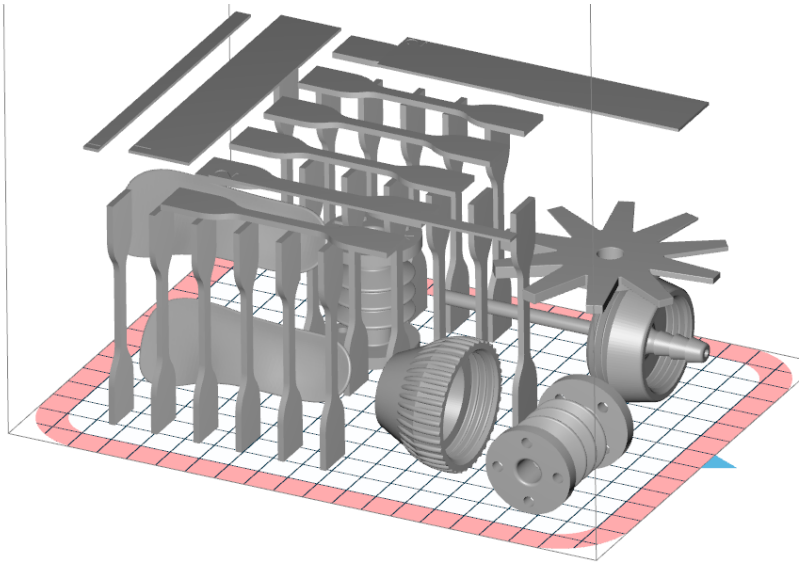

Ilustración 8. Bandeja de fabricación 1 de Optimización, espesor de capa 175µm

Las láminas 1 en X y 2 en Y salen dobladas, lo que quiere decir que piezas con tanta área no se pueden fabricar completamente horizontales, las probetas en XY y en Z se fabrican bien, las de XY tienen un pequeño borde en la parte de arriba y las de Z se observan con este reborde en las últimas capas que fabricó, pero están bien fabricadas por lo que se llevan a ensayar, ilustraciones 9 y 10.

AIDIMME INSTITUTO TECNOLÓGICO
GENERALITAT VALENCIANA
IVACE+i INSTITUTO VALENCIANO DE COMPETITIVIDAD E INNOVACIÓN
Financiado por la Unión Europea

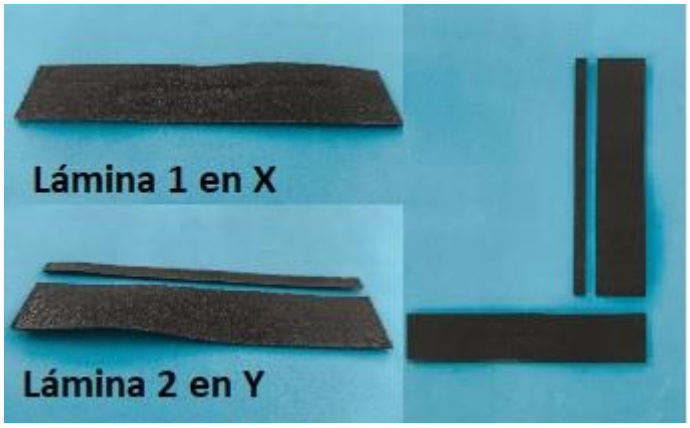

Ilustración 9. Láminas fabricadas en X y en Y, 175 µm

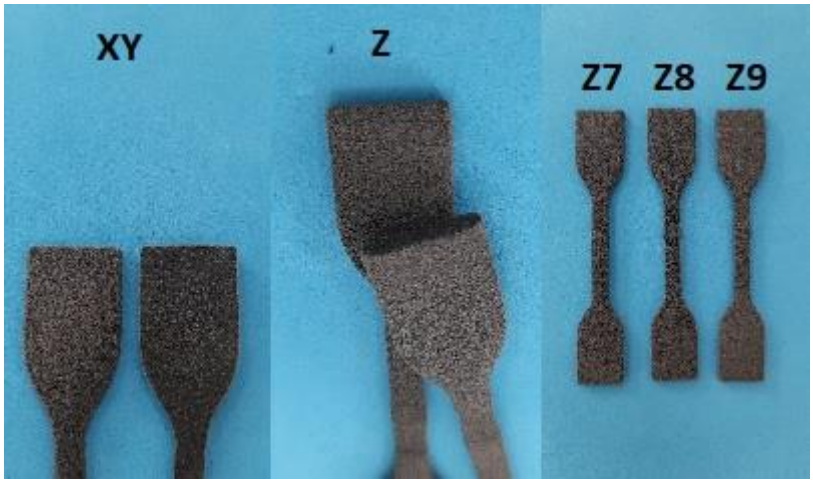

Ilustración 10. Probetas en XY y en Z

La pieza demostrador 1 de VALVER (Pincel pequeño), es una pieza con rosca y se ha fabricado en XY; ha salido con un defecto de ensanchamiento en la parte de arriba internamente. La pieza demostrador 1 (Plantillas pequeñas) de la Clínica Gironés se fabricaron dos a dos alturas, observando un rechupe/contracción en la última parte en solidificar, estas están en XY inclinadas a 45°. Las piezas demostrador 1 de Gh Electrotermia (ventosa) se fabricaron en XY y en Z, la de XY salió fabricada correctamente y la de Z salió sobredimensionada arriba y abajo, perdiendo definición de la pieza, las piezas que han salido mal se deben volver a hacer en diferente orientación, ver ilustraciones 11, 12 y 13.

AIDIMME INSTITUTO TECNOLÓGICO
GENERALITAT VALENCIANA
IVACE+i INSTITUTO VALENCIANO DE COMPETITIVIDAD E INNOVACIÓN
Financiado por la Unión Europea

Ilustración 11. Pieza demostrador 1 empresa colaboradora VALVER (Pincel pequeño) fabricada en XY, con defectos

Ilustración 12. Pieza demostrador 1 Empresa Clínica Girones (Plantilla pequeña) a 45° y estrella espesores, con defectos

Ilustración 13. Piezas demostrador 1 Empresa Gh Electrotermia (Ventosa) fabricadas en XY y en Z, con defectos

La estrella con diferentes espesores fabricada en XY salió con un sobredimensionamiento en la cara inferior por haberse fabricado horizontal completamente, ilustración 12. Se han analizado todas las piezas y se propone cambiar la posición en XY, en Z y/o ángulos para lograr piezas con dimensiones correctas en posteriores fabricaciones. Las probetas de tracción se han ensayado según la norma UNE ISO 37 [13], norma para elastómeros, caucho, vulcanizados o termoplásticos; los resultados se muestran en la tabla 5 y en la ilustración 14.

Tabla 5.Propiedades mecánicas determinadas en XY y en Z, 175 µm

	Resist. Máxima		Max Deformación	
	N/mm^2	Desv. St.	%	Desv. St.
Fabricante Sinterit (En XY)	**7,99**	**-**	**182,63**[14]	**-**
XY (125 µm)	**9,05**	**0,42**	**273,94**	**0,42**
XY (175 µm)	**7,31**	**0,43**	**246,84**	**40,99**
MEDIA ALTURA 1 en Z (125µm)	**6,80**	**0,26**	**116,15**	**8,74**
Altura 1: Z7	5,16	0,28	45,78	10,43
Altura 1: Z8	4,67	0,18	56,95	4,21
Altura 1: Z9	5,16	0,28	45,78	10,43

[13] UNE-ISO 37:2013: Elastómeros. Caucho, vulcanizados o termoplásticos. Determinación de las propiedades de esfuerzo-deformación en tracción.
[14] https://sinterit.com/materials/flexa-performance/

AIDIMME INSTITUTO TECNOLÓGICO
GENERALITAT VALENCIANA
IVACE+i INSTITUTO VALENCIANO DE COMPETITIVIDAD E INNOVACIÓN
Financiado por la Unión Europea

MEDIA ALTURA 1 en Z (175µm)	**5,00**	**0,25**	**49,51**	**8,36**

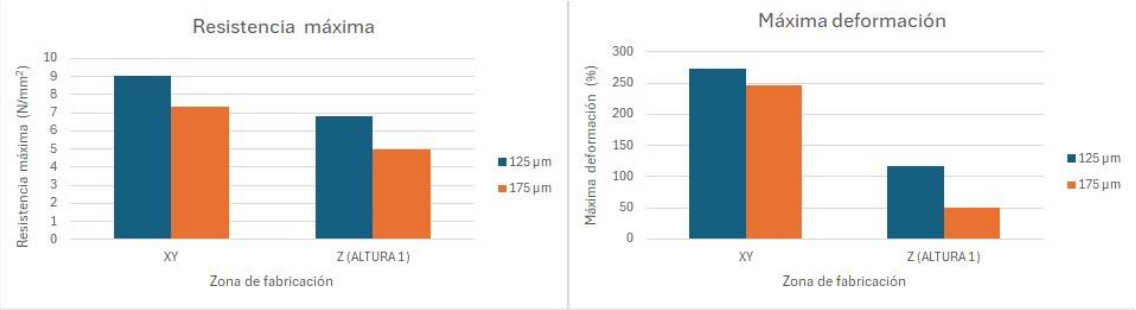

Ilustración 14.Propiedades mecánicas de probetas en XY y en Z altura 1, 125 µm y 175 µm

Como puede verse en los resultados: en XY hay una disminución de la resistencia mecánica cuando se fabrica con 175 µm de espesor de capa comparado con los valores obtenidos para 125 µm, pasando desde 9,05 hasta 7,31 N/mm^2 y la máxima deformación tuvo una pequeña disminución, en cambio en Z hay una disminución en la resistencia mecánica pasando desde 6,80 N/mm^2 hasta 5 N/mm^2 y hay una disminución en la máxima deformación desde 116,15% hasta 49,51%, lo cual es considerable. Es decir que las propiedades mecánicas disminuyen al aumentar el espesor de capa y dejar el resto de los parámetros iguales.

Fabricación 2 para optimización de parámetros del proceso SLS:

Según los resultados obtenidos en la fabricación anterior hay una disminución de las propiedades mecánicas medidas en piezas fabricadas en Z, esto era de esperarse debido a que a mayor espesor de capa el gradiente térmico entre la superficie y el final de la capa es mayor. Pero debido a nuestro interés de fabricar con este espesor de capa, se plantea una fabricación donde se le suministra más energía a las piezas con la finalidad de aumentar su densificación y por lo tanto sus propiedades mecánicas de resistencia máxima.
Parámetros de la fabricación modificados:

- Temperatura del lecho de polvo (Temperatura de PB): aumentada 1°C (120°C)
- Escala de energía (Energy scale): valores de 0.90, 0.95, 1, 1.05 y 1.10.

Los valores de Escala de energía son multiplicadores de la energía suministrada al polvo durante la fabricación, donde el 1 representa la energía suministrada recomendada por

AIDIMME INSTITUTO TECNOLÓGICO
GENERALITAT VALENCIANA
IVACE+i INSTITUTO VALENCIANO DE COMPETITIVIDAD E INNOVACIÓN
Financiado por la Unión Europea

el fabricante, un valor de 0.95 significa que se reduce en un 5% la energía y un valor de 1.05 significará que se aumenta en un 5% la energía, está disminución o aumento la realiza el equipo aumentando o disminuyendo la velocidad de barrido del láser. Esta modificación de parámetros siguió recomendaciones de la empresa Sinterit fabricante del equipo y del material. Como puede verse en la ilustración 15, la bandeja está formada por probetas de tracción en XY y en Z, piezas tipo ventosa (Demostrador 1 de Gh Electrotermia) y cubos de densificación, con las cinco condiciones definidas de Escala de energía.

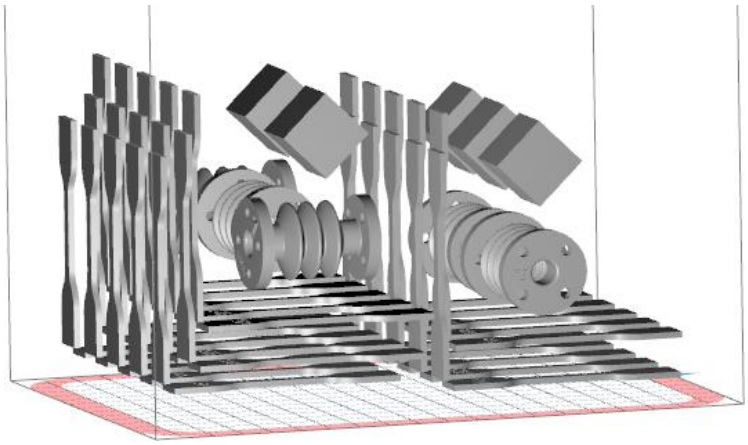

Ilustración 15. Bandeja de fabricación Material Flexa Performance, optimización 2

Durante la fabricación se observó a través de la pantalla del equipo que las probetas se estaban fabricando con exceso de energía, se veía una fusión muy grande, ilustración 16; al sacar la fabricación se observó un bloque sobresinterizado ocupando más de la mitad del lecho de polvo. Al sacar las piezas se observó un bloque entero fundido donde por la parte de abajo se ven las probetas haciendo una base de polvo que se fundió junto y las probetas dentro de un bloque entero, ilustración 17.
Según lo observado, se piensa que el aumento de la temperatura del lecho de polvo provoca un efecto muy grande en la fusión que no nos dejó ver que ocurre al modificar la densidad de energía suministrada por el láser a varias escalas de energía, por lo que se plantea una siguiente fabricación.

AIDIMME INSTITUTO TECNOLÓGICO
GENERALITAT VALENCIANA
IVACE+i INSTITUTO VALENCIANO DE COMPETITIVIDAD E INNOVACIÓN
Financiado por la Unión Europea

Ilustración 16. Probetas fabricándose y fabricación antes de sacar las piezas, Flexa Performance, 175 µm

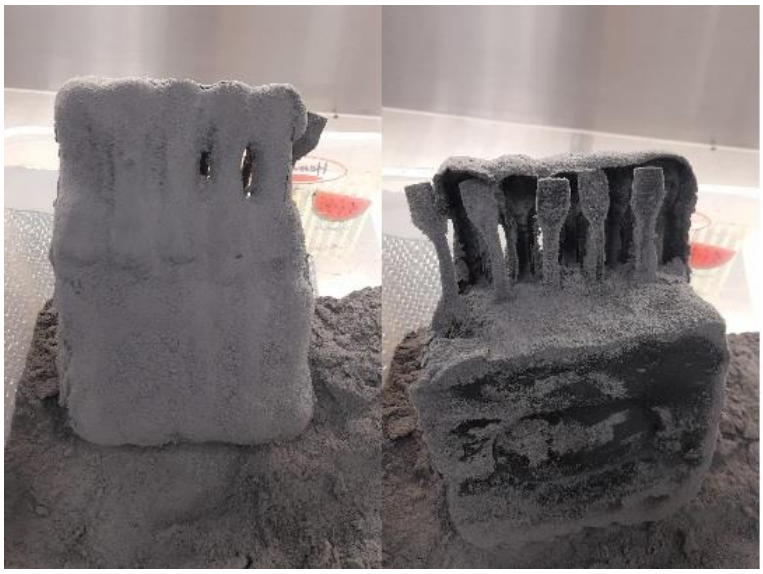

Ilustración 17. Piezas en la fabricación con Flexa performance, optimización 2

Fabricación 3 para optimización de parámetros del proceso:175 µm

Según los resultados obtenidos en la bandeja anterior, se piensa que aumentar la temperatura del lecho de polvo es demasiado y eso produjo una sobrefusión o fusión más allá de la capa que corresponde, por lo que se plantea realizar una bandeja similar, pero con la temperatura del lecho de polvo sin aumentar (119 °C) y tres escalas de energía de 0.95, 1 y 1.05. En la ilustración 18 puede verse la bandeja de fabricación, en las ilustraciones 19, 20 y 21 se observan las piezas obtenidas.

AIDIMME INSTITUTO TECNOLÓGICO
GENERALITAT VALENCIANA
IVACE+i INSTITUTO VALENCIANO DE COMPETITIVIDAD E INNOVACIÓN
Financiado por la Unión Europea

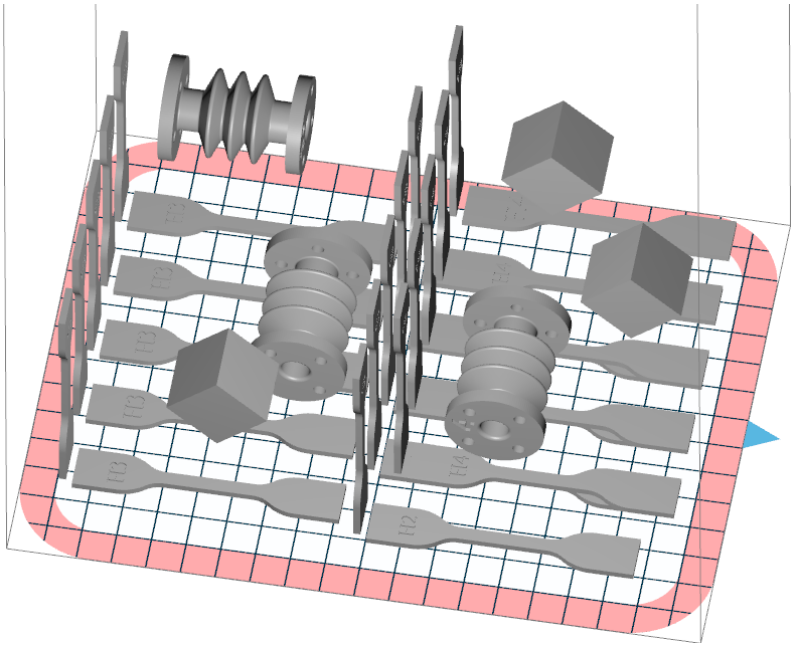

Ilustración 18. Bandeja de fabricación Material Flexa Performance, optimización 3

Con respecto a los cubos macizos se observa que si la Energía de Escala es 1.05 hay un redondeo en las caras y un sobredimensionamiento, con 0.95 y con el valor de 1 están bien fabricados, lo que quiere decir que una Energía de escala de 1.05 es muy superior a lo que se necesita para fundir el material y sobredimensiona la pieza. De manera geométrica se ha obtenido un valor de densidad en los cubos fabricados, pero debe tenerse en cuenta que tienen redondeo en por lo menos una de sus caras, por lo que este valor es muy impreciso, el valor dado por el fabricante del polvo Sinterit es de 1.05-1.11 g/cm^3; en la siguiente tabla 6 se comparan lo obtenido con el espesor de capa estándar de 125 µm y con el espesor de capa de 175 µm con varias escalas de energía. Los valores se acercan al que da el fabricante, pero se considera más importante que las dimensiones sean las del archivo STL, en este caso las de espesor de capa 175 µm se alejan.

AIDIMME INSTITUTO TECNOLÓGICO
GENERALITAT VALENCIANA
IVACE+i INSTITUTO VALENCIANO DE COMPETITIVIDAD E INNOVACIÓN
Financiado por la Unión Europea

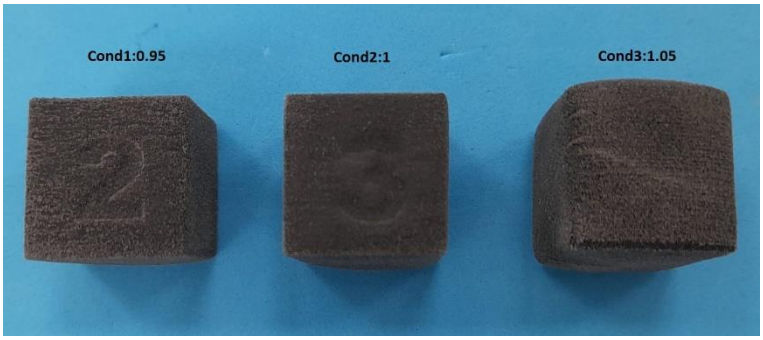

Ilustración 19. Cubos macizos de densificación, con tres condiciones de Escala de energía

Tabla 6. Densidad calculada para diferentes espesores de capa y escalas de energía

125µm	Medidas de cubos			Volumen (mm^3)	Masa (g)	Densidad (g/cm^3)
Escala de energía: 1	21,4	21,4	22,03	10093,57	10,07	0,998
175µm	**Medidas de cubos**			**Volumen (mm^3)**	**Masa (g)**	**Densidad (g/cm^3)**
Escala de energía: 0.95	20,8	20,53	20,87	8903,42	9,45	1,062
Escala de energía: 1	21,3	21,3	22	9995,24	10,44	1,044
Escala de energía: 1.05	22,5	22,43	22,52	11385,49	11,16	0,980

Al observar las ventosas puede verse que se han fabricado muy parecidas entre sí, se observan muy rígidas, no se perciben diferencias significativas. Con respecto a las probetas de tracción en XY y en Z, se fabricaron correctamente para su caracterización mecánica.

AIDIMME INSTITUTO TECNOLÓGICO
GENERALITAT VALENCIANA
IVACE+i INSTITUTO VALENCIANO DE COMPETITIVIDAD E INNOVACIÓN
Financiado por la Unión Europea

Ilustración 20. Piezas demostrador 1 Gh Electrotermia (ventosa), fabricada en 3 condiciones de Escala de energía.

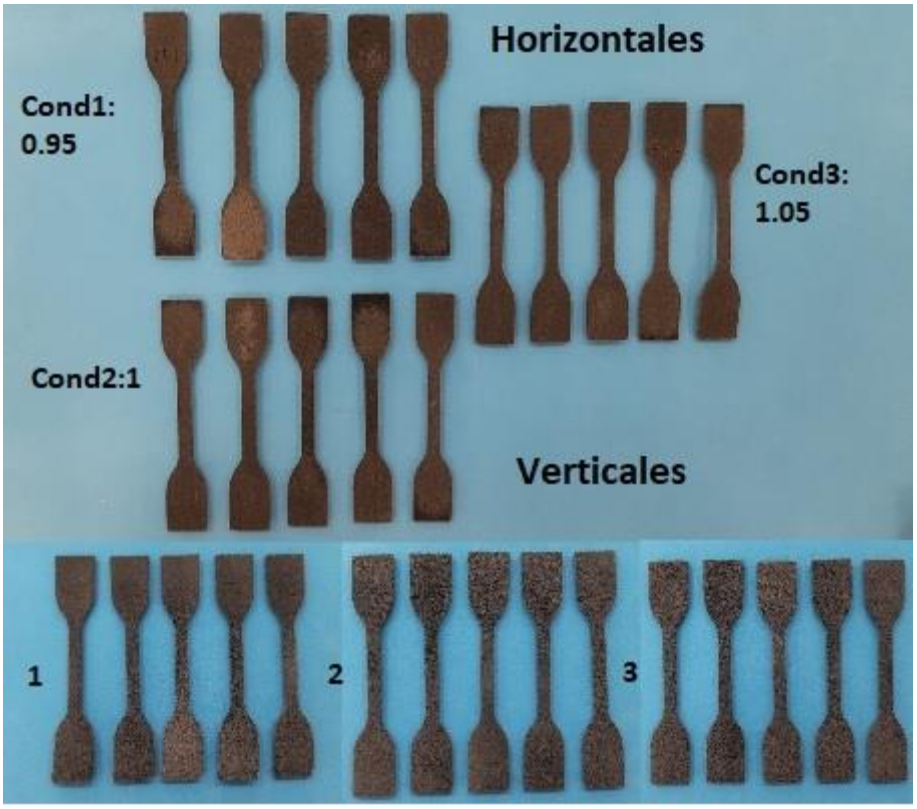

Ilustración 21. Probetas fabricadas horizontales y verticales, con las tres condiciones

En la siguiente tabla pueden verse las propiedades mecánicas que se obtienen al

AIDIMME INSTITUTO TECNOLÓGICO
GENERALITAT VALENCIANA
IVACE+i INSTITUTO VALENCIANO DE COMPETITIVIDAD E INNOVACIÓN
Financiado por la Unión Europea

modificar la energía de escala y de manera gráfica en la ilustración 22. En las muestras fabricadas en XY los valores obtenidos con Energía de escala 1 ofrecen tanto mayor resistencia como deformación máximas, en el caso de las muestras en Z los mejores resultados se obtienen con la energía de escala de 0.95, aunque el Fabricante Sinterit en XY reporta resistencia máxima de 7,99 N/mm^2 y de máxima deformación de 182,63 %, valores muy alejados cuando se fabrican las piezas en Z.

Tabla 7. Propiedades mecánicas determinadas en XY y en Z, 175 µm, fabricación 3 optimización con diferentes Escalas de energía 0.95, 1 y 1.05.

	Muestras fabricadas en XY					
	Energía de Escala: 0.95		**Energía de Escala: 1**		**Energía de Escala: 1.05**	
	N/mm^2	Desv. St.	N/mm^2	Desv. St.	N/mm^2	Desv. St.
Resist. Máxima	6,13	0,58	7,31	0,43	6,42	0,08
Máx. Deformación	47,28	7,94	246,84	40,99	182,03	11,44
	Muestras fabricadas en Z					
	Energía de Escala: 0.95		**Energía de Escala: 1**		**Energía de Escala: 1.05**	
	%	Desv. St.	%	Desv. St.	%	Desv. St.
Resist. Máxima	5,77	2,66	4,95	0,33	5,41	0,43
Máx. Deformación	63,70	11,26	49,69	5,78	61,36	18,61

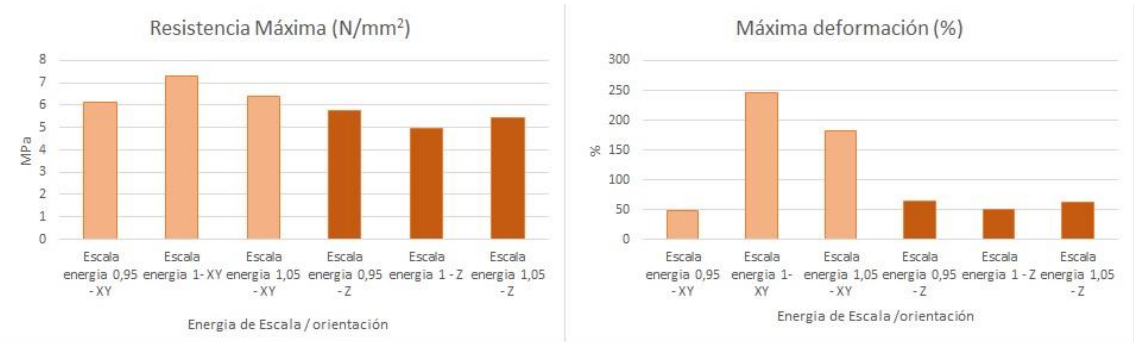

Ilustración 22. Propiedades mecánicas en XY y Z con diferentes Escalas de energía, fabricación 3 optimización

Fabricación 4 para optimización de parámetros del proceso SLS:

AIDIMME INSTITUTO TECNOLÓGICO
GENERALITAT VALENCIANA
IVACE+i INSTITUTO VALENCIANO DE COMPETITIVIDAD E INNOVACIÓN
Financiado por la Unión Europea

Esta bandeja se realizó con Energía de escala 1 para verificar de manera visual el acabado superficial y defectos de las piezas obtenidas con espesor de capa de 175 µm. Puede verse fabricadas la pieza demostrador 1 de la empresa VALVER SPEED AIR SL (pieza pincel grande y pequeña) la cual se ha fabricado en Z que está es la posición en la que debe fabricarse para evitar sobredimensionamiento interno según lo visto al fabricarse en XY, en este caso la parte roscada tiene sobredimensionamiento, por lo que este espesor de capa no es recomendado para piezas con rosca. El demostrador 2 de la Clínica Gironés (Plantilla tamaño real se fabrica correctamente y en cuanto al acabado superficial presenta más marcadas las líneas que con espesor de capa menor. Se han fabricado piezas varias demostradores para ver el resultado de este espesor de capa para piezas de pared delgadas, así como piezas macizas, todas se fabrican correctamente, aunque en los macizos se ve sobredimensionamiento en algunas de ellas. En las ilustraciones 23, 24 y 25 pueden verse la bandeja y las piezas obtenidas.

Ilustración 23.Bandeja de fabricación Material Flexa Performance, optimización 4

AIDIMME INSTITUTO TECNOLÓGICO
GENERALITAT VALENCIANA
IVACE+i INSTITUTO VALENCIANO DE COMPETITIVIDAD E INNOVACIÓN
Financiado por la Unión Europea

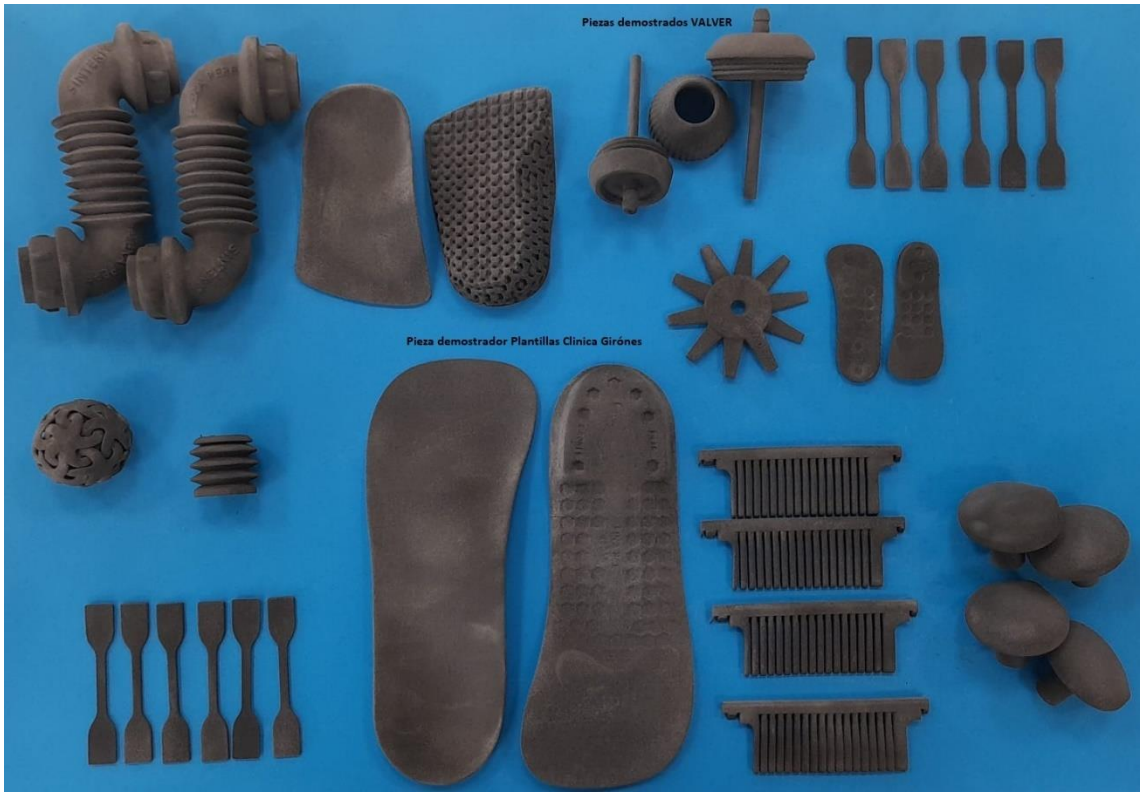

Ilustración 24.Piezas obtenidas en la bandeja de fabricación Material Flexa Performance, optimización 4

Ilustración 25. Piezas demostradores Empresas VALVER y Clínica Gironés

2.2.2 Desarrollo de parámetros para la tecnología LCD

Caracterización inicial del material DL110HB en la tecnología LCD:

Para la caracterización inicial del material DL110HB con los parámetros recomendados por el fabricante del equipo, se ha realizado una fabricación con la bandeja completamente llena de piezas de diferentes tamaños, entre ellas un salpicadero con superficie curva, placas lisas y con texturas, entre otras, así como probetas de tracción en Z. En la ilustración 26 puede verse la ubicación de las piezas, así como la bandeja completa que se fabricó. En la ilustración 27, puede verse líneas horizontales que aparecen en las piezas, en la ilustración 28 se señala un defecto de doblado que aparece en el salpicadero.

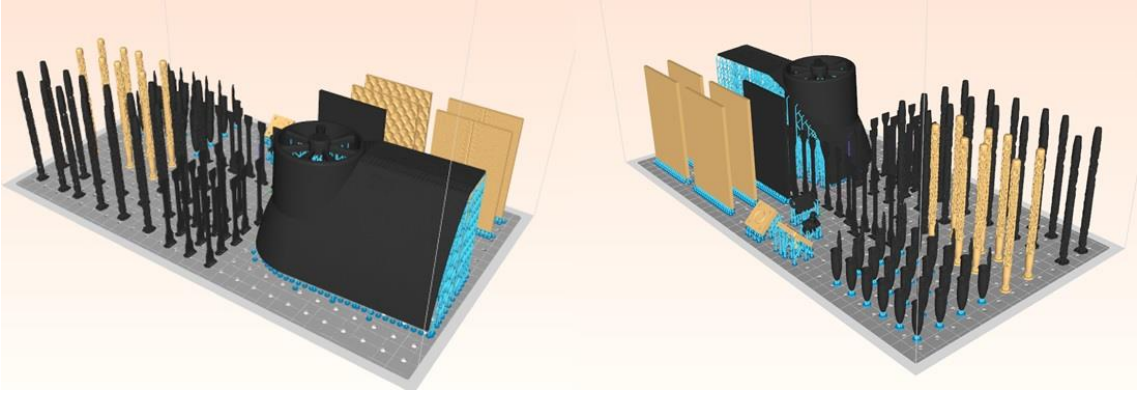

Ilustración 26. Bandeja de fabricación material DL110HB, condiciones standard

Ilustración 27. Piezas fabricadas con DL110HB, con defectos

Visto este efecto que aparece en todas las piezas se habla con los fabricantes del equipo y se sigue la recomendación de realizar un mantenimiento al equipo donde se cambia el film protector de pantalla LCD, el film del recipiente y el filtro de la resina.

Ilustración 28. Pieza salpicadero, condiciones standard, defecto doblado

AIDIMME INSTITUTO TECNOLÓGICO
GENERALITAT VALENCIANA
IVACE+i INSTITUTO VALENCIANO DE COMPETITIVIDAD E INNOVACIÓN
Financiado por la Unión Europea

Se repite la fabricación después del mantenimiento del equipo, se colocan más soportes al salpicadero para que no aparezca el efecto de doblado, el resto de las piezas se fabrican igual. Como puede verse en las ilustraciones siguientes, las placas siguen saliendo con líneas horizontales y las probetas de tracción se consideran aceptables. Las muestras fabricadas en esta y la fabricación anterior junto con las placas lisas son llevadas a realizar los ensayos de envejecimiento el paquete de trabajo 5.

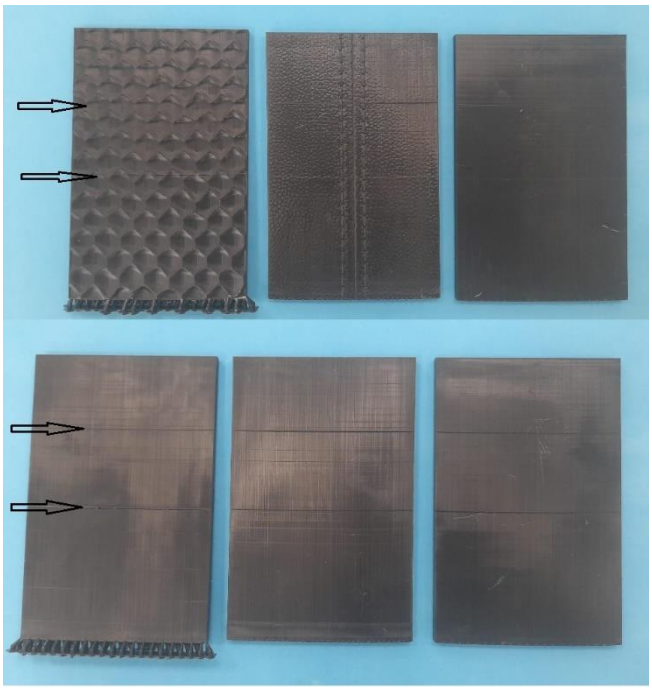

Ilustración 29.Placas con defecto de líneas en dos sitios, DL110HB

Ilustración 30. Salpicadero fabricado con optimización de soportes, defecto reducido

Se plantea una siguiente fabricación donde se inclinan las láminas con la finalidad de eliminar las líneas como puede verse en la ilustración 31, pero el resultado no es el esperado, obteniéndose líneas de nuevo. Con respecto a las estrellas fabricadas

AIDIMME INSTITUTO TECNOLÓGICO
GENERALITAT VALENCIANA
IVACE+i INSTITUTO VALENCIANO DE COMPETITIVIDAD E INNOVACIÓN
Financiado por la Unión Europea

inclinadas a diferentes ángulos, se observa que solo la más horizontal sale sin líneas, las letras están muy bien definidas, ilustración 32. En la siguiente bandeja se fabrica la pieza demostrador 2 suministrada por la empresa colaboradora Gh Electrotermia (Soporte de pantalla) y el resultado es una pieza muy doblada donde no es posible encajar las dos partes, como se ve en la ilustración 33.

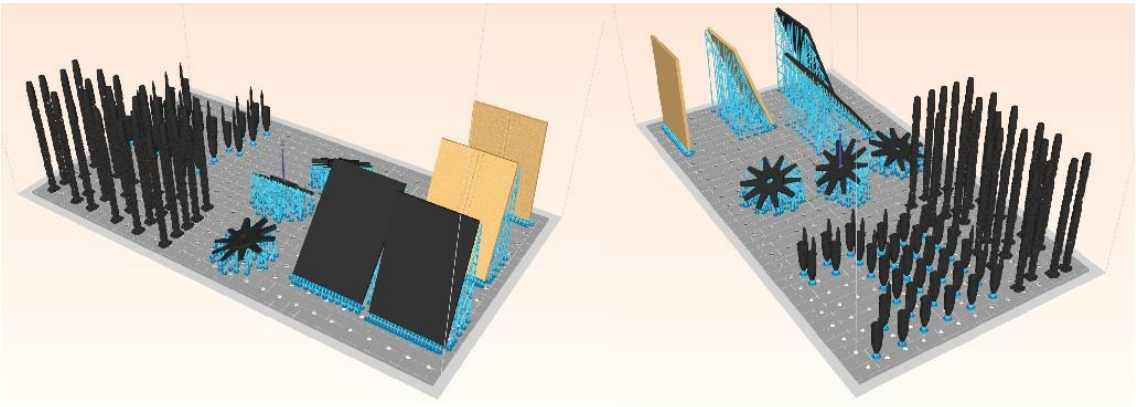

Ilustración 31. Bandeja de fabricación placas inclinadas, DL110HB

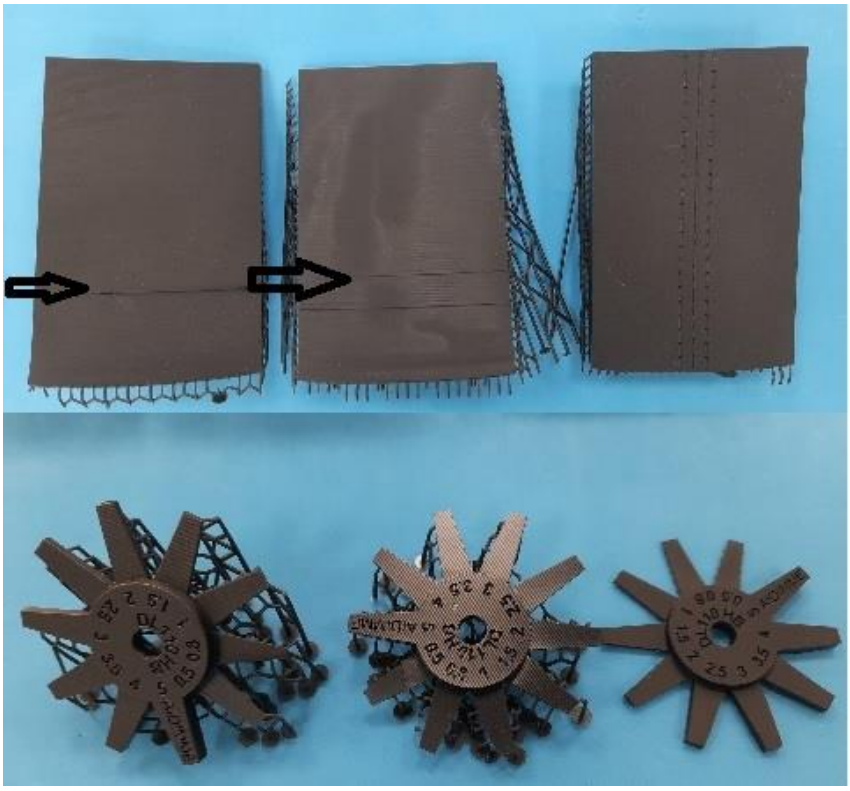

Ilustración 32. Fabricación con placas y estrellas inclinadas, resina DL110HB.

AIDIMME INSTITUTO TECNOLÓGICO
GENERALITAT VALENCIANA
IVACE+i INSTITUTO VALENCIANO DE COMPETITIVIDAD E INNOVACIÓN
Financiado por la Unión Europea

Ilustración 33. Pieza demostrador 2 Gh Electrotermia, fabricado en la resina DL110HB

Debido a que no ha sido posible conseguir piezas sin defectos y con dimensiones completamente aceptables con la resina DL110HB, se decide cambiar a alguna resina de interés con propiedades mecánicas similares y/o apropiadas para muchas aplicaciones como es el caso de la resina HARD, la cual tiene una resistencia al impacto de 55 J/m el cual es un valor superior al de la PA12 (46 J/m). Se comienza fabricando la pieza demostrador de Gh Electrotermia con muy buenos resultados, sin ningún pandeo.

Se realiza el desarrollo de parámetros con bandejas de fabricación optimizadas para aumentar la productividad, estas bandejas a su vez incluirán un estudio de la geometría de los soportes utilizados y en ellas se colocarán piezas demostradoras de las empresas colaboradoras.

Caracterización inicial del material resina HARD en la tecnología LCD:

Para la primera fabricación de optimización, se utilizaron todos los parámetros recomendados por el fabricante para la resina HARD, con espesor de capa desde 100 µm para conseguir toda la información necesaria para la comparación con otros espesores de capa. Se muestran los parámetros de la resina HARD a continuación:

En cuanto a la fabricación completa:

- Tiempo de exposición de capa: 8000 ms
- Espesores de capa: 100 µm
- Tiempo de descanso después de la retracción/ Tiempo detenido: 1000 ms
- Distancia de elevación en Z: 3 mm
- Velocidad de elevación (desprendimiento del film): 200 mm/min
- Velocidad de retracción (Vuelta a la resina): 50 mm/min

En cuanto a las capas inferiores o iniciales de la fabricación:

- Número de capas inferiores: 5
- Tiempo de exposición de capas inferiores: 55000 ms

AIDIMME INSTITUTO TECNOLÓGICO
GENERALITAT VALENCIANA
IVACE+i INSTITUTO VALENCIANO DE COMPETITIVIDAD E INNOVACIÓN
Financiado por la Unión Europea

- Tiempo de descanso después de la retracción capas inferiores/ Tiempo detenido: 1000 ms
- Distancia de elevación en Z inferior: 5 mm
- Velocidad de elevación inferior (desprendimiento del film): 50 mm/min
- Velocidad de retracción inferior (Vuelta a la resina): 50 mm/min

Ilustración 34.Velocidades y alturas de elevación y de retracción, en capas superiores (Izq.) e inferiores (Der.), resina HARD

Se realizó una fabricación compuesta por: probetas de tracción en Z, 3 conjuntos de 4 piezas en L para estudio de soportes 1, dos piezas demostradoras 1 para la empresa CLADES COMPOSITES, pieza para fachada (conchas), dos piezas demostradoras cargador de coche eléctrico (AIDIMME).

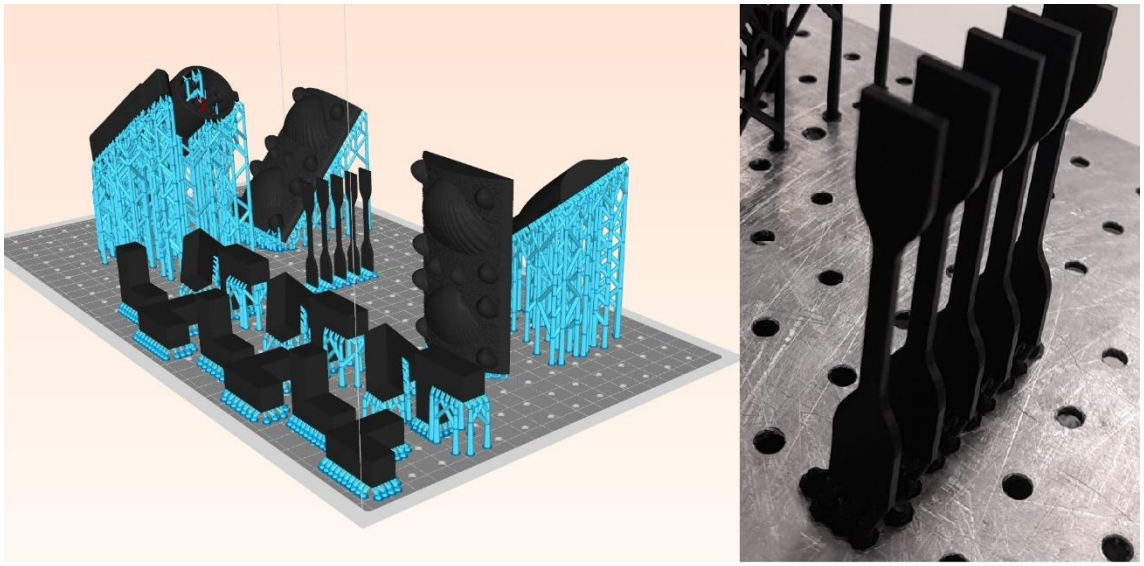

Ilustración 35.Bandeja de fabricación condiciones standard, 100µm, Resina HARD y probetas de tracción en Z.

Las probetas de tracción se han ensayado según la norma UNE ISO 527-2 [15], norma para

[15] UNE-ISO 527-2:2012: Plásticos. Determinación de las propiedades en tracción. Parte 2: Condiciones de ensayo de plásticos para moldeo y extrusión.

determinar propiedades mecánicas en polímeros rígidos y semirrígidos; los resultados se muestran en la tabla 8:

Tabla 8.Propiedades mecánicas determinadas en Z, 100 µm

	Resist. Máxima		Max Deformación	
	N/mm^2	Desv. St.	%	Desv. St.
Fabricante Photocentric	**52**	**-**	**10**[16]	**-**
Z (100 µm)	**44,82**	**0,39**	**8,22**	**1,27**

Comparando los resultados obtenidos en cuanto a propiedades mecánicas con los valores suministrados por el fabricante de la resina HARD, empresa Photocentric. En cuanto al comportamiento del material se obtiene una resistencia máxima a la tracción de 44,85 N/mm^2 valor inferior en un 17% al reportado por Photocentric (52 N/mm^2), lo mismo ocurre con la máxima deformación la cual es inferior en un 17% aproximadamente también, pasando de 10% a 8,22%, consideraremos estos valores como aceptables como punto de partida.
El demostrador 1 pieza para fachada (Conchas) de la empresa CLADES COMPOSITES, se fabricó correctamente tanto vertical como inclinada y puede verse en la figura 37 el acabado obtenido. La pieza demostrador "adaptador para coche eléctrico" de AIDIMME también presentó un buen acabado como puede verse en la figura 38.

Ilustración 36. Demostrador 1 Pieza para fachada (concha), empresa CLADES COMPOSITES

[16] https://photocentricgroup.com/wp-content/uploads/2024/09/TDS-Magna-Hard-Black.pdf

AIDIMME INSTITUTO TECNOLÓGICO
GENERALITAT VALENCIANA
IVACE+i INSTITUTO VALENCIANO DE COMPETITIVIDAD E INNOVACIÓN
Financiado por la Unión Europea

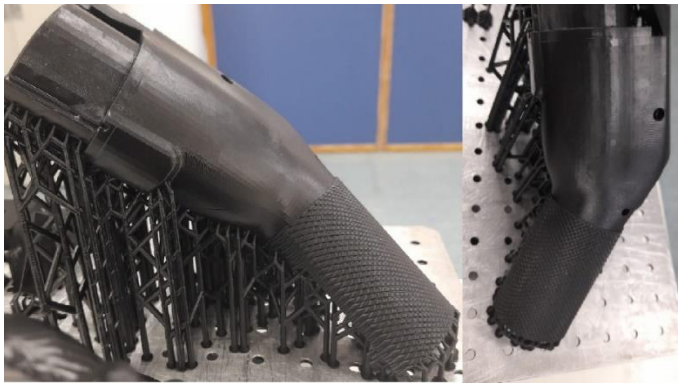

Ilustración 37. Pieza demostrador AIDIMME, adaptador coche eléctrico.

Fabricación 1 para optimización de parámetros del proceso LCD:

Para la primera fabricación de optimización para aumento de la productividad, se utilizaron todos los parámetros recomendados por el fabricante para la resina HARD, aumentando el espesor de capa desde 100 µm hasta 250µm, donde el tiempo de exposición de capa cambia a 16000 ms de manera automática al seleccionar ese espesor de capa.

Se realizó una fabricación compuesta por: probetas de tracción en Z, 1 conjuntos de 4 piezas en L para estudio de soportes, dos piezas demostradoras 3 de la empresa VALVER mango de pistola, seis (6) piezas con diferentes texturas para el análisis de la tarea 6.1.

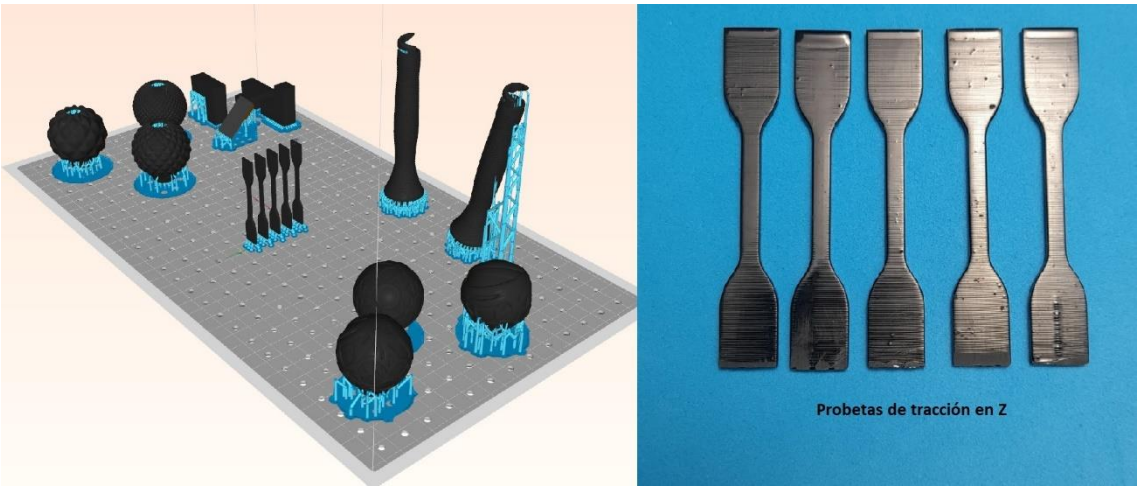

Ilustración 38.Bandeja de fabricación 250 µm, resina HARD y probetas de tracción en Z

El demostrador 3 “mango de pistola” de la empresa VALVER se ha fabricado de manera

vertical e inclinado, la superficie texturizada se ve correcta, pero la pieza tiene un defecto en los soportes colocados en la parte roscada lo que dificulta quitarlos, se ve en la siguiente figura. Las piezas para el estudio de texturas se han fabricado correctamente y se analizaran en el paquete de trabajo 6.

Ilustración 39. Pieza demostrador 3 empresa VALVER, mango de pistola

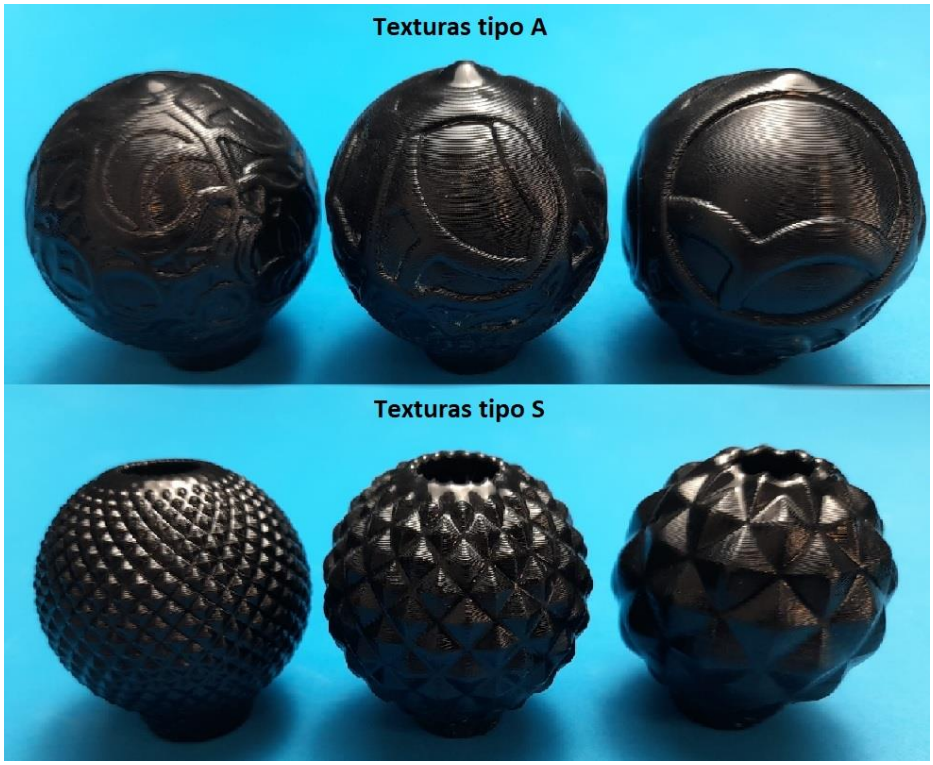

Ilustración 40. Piezas para estudio de texturas PT6

Fabricación 2 para optimización de parámetros del proceso LCD:

Para la segunda fabricación de optimización para aumento de la productividad, se utilizaron todos los parámetros recomendados por el fabricante para la resina HARD, aumentando el espesor de capa desde 100 µm hasta 175µm, donde el tiempo de exposición de capa lo hemos colocado en 12000 ms, ya que de manera automática no se cambia y este espesor no está dentro de los perfiles que trae el equipo.

La fabricación compuesta por: probetas de tracción en Z, pieza demostrador 3 carcasa Grande de la empresa Gh Electrotermia, pieza demostrador 3 mango de pistola mejorado de la empresa VALVER, piezas para verificación dimensional.

AIDIMME INSTITUTO TECNOLÓGICO
GENERALITAT VALENCIANA
IVACE+i INSTITUTO VALENCIANO DE COMPETITIVIDAD E INNOVACIÓN
Financiado por la Unión Europea

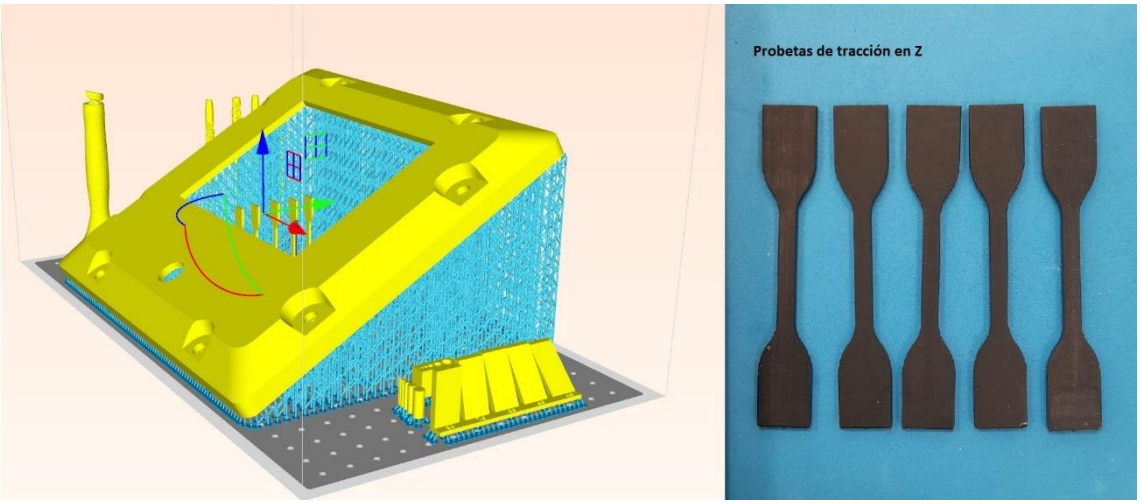

Ilustración 41.Bandeja de fabricación 175 µm, resina HARD y probetas de tracción en Z

El tamaño del demostrador 3 de la empresa Gh Electrotermia, la carcasa grande ocupa casi toda la bandeja, la pieza presenta pandeo lateral en dos de sus extremos, por lo cual deberá la empresa verificar si la pieza encaja y es funcional para su aplicación.

La pieza demostrador 3 de la empresa VALVER fabricada anteriormente tuvo problemas porque no se pudieron quitar los soportes de la parte roscada, para esta fabricación se han mejorado siendo posible obtener este demostrador funcional para entregarlo a la empresa.

Ilustración 42. Pieza demostrador 3 para empresa VALVER, mango de pistola con soporte mejorado en parte roscada.

En la ilustración siguiente, se ven las piezas para verificación dimensional: la primera donde se verifica los diferentes ángulos es una pieza con planos angulados, en la segunda se han fabricado cilindros y en la tercera agujeros, para valorar la desviación dimensional con respecto al CAD. Obteniéndose que los cilindros se fabrican aproximadamente 0.1 mm más grandes y los agujeros 0.25 mm más pequeños, lo que nos llevaría a tener que verificar si estas tolerancias son permitidas en las piezas a fabricar y si son consideradas aceptables.

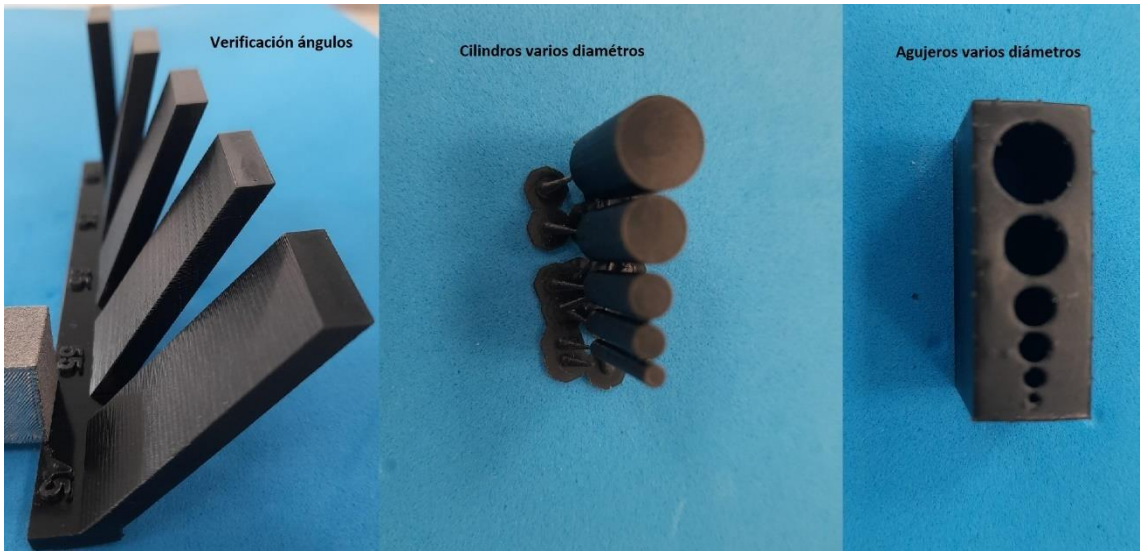

Ilustración 43. Muestras fabricadas para verificación dimensional

AIDIMME INSTITUTO TECNOLÓGICO
GENERALITAT VALENCIANA
IVACE+i INSTITUTO VALENCIANO DE COMPETITIVIDAD E INNOVACIÓN
Financiado por la Unión Europea

Tabla 9. Dimensiones del CAD y obtenidas en las piezas (mm), obtenidas en la tecnología LCD, resina HARD

		Dimensiones CAD (mm)	Dimensiones obtenidas (mm)
Cilindros	**Diámetro 1**	8.00	8.10
	Diámetro 2	6.00	6.10
	Diámetro 3	4.00	4.11
	Diámetro 4	3.00	3.12
	Diámetro 5	2.00	2.08
Cilindros	**Agujero 1**	8.00	7.75
	Agujero 2	6.00	5.77
	Agujero 3	4.00	3.75
	Agujero 4	3.00	2.76
	Agujero 5	2.00	1.86

Se han ensayado a tracción las probetas obtenidas en Z con los espesores de capa 100, 175 y 250 µm, se presenta su comparación la siguiente tabla y figura representativa.

Tabla 10.Propiedades mecánicas determinadas en Z, 100, 175 y 250 µm

	Resist. Máxima		Max Deformación	
	N/mm^2	Desv. St.	%	Desv. St.
Fabricante Photocentric	**52**	**-**	**10**[17]	**-**
Z (100 µm)	44,82	0,39	8,22	1,27
Z (175 µm)	50,25	0,91	7,61	0,22
Z (250 µm)	46,72	5,35	7,37	1,38

[17] https://photocentricgroup.com/wp-content/uploads/2024/09/TDS-Magna-Hard-Black.pdf

AIDIMME INSTITUTO TECNOLÓGICO GENERALITAT VALENCIANA IVACE+i INSTITUTO VALENCIANO DE COMPETITIVIDAD E INNOVACIÓN Financiado por la Unión Europea

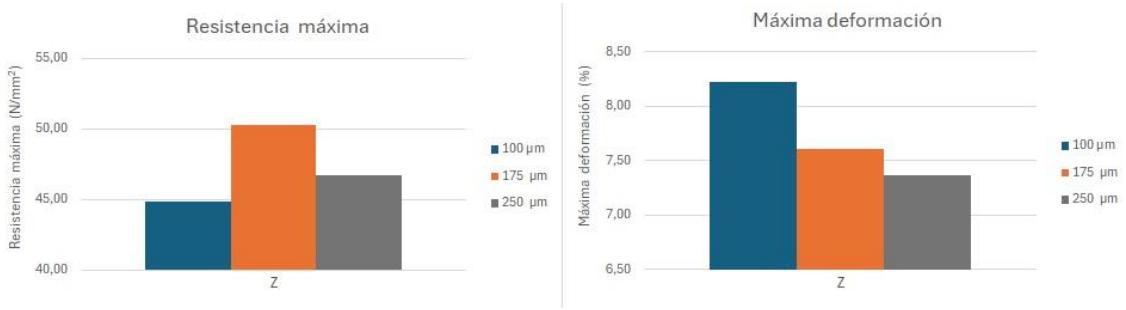

Ilustración 44.Propiedades mecánicas de probetas en Z 100, 175 y 250 µm

Comparando los resultados obtenidos en cuanto a propiedades mecánicas con los valores suministrados por el fabricante de la resina HARD, empresa Photocentric. En cuanto al comportamiento del material se obtiene una resistencia máxima a la tracción de 44,85; 50,25; y 46,75 N/mm^2, por lo que el valor que más se acerca al teórico es el conseguido con espesor de capa de 175 µm, pero todos son inferiores al teórico, aunque están cerca a los obtenidos con espesor de capa 100µm en nuestro equipo. Con respecto a la máxima deformación se obtienen valores de 8,22; 7,61 y 7,37 % todos inferiores al 10% reportado por el fabricante e inferiores al de espesor de capa estándar. Según esto podríamos decir que la resistencia mecánica no varía considerablemente al aumentar el espesor de capa, pero la máxima deformación disminuye cerca de un 10%, este resultado nos limitaría en función del uso que tendrá la pieza.

Con respecto al acabado superficial de las piezas y a la capacidad para fabricar texturas o detalles en piezas, no se observan diferencias considerables al aumentar el espesor de capa.

Dentro de esta tarea se ha realizado en las fabricaciones anteriores un estudio de soportes aprovechando las piezas demostradores solicitadas por las empresas, para esto se han generado soportes de manera automática y también se han ajustado los parámetros de la generación de soportes, como veremos a continuación:

Estudio de soportes 1 (Espesor de capa 100 µm):
<u>Grupos 1, 2 y 3:</u>

Se han fabricado tres (3) grupos de 4 piezas con forma de L en posiciones horizontal, vertical, vertical invertido y a 45°, con diferentes condiciones de soportes, como se describe en la siguiente tabla; corresponden a los soportes del tipo Hard Black Small Models, colocados solo en superficies:

AIDIMME INSTITUTO TECNOLÓGICO
GENERALITAT VALENCIANA
IVACE+i INSTITUTO VALENCIANO DE COMPETITIVIDAD E INNOVACIÓN
Financiado por la Unión Europea

Tabla 11.Condiciones de fabricación de estudio 1 de soportes, grupos 1, 2 y 3.

Grupos	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
Densidad (%)	45	70	90
Diámetro de punta(mm)	0.40	0.40	0.40
Distancia del punto de apoyo en la pieza (mm)	3.556	2.286	1.778
Diámetro del soporte (mm)	1.5	1.5	1.5
Altura de base soporte (mm)	1	1	1
Angulo critico de fabricación (°)	47	47	47

Puede verse en la ilustración 48 el grupo 1 con menos densidad de soportes (45%) terminan en una sola punta cada soporte, las caras de las piezas que se encontraban horizontales salieron con sobredimensionamiento y con mal acabado, quizás se deba a que han faltado soportes porque estaban solo en el borde de la pieza no en el centro.
Para el grupo 2, se observa que los soportes terminan en dos puntas, pero, aunque se ha subido la densidad hasta 70% siguen saliendo sobredimensionadas las caras horizontales y con defectos. Pare el grupo 3, cada soporte termina en dos puntas, el defecto anterior de sobredimensionamiento disminuye porque hay mayor densidad de soportes, pero de igual forma se observa sobredimensionamiento por lo que debe seguirse buscando las condiciones de soporte donde se garantice que la pieza no estará sobredimensionada. Para todos los casos después del lijado la superficie mejora, pero sigue quedando rastros de los soportes, como se observa en las figuras.

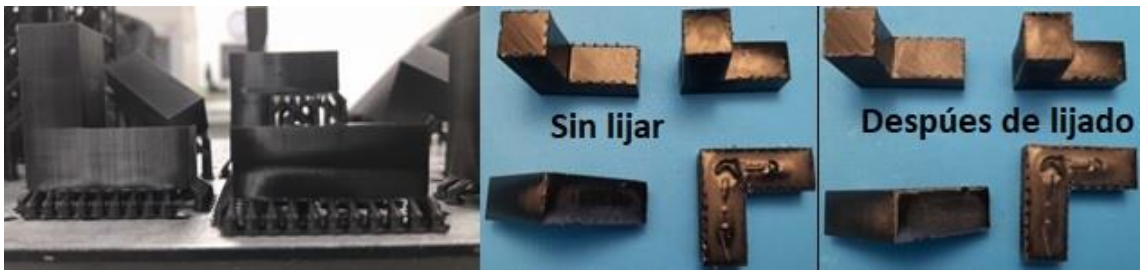

Ilustración 45. Grupo 1 en bandeja (Izq.), piezas sin soporte (centro), piezas sin soporte y lijadas (Der.) 45%densidad de soportes.

AIDIMME INSTITUTO TECNOLÓGICO
GENERALITAT VALENCIANA
IVACE+i INSTITUTO VALENCIANO DE COMPETITIVIDAD E INNOVACIÓN
Financiado por la Unión Europea

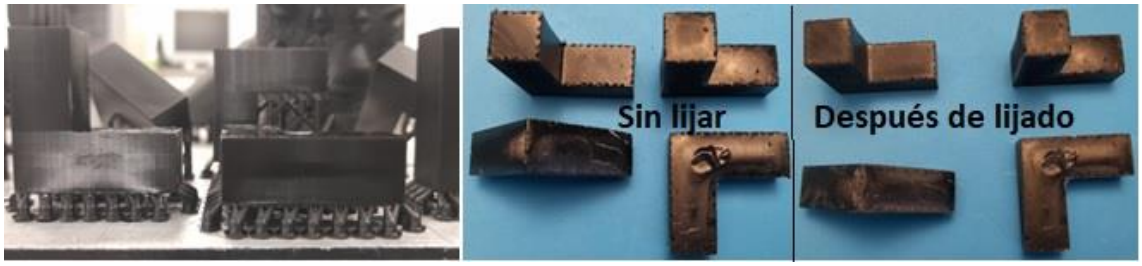

Ilustración 46.Grupo 2 en bandeja (Izq.), piezas sin soporte (centro), piezas sin soporte y lijadas (Der.) 70% densidad de soportes.

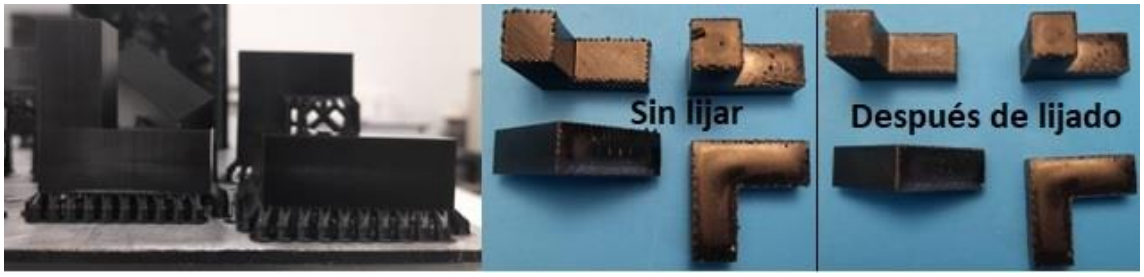

Ilustración 47.Grupo 3 en bandeja (Izq.), piezas sin soporte (centro), piezas sin soporte y lijadas (Der.) 90% densidad de soportes.

Estudio de soportes 2 (Espesor de capa 250 µm):

Dado el resultado de los soportes anteriores y los defectos que se presentaron en las piezas, se utiliza de nuevo el perfil Hard Black small models, con la estrategia de creces y superficies, con este tipo de estrategia se incluyen soportes en la zona central de las piezas y en el contorno, con modificaciones en los parámetros de la tabla 11.

Como puede verse en la ilustración 51, los soportes son bastantes, pro al tener un diámetro de punta menor a los anteriores, hemos pasado de 0,40 mm a 0,30 mm la huella dejada después del lijado es pequeña, las piezas salen sin sobredimensionamiento en todas las posiciones fabricadas.

Tabla 12.Condiciones de fabricación de estudio 2 de soportes, grupo 4

Grupo 4	
Densidad (%)	40
Diámetro de punta(mm)	0.30
Distancia del punto de apoyo en la pieza (mm)	3
Diámetro del soporte (mm)	1
Altura de base soporte (mm)	1

AIDIMME INSTITUTO TECNOLÓGICO
GENERALITAT VALENCIANA
IVACE+i INSTITUTO VALENCIANO DE COMPETITIVIDAD E INNOVACIÓN
Financiado por la Unión Europea

Angulo critico de fabricación (°)	45
Diámetro del haz de punta (mm)	0.30
Profundidad de contacto de punta (mm)	0.060
Offset de creces (mm)	0.50
Longitud de primera viga (mm)	4

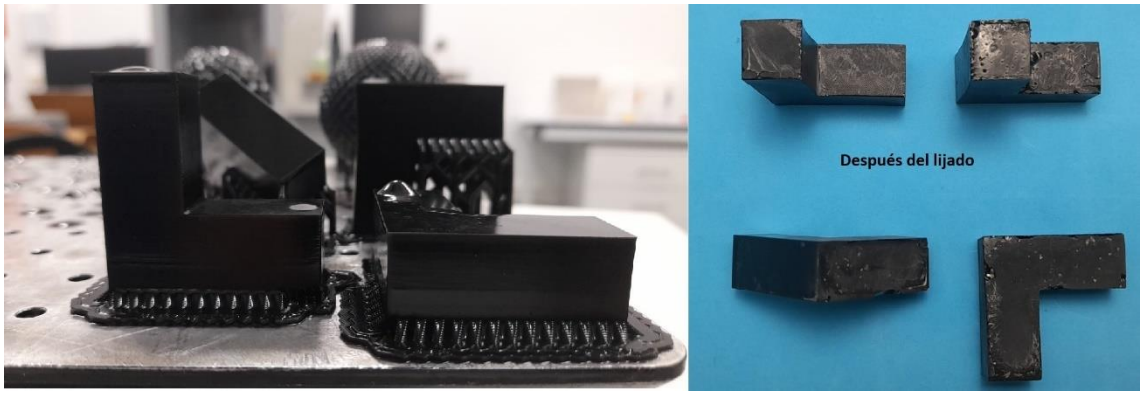

Ilustración 48. Grupo 4 en bandeja (Izq.), piezas lijadas (Der.)45 % densidad de soportes creces y superficies.

En cada fabricación se utilizaron algunas de las piezas demostradores para analizar los soportes a colocar, en este caso en función de la complejidad geométrica de la pieza, se muestran un par de casos:

Pieza demostrador 1 empresa CLADES COMPOSITES pieza para fachada (Conchas), (Espesor de capa 100 µm):

La pieza demostrador 1 de la empresa CLADES COMPOSITES SL, pieza para fachada (conchas) posee una superficie irregular, está pieza se fabricó en dos posiciones. Para la posición vertical con la generación automática de soportes se generaba muchos soportes en la zona donde están las conchas, como puede verse en el lado izquierdo de la figura 52, por lo que se decidió fabricarse con soporte manual tipo árbol, puede verse el resultado y los parámetros en la figura.

AIDIMME INSTITUTO TECNOLÓGICO
GENERALITAT VALENCIANA
IVACE+i INSTITUTO VALENCIANO DE COMPETITIVIDAD E INNOVACIÓN
Financiado por la Unión Europea

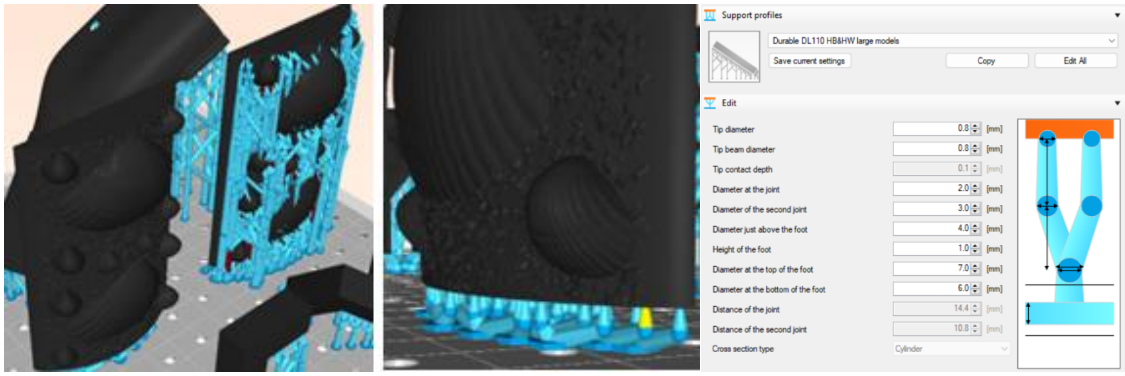

Ilustración 49. Pieza concha con soportes automáticos (Izq.), pieza con soporte manual tipo árbol (centro) y parámetros del soporte (Der), fabricada en vertical

Esta pieza demostrador tipo concha también se ha fabricado inclinada a 60°, con soporte automático con densidad de 75% y se ha añadido un soporte tipo árbol en el centro en la parte de abajo y en los laterales, como se observa, figura 53. Despues del lijado se observa que se borran casi todas las marcas dejadas por los soportes en la fabricada inclinada y en la fabricada vertical se ven marcas profundas, figura 54.

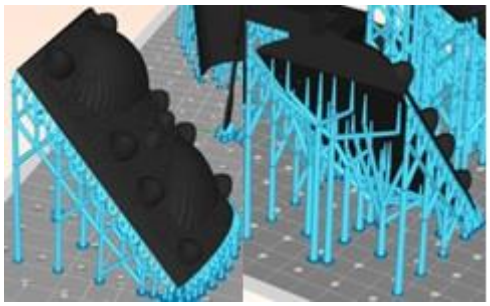

Ilustración 50. Soportes tipo árbol en pieza demostrador "concha" fabricada inclinada

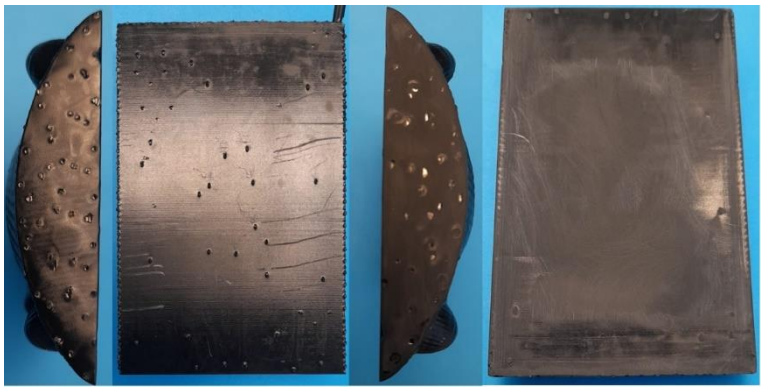

Ilustración 51. Piezas demostrador "concha": Vertical e inclinada sin (Izq.) y con lijado (Der.)

AIDIMME INSTITUTO TECNOLÓGICO
GENERALITAT VALENCIANA
IVACE+i INSTITUTO VALENCIANO DE COMPETITIVIDAD E INNOVACIÓN
Financiado por la Unión Europea

Pieza demostrador "cargador de coche eléctrico" AIDIMME, (Espesor de capa 100 µm):

En esta figura se muestran los soportes en una pieza demostrador "cargador de coche eléctrico" nuestra, para el cual había tres opciones de estrategia de soporte: soporte con creces y superficie, solo creces y solo superficies, se ven las opciones de este soporte automático en la figura, para esta pieza en particular se eligió la última opción (solo superficies)

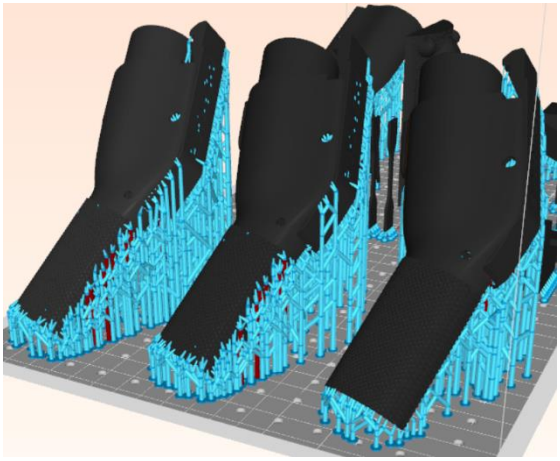

Ilustración 52. Ejemplos de soportes de izquierda a derecha: creces y superficie, solo creces y solo superficies.

Según lo observado la mejor estrategia para soportes dependerá de la geometría de la pieza, de la posición en la que se desee fabricar y de su espesor, pudiendo colocarse para piezas macizas soportes automáticos (75% densidad) o la estrategia de creces y superficies (45% de densidad), en el caso de piezas con pared fina se recomiendan solo de superficie.

2.3 Recomendaciones generales para aumento de productividad en las tecnologías de fabricación aditiva de este estudio (T4.3)

2.3.1 Recomendaciones generales para aumento de productividad en las tecnologías de fabricación aditiva de este estudio, tecnología SLS

Para esta tarea se ha desarrollado un análisis de la factibilidad de aumentar el espesor de capa desde 125µm hasta 175µm para el aumento de la productividad. En función de la productividad alcanzada y de la no presencia de warping (doblado en las piezas) en la tecnología SLS, con por lo menos un material, en este caso el material Flexa Performance, para el cual se ha calculado la tasa de fabricación en número de piezas por

AIDIMME INSTITUTO TECNOLÓGICO GENERALITAT VALENCIANA IVACE+i INSTITUTO VALENCIANO DE COMPETITIVIDAD E INNOVACIÓN Financiado por la Unión Europea

semana.
Para el cálculo del aumento de la productividad hemos recopilado la información de los tiempos antes, durante y después de la fabricación que se necesitan para obtener una determinada cantidad de piezas por semana, según el diseño de una de las bandejas fabricadas anteriormente; esto lo hemos hecho para los dos espesores de capa utilizados. Obteniendo que al utilizar un espesor de capa de 175µm en vez del espesor estándar recomendado de 125µm, se obtiene un aumento de la productividad en un 26%. Calculada la productividad como Número de piezas fabricadas por semana a 175µm/ Número de piezas fabricadas por semana a 125µm. Se han considerado jornadas laborales de 8 horas.

Tabla 13. Parámetros utilizados para determinar la productividad con la optimización del proceso.

Espesor de capa (µm)	Tiempo de montaje de bandeja (h)	Tiempo de preparación de material (h)	Tiempo de fabricación de las piezas(h)	Tiempo de extracción y postproceso (h)	Tiempo de limpieza del equipo (h)	Tiempo total (h)	Volumen (mm^3)	Cantidad de capas	Número de bandejas semanales	Número de piezas por bandeja	Número de piezas fabricadas por semana	Productividad (%)
125	0,75	0,5	28,6	1,5	0,5	31,85	305612	2138	1,40	25	35,00	100%
175	0,75	0,5	22,83	1,5	0,5	26,08		1527	1,75	25	44,0	126%

Con respecto a las recomendaciones generales hemos visto que al aumentar el espesor de capa debe considerarse que las piezas no pueden colocarse de manera horizontal, debido a que si se trata de agujeros estos se ensanchan, también hemos visto que las roscas no salen con la precisión requerida y el acabado no es mejor al estándar. Por lo que este espesor de capa si bien aumenta la productividad tendrá un uso limitado y no podrá utilizarse para todo tipo de piezas, según lo que hemos visto en las fabricaciones mostradas con anterioridad al producir diferentes tipos de piezas. En la siguiente figura puede verse la bandeja de fabricación utilizada para el cálculo.

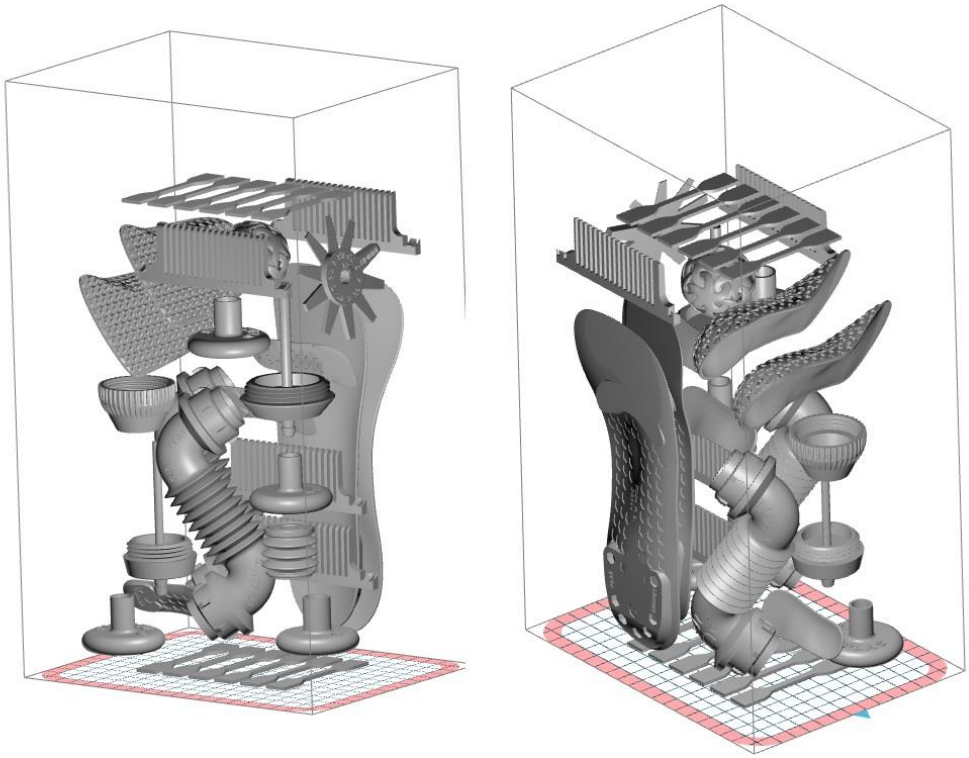

Ilustración 53. Bandeja de fabricación para simulación de productividad en la tecnología SLS, material Flexa Performance.

2.3.2 Recomendaciones generales para aumento de productividad en las tecnologías de fabricación aditiva de este estudio, tecnología LCD.

Para esta tarea se ha desarrollado un análisis de la factibilidad donde se evalúa si aumentando el espesor de capa desde 100µm hasta 175 y 250µm se aumenta la productividad. En función de la productividad alcanzada y de la no presencia de warping (doblado en las piezas) en la tecnología LCD, del material resina HARD, se calcula previamente la tasa de fabricación en número de piezas por semana.

Para el cálculo del aumento de la productividad hemos colocado en la siguiente tabla los tiempos estimados antes, durante y después de la fabricación que se necesitan para obtener una determinada cantidad de piezas por semana, se ha utilizado una de las bandejas fabricadas anteriormente; esto lo hemos hecho para los tres espesores de capa utilizados. Obteniendo que al utilizar un espesor de capa de 175µm, se obtiene un aumento de la productividad en un 76% con respecto a los parámetros estándar y que al utilizar un espesor de capa de 250µm, se obtiene un aumento de la productividad en un 109% con respecto a los parámetros estándar de espesor de capa de 100µm. La productividad se ha calculado como: Número de piezas fabricadas por semana a 175 ó

AIDIMME INSTITUTO TECNOLÓGICO
GENERALITAT VALENCIANA
IVACE-i INSTITUTO VALENCIANO DE COMPETITIVIDAD E INNOVACIÓN
Financiado por la Unión Europea

250 µm / Número de piezas fabricadas (100 µm), en la tabla pueden verse los parámetros utilizados para el cálculo y en la siguiente figura la bandeja de fabricación utilizada para el cálculo.

Tabla 14. Parámetros utilizados para calcular la productividad en tecnología LCD, resina HARD

Espesor de capa (µm)	Tiempo de montaje de bandeja (h)	Tiempo de preparación de material (h)	Tiempo de fabricación de las piezas(h)	Tiempo de extracción y postproceso (h)	Tiempo de limpieza del equipo (h)	Tiempo total (h)	Volumen (ml)	Cantidad de capas	Número de bandejas semanales	Número de piezas por bandeja	Número de piezas fabricadas por semana	Productividad (%)
100	1	0,25	16,25	5,5	0,5	23,50	321,41	1575	2,46	17	42,00	100%
175	1	0,25	9,25	5,5	0,5	16,50		899	4,32	17	74,00	176%
250	1	0,25	7,75	5,5	0,5	15,00		629	5,16	17	88,00	210%

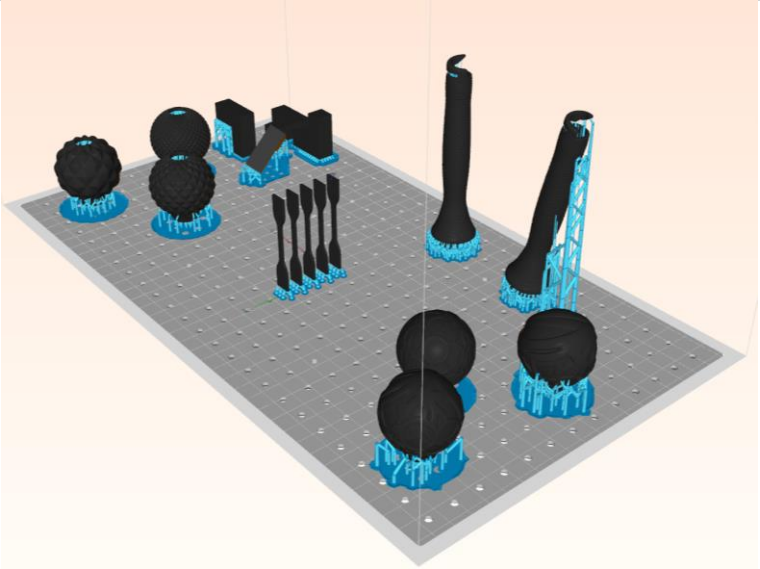

Ilustración 54. Bandeja de fabricación utilizada para el cálculo del aumento de la productividad en la tecnología LCD, material resina HARD.

En cuanto a las recomendaciones generales, hemos visto que aumentar el espesor de capa desde 100 µm hasta 175 o hasta 250µm no genera defectos ni mucha diferencia en cuanto al aspecto superficial de las piezas, por lo que si se considera conveniente podrían utilizarse estos espesores para aumentar la productividad y así disminuir los costes del proceso.

3 Conclusiones

- Para aumentar la productividad nos hemos enfocado en disminuir los costes asociados al proceso de fabricación; después de una exhaustiva búsqueda

AIDIMME INSTITUTO TECNOLÓGICO
GENERALITAT VALENCIANA
IVACE+i INSTITUTO VALENCIANO DE COMPETITIVIDAD E INNOVACIÓN
Financiado por la Unión Europea

bibliográfica presentada previamente, se ha decidido que la modificación en el espesor de capa en ambos procesos será la estrategia principal para utilizar.

- Se han seleccionado para este estudio, los materiales Flexa Performance para la tecnología SLS y las resinas HARD y DL110HB para fabricar en la tecnología LCD, debido a nuestro interés en sus propiedades mecánicas.
- Se realizaron diferentes experimentales modificando el parámetro espesor de capa para los dos procesos, con el objetivo de aumentar la productividad, evaluando las propiedades mecánicas y la factibilidad de la fabricación.
- Para la tecnología SLS, se puede aumentar el espesor de capa desde 125µm (valor estándar recomendado) hasta 175µm y conseguir tener un aumento de un 26% en la productividad. Con respecto a las propiedades mecánicas no se observan cambios considerables en XY, pero en Z se observa una disminución de un 26% en la resistencia máxima. Debe tenerse en cuenta que este espesor de capa no se recomienda si la pieza requiere un acabado superficial con rugosidad baja y no se recomienda para piezas con rosca. A su vez, deben realizarse pruebas preliminares en las piezas debido a que no es utilizable con todas las geometrías.
- Para el caso de piezas fabricadas con la tecnología LCD, se ha encontrado que aumentando el espesor de capa desde 100µm hasta 175µm y hasta 250 µm produce un aumento de entre 76 y 110% en la productividad al aumentar el espesor de capa. Con respecto a las propiedades mecánicas se consideran aceptables y en cuanto al acabado superficial no se aprecian cambios significativos, además se ha verificado que se pueden fabricar piezas con diferentes tamaños y geometrías.
- Se ha realizado un estudio de soportes, obteniéndose que la mejor estrategia para soportes dependerá de la geometría de la pieza, de la posición en la que se desee fabricar y de su espesor, pudiendo colocarse para piezas macizas soportes automáticos (75% densidad) o la estrategia de creces y superficies (45% de densidad), en el caso de piezas con pared fina se recomiendan solo de superficie.

AIDIMME INSTITUTO TECNOLÓGICO
GENERALITAT VALENCIANA
IVACE+i INSTITUTO VALENCIANO DE COMPETITIVIDAD E INNOVACIÓN
Financiado por la Unión Europea

AIDIMME
INSTITUTO TECNOLÓGICO

Domicilio fiscal —
C/ Benjamín Franklin 13. (Parque Tecnológico)
46980 Paterna. Valencia (España)
Tlf. 961 366 070 | Fax 961 366 185

Domicilio social —
Leonardo Da Vinci, 38 (Parque Tecnológico)
46980 Paterna. Valencia (España)
Tlf. 961 318 559 - Fax 960 915 446

aidimme@aidimme.es
www.aidimme.es