



INFORME 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”

Informe Final de Resultados

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 INNOVACION



Financiado por
la Unión Europea

AIDIMME
INSTITUTO TECNOLÓGICO

ÍNDICE

1	<u>INTRODUCCIÓN, OBJETIVOS DEL PROYECTO</u>	1
1.1	EMPRESAS COLABORADORAS	1
2	<u>ACTIVIDADES REALIZADAS, DESARROLLO DEL PROYECTO</u>	3
2.1	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.	3
2.1.1	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	3
2.1.2	TAREA 4.2. DESARROLLO DE PARÁMETROS SIGUIENDO LAS ESTRATEGIAS PARA AUMENTAR LA PRODUCTIVIDAD EN TECNOLOGÍAS SLS Y LCD	6
2.1.3	TAREA 4.3. RECOMENDACIONES GENERALES PARA AUMENTO DE PRODUCTIVIDAD EN LAS TECNOLOGÍAS DE FABRICACIÓN ADITIVA DE ESTE ESTUDIO	22
2.2	PAQUETE DE TRABAJO 5. ESTUDIO DE LA EVOLUCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL MATERIAL BAJO CONDICIONES SEVERAS DE USO	25
2.2.1	TAREA 5.1. ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES DE LOS MATERIALES PROCESADOS CON CONDICIONES ESTÁNDAR	25
2.2.2	TAREA 5.2. ESTUDIO DE LA EVOLUCIÓN DE LAS PROPIEDADES DE LOS MATERIALES SOMETIDOS A ENVEJECIMIENTO ACELERADO	27
2.2.3	TAREA 5.3. EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS PARA SU APLICACIÓN EN CASOS INDUSTRIALES	44
2.3	PAQUETE DE TRABAJO 6: DESARROLLO DE DEMOSTRADORES INDUSTRIALES.	45
2.3.1	TAREA 6.1. ESTUDIO DE LA METODOLOGÍA PARA LA APLICACIÓN DE TEXTURAS 3D SOBRE SUPERFICIES COMPLEJAS.	45
2.3.2	TAREA 6.2: DESARROLLO DE DEMOSTRADORES INDUSTRIALES	47
3	<u>RESUMEN DE RESULTADOS OBTENIDOS</u>	55
4	<u>CONCLUSIONES</u>	56
5	<u>BIBLIOGRAFÍA</u>	57

1 Introducción, objetivos del proyecto

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 (Inyección, extrusión, soplado, termoconformado, etc.) a un proceso de fabricación aditiva, además de buscar cumplir con los requerimientos mínimos solicitados por los clientes en función al comportamiento mecánico existe un factor muy importante que también se considera, este factor es el coste de fabricación por pieza, por lo que esto justifica el estudio de mejorar la productividad del proceso.

Por otro lado, se conoce que en la actualidad se están utilizando y están apareciendo en el mercado gran cantidad de equipos de bajo coste y perfil semiindustrial. En este ámbito, para este proyecto se han seleccionado dos tecnologías muy prometedoras para estudiar su potencial de productividad, las tecnologías son la SLS (Selective laser sintering: sinterizado selectivo por láser) tecnología de Fusión de lecho de polvo y LCD (Liquid Crystal Display: pantalla de cristal líquido) tecnología de Fotopolimerización en tanque. Además, se conoce de la necesidad de uso de estas tecnologías para la fabricación de productos, tanto para interiores como para exteriores, hecho de da sustento a los estudios planteados para entender y evaluar el envejecimiento de estos materiales simulando su comportamiento a la intemperie.

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 efectos como la deformación en la solidificación conocida como “warping”.
2. Caracterización de muestras antes y después de envejecimiento, para verificar la capacidad 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,

1.1 Empresas colaboradoras

Las empresas que cooperan en el proyecto son usuarias habituales de las tecnologías de fabricación aditiva y/o de procesado con materiales poliméricos, tanto para la realización de prototipos como piezas finales en diversos materiales como metal y/o polímeros y están muy interesadas en su desarrollo. A continuación, se muestra el listado de las empresas cooperantes en el proyecto y la razón de su participación en el proyecto.

- **CLINICA GIRONÉS:** Es una clínica podológica situada en Valencia que ofrece servicios de podología que van desde estudios biomecánicos especializados en la pisada hasta prácticas quiropodológicas habituales. La tipología de producto que ofrece la clínica (plantillas

ortopédicas a medida entre otros) se ajusta mucho al tipo de producto que tiene sentido producir mediante tecnologías de fabricación aditivas. Estas plantillas se ajustan para cada paciente y, por tanto, la flexibilidad y ausencia de moldes que aportan estas técnicas lo convierten en un producto con potencial para ser fabricado mediante técnicas aditivas, están interesados en la obtención de plantillas donde se requiere un compromiso mejorado entre rigidez y elasticidad. En varias tareas de este proyecto, la empresa participará en la evaluación de los materiales de estudio y en la selección y comprobación de demostradores de plantillas lo cual es su principal interés.

- **CLADES COMPOSITES S.L.:** Es una empresa con base tecnológica especializada en el desarrollo de productos y servicios innovadores aplicados a la industria. Una dilatada experiencia en el sector y un importante know-how adquirido permite responder con innovadoras soluciones tecnológicas, en los últimos años se ha dedicado al desarrollo de materiales para tecnologías de fabricación aditiva para el procesado de polímeros. Resulta de su interés el diseño de una metodología para aplicación de texturas y patrones en superficies complejas, para aportar valor añadido a las piezas producidas mediante estas técnicas, tanto por el valor estético, como por el hecho de poder mitigar el efecto capeado / teselado que normalmente se observa en las piezas fabricadas por las mismas. Está interesada en la aplicabilidad de texturizados a piezas de uso industrial en el sector del Hábitat. La empresa está interesada en participar en las varias tareas de este proyecto, donde tendrán acceso y contribuirán en la evaluación de los materiales de estudio y en la selección y comprobación de demostradores de piezas seleccionadas para ser sometidas a condiciones severas con aplicabilidad en Hábitat
- **GH ELECTROTERMIA S.A.:** Es uno de los mayores grupos de empresas y con más experiencia en la aplicación del calentamiento por inducción en la industria cuya empresa matriz se encuentra en Valencia, España. Es un grupo sólido y fiable con más de 4000 clientes y 50 años de know-how e innovación, siendo pionera en tecnología de inducción, sirve a diferentes sectores industriales generando multitud de sinergias. Esta empresa se dedica al desarrollo y fabricación de piezas que están sometidas a elevadas temperaturas y piezas flexibles para aplicaciones industriales. Tiene una larga experiencia como usuario de tecnologías de fabricación aditiva tanto en polímero como en metal. Por lo tanto, se valora mucho su participación en este proyecto para identificar y estudiar la aplicabilidad de estas tecnologías a nuevos productos. La empresa participará en varias tareas de este proyecto, específicamente en la evaluación de los materiales de estudio y en la selección y comprobación de demostradores de piezas cuya resistencia se considera adecuada para sus aplicaciones específicas en duchas industriales para enfriado de piezas metálicas, por ejemplo, entre otros.
- **VALVER SPEED AIR S.L.:** Es una empresa que desarrolla, fábrica, suministra, monta y ofrece el más completo servicio técnico en sistemas de pintura industrial para cualquier necesidad en la empresa, se encarga de fabricar diferentes equipos de pintura y sistemas de aplicación, trasvase y almacenaje de líquidos para usuarios y empresas consumidoras de productos líquidos como barnices y pinturas. Es usuaria habitual de tecnologías de fabricación aditiva en general y especializada en piezas para sistemas de pintura, en este caso piezas poliméricas de alta resistencia mecánica y a agentes químicos. Su participación se centrará varias tareas, donde entrará en la evaluación de los resultados obtenidos en los materiales de estudio, en el texturizado y selección y desarrollo de demostradores de piezas para sistemas de pulverización para aplicación de pinturas, entre otros.

2 Actividades realizadas, desarrollo del proyecto

El plan de trabajo establecido para el Proyecto ESTRATOS constó de 6 paquetes de trabajo a desarrollar. El proyecto consta de tres paquetes de trabajo horizontales; el de gestión y coordinación, el de difusión y el de transferencia y promoción de los resultados, así como de tres paquetes de trabajo técnicos. Se muestran y describen a continuación.

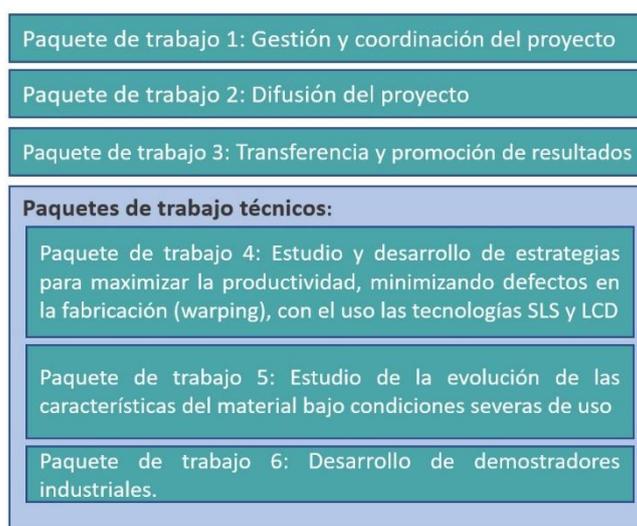


Ilustración 1. Paquetes de trabajo del Proyecto ESTRATOS

2.1 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.

2.1.1 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

En esta tarea se identificaron diversas estrategias para el aumento de la productividad en el proceso de fabricación de piezas poliméricas. Estrategias compatibles con la naturaleza de las tecnologías de fabricación aditiva por láser de lecho de polvo (SLS) y por fotopolimerización en cuba (LCD). Para ello se realizó una revisión bibliográfica de los materiales adecuados según la tecnología, se seleccionaron los materiales a estudiar y luego para cada tecnología se han definido las estrategias.

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* 2022¹, 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

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 resistencia²

¹ 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>

²Riyaz 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

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.

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 un volumen máximo de impresión de 180 x 130 x 340 (mm)". Este equipo tiene los parámetros de proceso abiertos, es decir, trae de fábrica 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, entre ellos: PA12 Ind, PA11 Onyx, PA11CF, PA11 ESD, PP; PBT Optimal y Flexa performance, se han resumido las propiedades mecánicas, propiedades físicas y características generales obtenidas de las diferentes especificaciones técnicas de la página web de Sinterit ³

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. 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 el cual es de un 20% para este material.

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 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

³ <https://sinterit.com/materials/>

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.

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, 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 un 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, las resinas evaluadas han sido: HighTemp DL400, DURABLE 110HB, DURABLE, HARD duramax, Rigid DL240, EPD 1006, EPD 1086, EPD 2006, EPD 3500, EPD 4006, FLD 5006 y PA12 MJF. 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)

Estudio de estrategias para la tecnología LCD:

Los parámetros modificables en el equipo LC Magna para la tecnología LCD, son pocos por lo que 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 100 μm recomendadas hasta valores de 175 y 250 μm .

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

Después de la selección de las estrategias en la tarea 4.1, se realizó un Diseño de Experimentos (DOE), donde se evaluaron diferentes conjuntos de parámetros de proceso de las estrategias identificadas con el fin de conocer los parámetros que permitirían obtener un conjunto de piezas sin warping (doblado). Este diseño de experimentos (DOE) se realiza partiendo de los parámetros de proceso estándar que ofrecen los fabricantes de las materias primas a utilizar en las tecnologías SLS y LCD, realizando modificaciones en ciertos parámetros, en este caso, relacionados con la mejora de la productividad.

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. 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. En la ilustración 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), el cubo macizo se fabrica bien con la posición inclinado a 45° y se obtiene una densidad aproximada de 0,998 g/cm³ determinada como masa sobre volumen, por lo que los parámetros se consideran correctos.

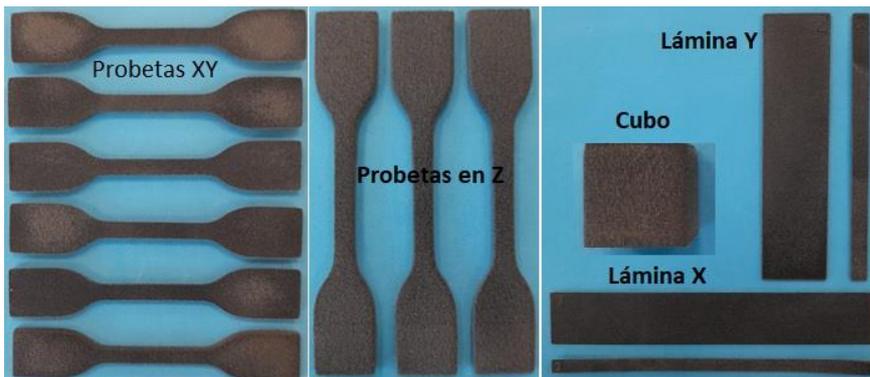


Ilustración 2. Probetas fabricadas en XY, probetas en Z, cubo y láminas, condiciones standard Flexa performance

Las probetas de tracción se han ensayado según la norma UNE ISO 37⁴, norma para elastómeros, caucho, vulcanizados o termoplásticos; los resultados se muestran en la figura siguiente.

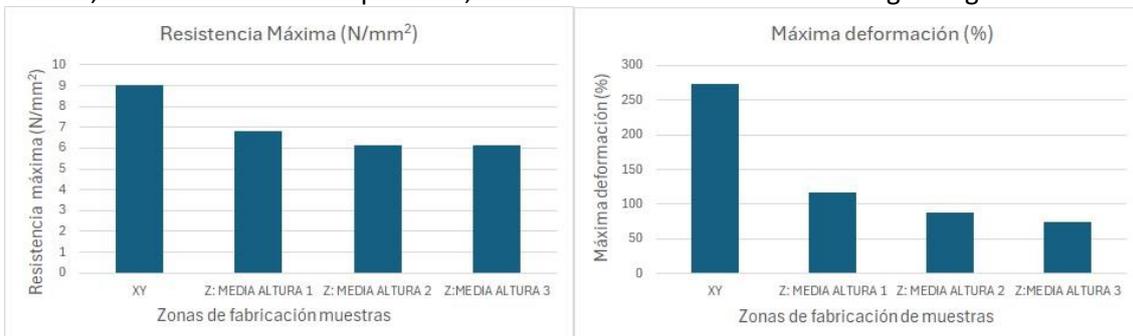


Ilustración 3. Propiedades mecánicas probetas en XY y en 3 alturas de Z, Flexa Performance, condiciones standard

Sinterit reporta para este material una resistencia máxima a la tracción de 7,99 N/mm² y un

⁴ UNE-ISO 37:2013: Elastómeros. Caucho, vulcanizados o termoplásticos. Determinación de las propiedades de esfuerzo-deformación en tracción.

valor de deformación máxima de 182,63 %. 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/mm² 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. Se han realizado 4 fabricaciones modificando parámetros de proceso para aumentar la productividad, se describen a continuación:

Fabricación 1 para optimización de parámetros del proceso SLS:

Para la primera fabricación, 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 puede verse la bandeja de fabricación y las láminas X y en Y, las cuales 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.

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 figuras siguientes.

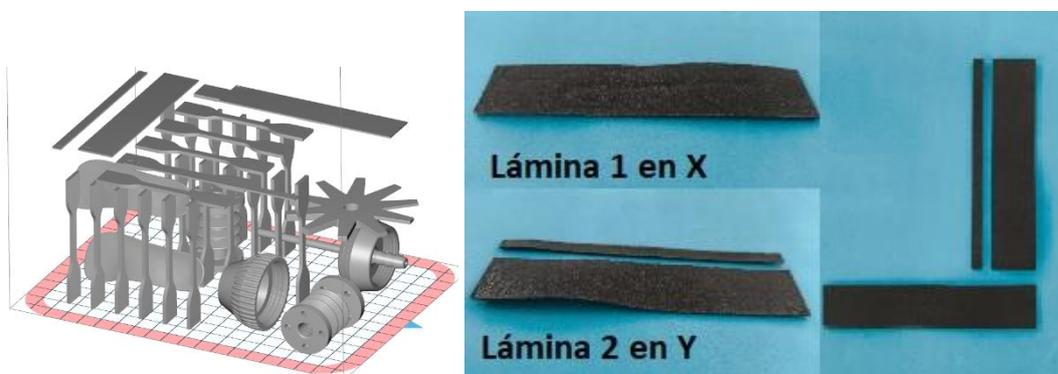


Ilustración 4. Bandeja de fabricación 1 de Optimización y Láminas fabricadas en X y en Y, espesor de capa 175µm



Ilustración 5. Pieza demostrador 1 empresa colaboradora VALVER (Pincel pequeño) fabricada en XY, con defectos



Ilustración 6. Pieza demostrador 1 Empresa Clínica Girones (Plantilla pequeña) a 45° y estrella espesores, con defectos



Ilustración 7. 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. 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 37⁵, norma para elastómeros, caucho, vulcanizados o termoplásticos; los resultados se muestran en la figura.

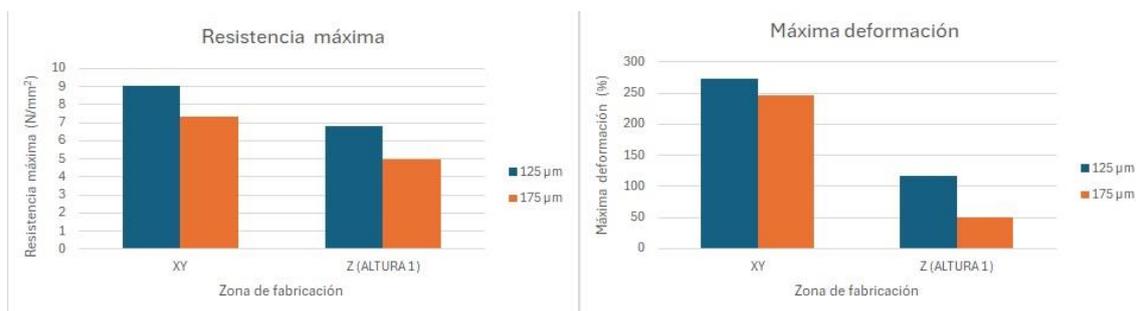


Ilustración 8. Propiedades mecánicas de probetas en XY y en Z altura 1, 125 μm y 175 μm

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/mm² y la máxima deformación tuvo una pequeña disminución, en cambio en Z hay una disminución en la resistencia mecánica pasando desde 6,80 N/mm² hasta 5 N/mm² 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:

Hay una disminución de las propiedades mecánicas medidas en piezas fabricadas en Z, al aumentar el espesor de capa, 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. 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 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, esta disminución o aumento la realiza el equipo aumentando o disminuyendo la velocidad de barrido del láser. Esta modificación de parámetros siguió

⁵ UNE-ISO 37:2013: Elastómeros. Caucho, vulcanizados o termoplásticos. Determinación de las propiedades de esfuerzo-deformación en tracción.

recomendaciones de la empresa Sinterit fabricante del equipo y del material. Se observa la bandeja en la figura, 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.

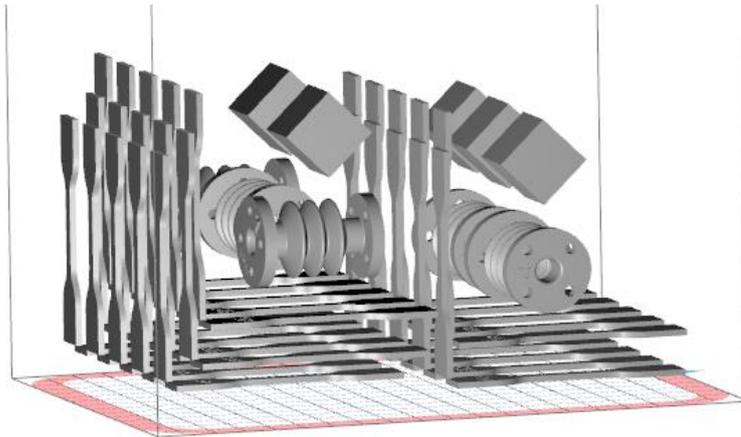


Ilustración 9. Bandeja de fabricación Material Flexa Performance, optimización 2

Durante la fabricación se observó que las probetas se estaban fabricando con exceso de energía, con una fusión muy grande, 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. 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.

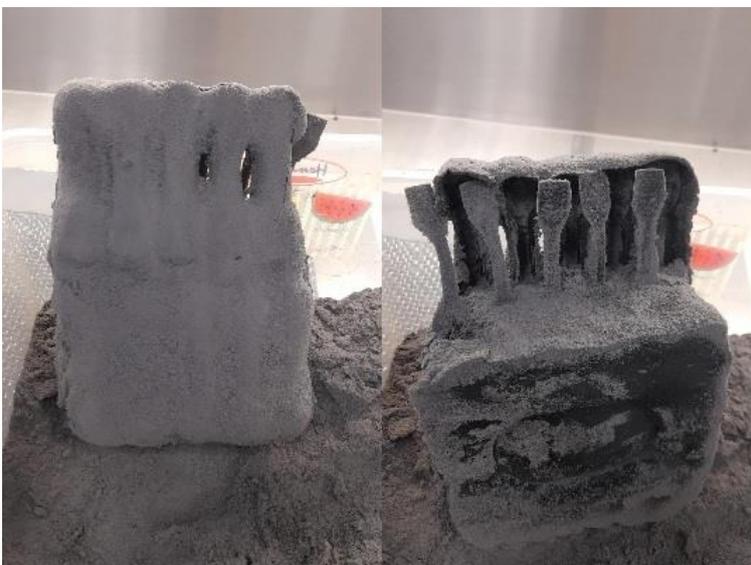


Ilustración 10. Piezas en la fabricación con Flexa performance, optimización 2

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.

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/cm³; en la siguiente tabla, 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.

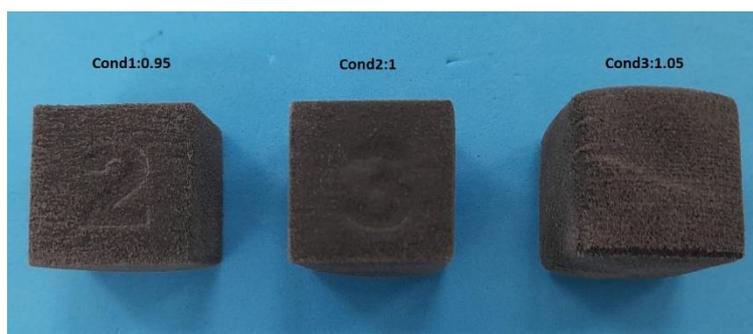


Ilustración 11. Cubos macizos de densificación, con tres condiciones de Escala de energía

Tabla 2. 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.

En la siguiente figura pueden verse las propiedades mecánicas que se obtienen al modificar la energía de escala. 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/mm² y de máxima deformación de 182,63 %, valores muy alejados cuando se fabrican las piezas en Z.

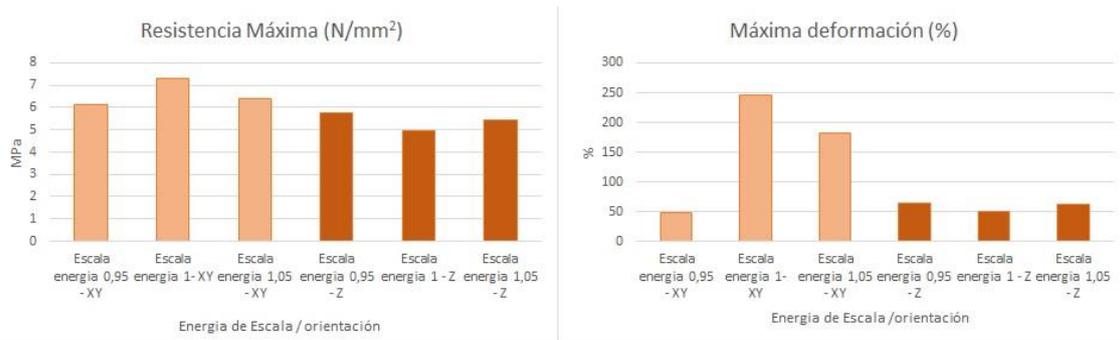


Ilustración 12. Propiedades mecánicas en XY y Z con diferentes Escalas de energía, fabricación 3 optimización

Fabricación 4 para optimización de parámetros del proceso SLS:

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

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, placas lisas y con texturas, entre otras, así como probetas de tracción en Z. En la ilustración pueden verse algunas de las piezas, así como la bandeja completa que se fabricó. Como resultado se tiene una pieza con líneas horizontales, defecto no permitido. 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.

Se repite la fabricación después del mantenimiento del equipo, 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.

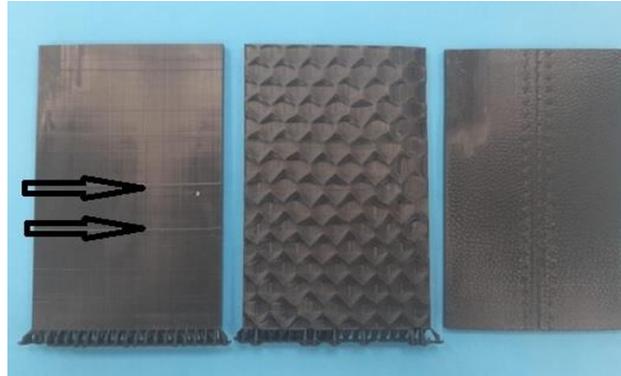


Ilustración 14. Placas y Pieza salpicadero en DL110HB, con defectos antes del mantenimiento del equipo



Ilustración 15. Placas fabricadas después del mantenimiento y 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, pero el resultado no es el esperado, obteniéndose líneas de nuevo. Con respecto a las estrellas fabricadas inclinadas a diferentes ángulos, se observa que solo la más horizontal sale sin líneas, las letras están muy bien definidas, siguiente figura. 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 figura.

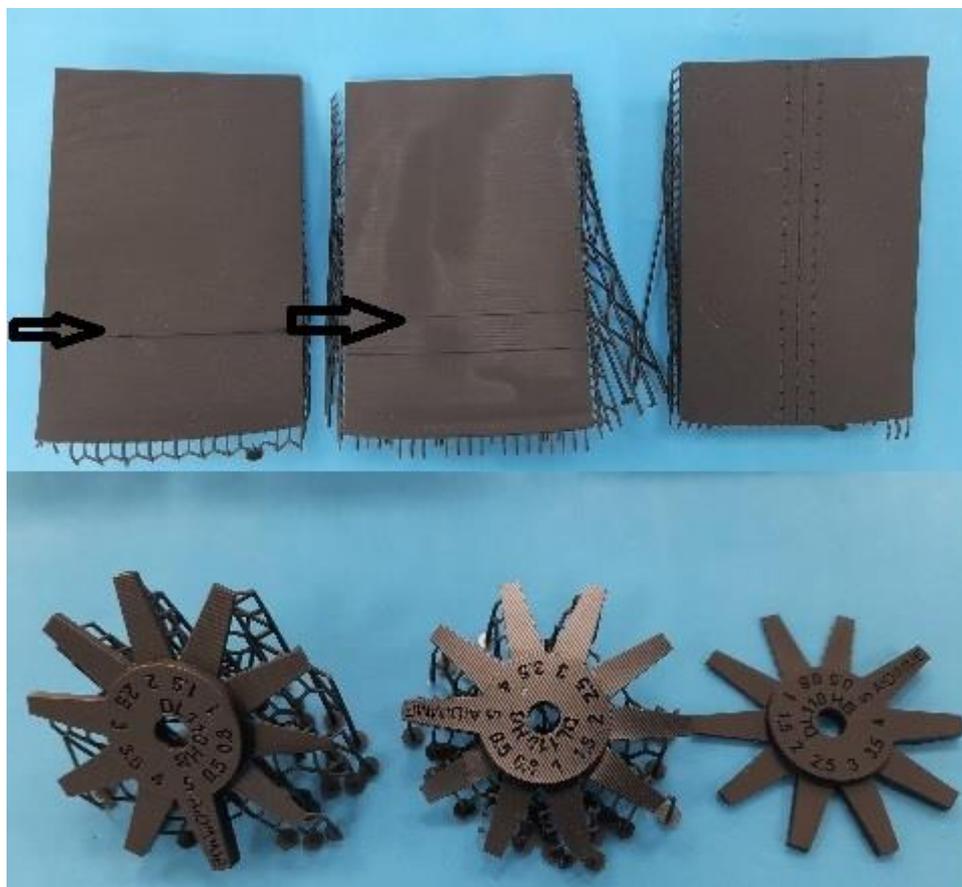


Ilustración 16. Fabricación de placas inclinadas y estrellas inclinadas, resina DL110HB.



Ilustración 17. 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 fabricó la pieza demostrador de GH Electrotermia con muy buenos y aceptables resultados.

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 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).

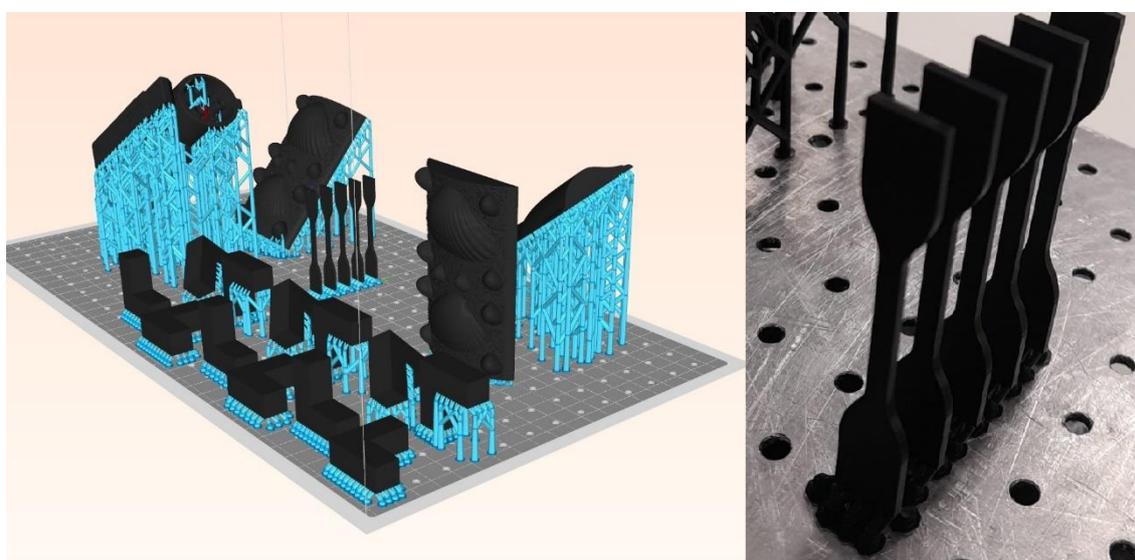


Ilustración 18. Bandeja de fabricación condiciones standard, 100µm, Resina HARD y probetas de tracción en Z.

Las probetas de tracción se han ensayado según la norma UNE ISO 527-2 ⁶, norma para determinar propiedades mecánicas en polímeros rígidos y semirrígidos; los resultados se muestran en la tabla 8:

Tabla 3. Propiedades mecánicas determinadas en Z, 100 µm

	Resist. Máxima		Max Deformación	
	N/mm ²	Desv. St.	%	Desv. St.
Fabricante				
Photocentric	52	-	10⁷	-
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/mm²

⁶ UNE-ISO 527-2:2012: Plásticos. Determinación de las propiedades en tracción. Parte 2: Condiciones de ensayo de plásticos para moldeo y extrusión.

⁷ <https://photocentricgroup.com/wp-content/uploads/2024/09/TDS-Magna-Hard-Black.pdf>

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

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 $100 \mu\text{m}$ hasta $250 \mu\text{m}$, 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.

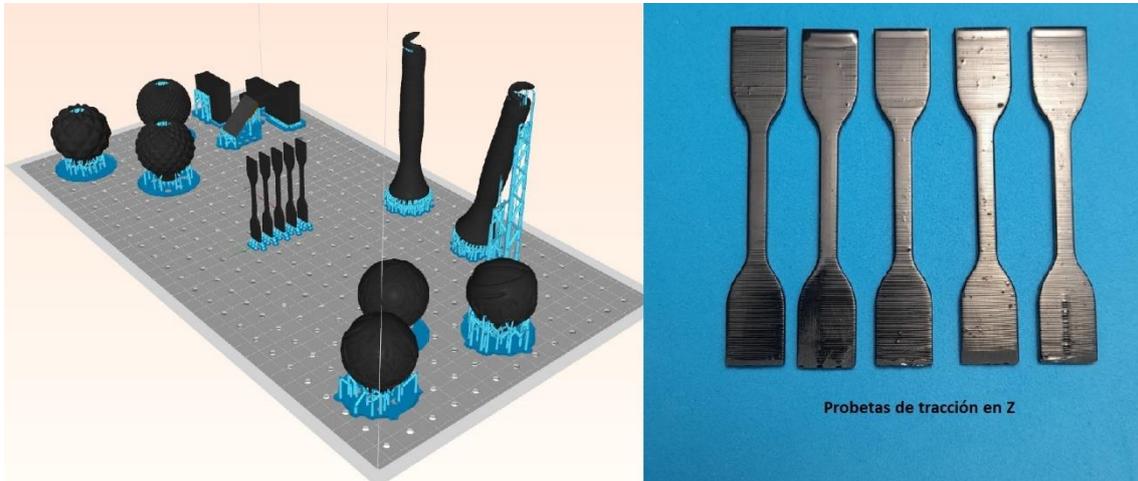


Ilustración 20. Bandeja de fabricación 250 μm, resina HARD y probetas de tracción en Z

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 siguiente. Las piezas para el estudio de texturas que se ven en la bandeja se han fabricado correctamente y se analizaran en el paquete de trabajo 6.



Ilustración 21. Pieza demostrador 3 empresa VALVER, mango de pistola

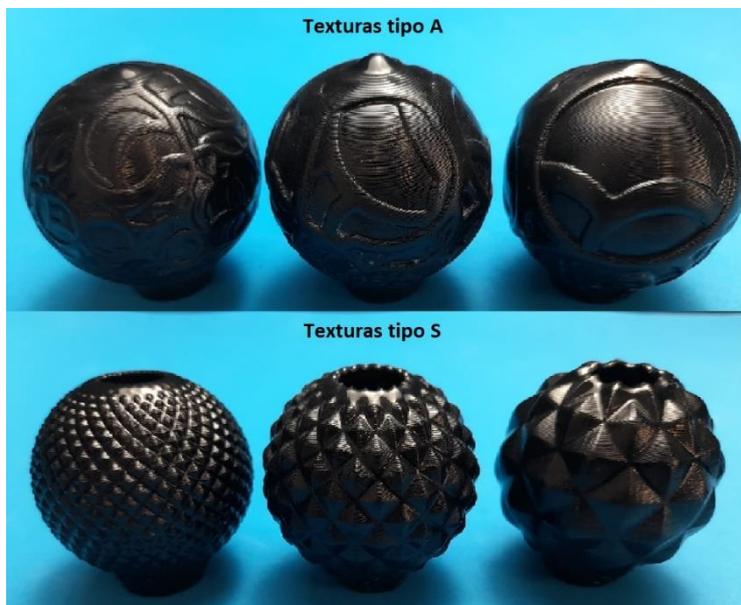


Ilustración 22. Piezas para estudio de texturas PT6

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 175 μm , 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.

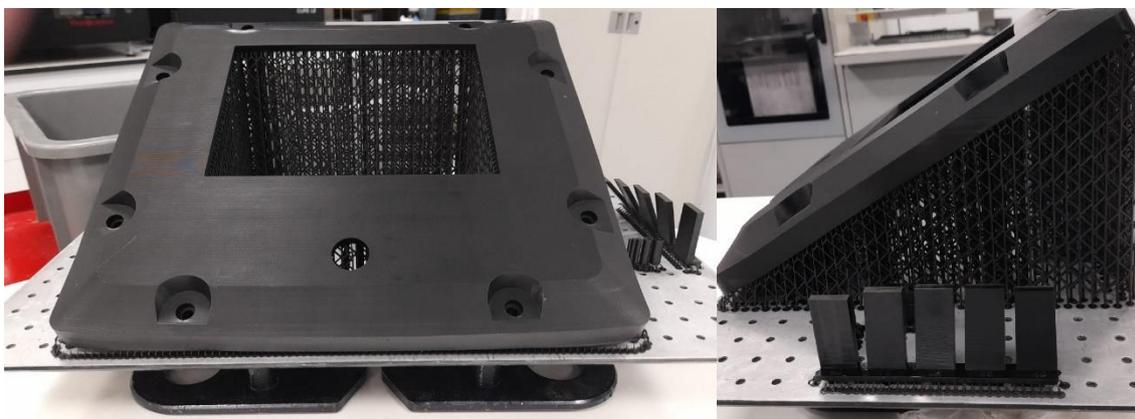


Ilustración 23..Bandeja de fabricación 175 μm , resina HARD, carcasa grande de empresa Gh Electrotermia

En la figura puede verse el tamaño del demostrador 3 de la empresa GH Electrotermia, la carcasa grande ocupa casi toda la bandeja, puede verse en la ilustración siguiente que 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.

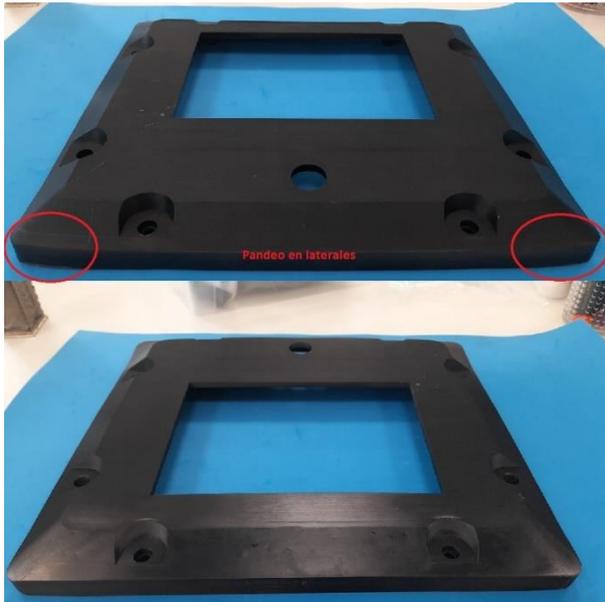


Ilustración 24. Pieza demostrador 3 carcasa Grande, empresa GH Electrotermia, defectos de pandeo



Ilustración 25. Pieza demostrador 3 para empresa VALVER, mango de pistola con soporte mejorado en parte roscada.

.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.

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/mm², 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.

Tabla 4. Propiedades mecánicas determinadas en Z, 100, 175 y 250 μm

	Resist. Máxima		Max Deformación	
	N/mm ²	Desv. St.	%	Desv. St.
Fabricante				
Photocentric	52	-	10⁸	-
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

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, 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.

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

Se ha desarrollado un análisis de la factibilidad de utilizar las estrategias establecidas en la tarea 4.2, en función de la productividad alcanzada y de la no presencia de warping (doblado en las piezas) en las tecnologías SLS y LCD, con por lo menos un material por tecnología. Esto se ha hecho en función la tasa de fabricación.

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

⁸ <https://photocentricgroup.com/wp-content/uploads/2024/09/TDS-Magna-Hard-Black.pdf>

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. Se ha calculado la tasa de fabricación en número de piezas por 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 5. 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.

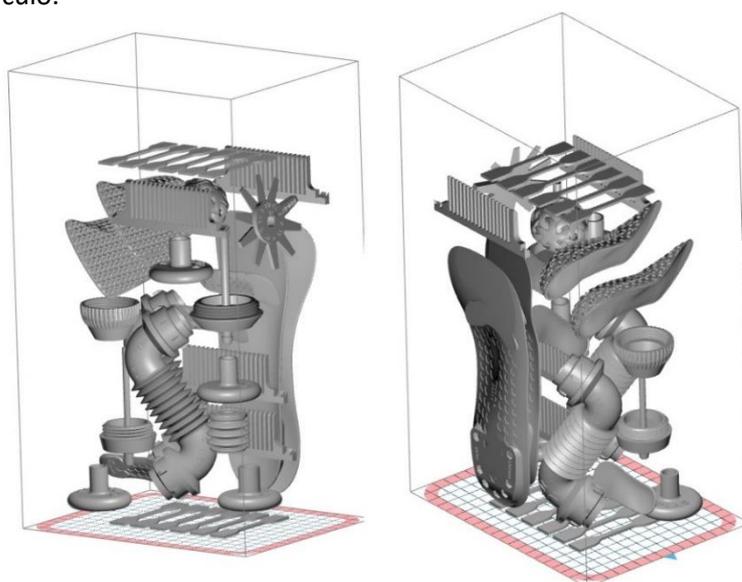


Ilustración 26. Bandeja de fabricación para simulación de productividad en la tecnología SLS, material Flexa Performance

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. Se ha calculado 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 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 6. 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%

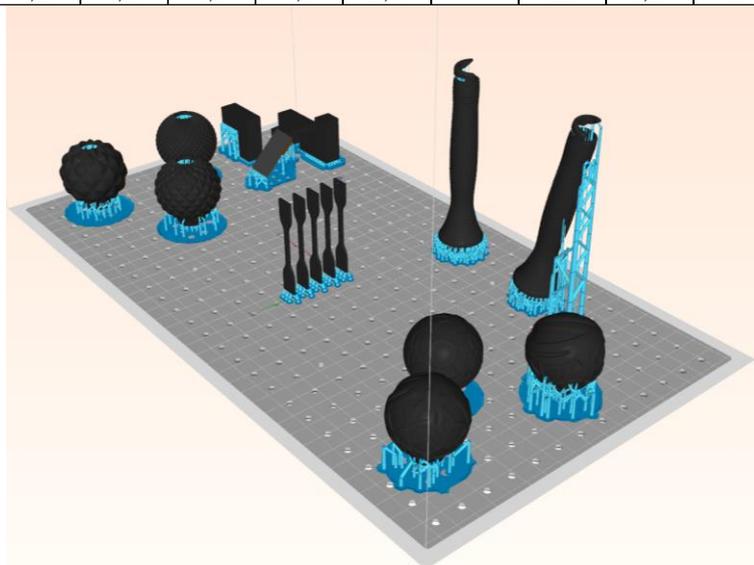


Ilustración 27.. Bandeja de fabricación utilizada para el cálculo del aumento de la productividad en la tecnología LCD, material resina HARD.

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.

2.2 Paquete de trabajo 5. Estudio de la evolución de las características del material bajo condiciones severas de uso

El objetivo de este paquete de trabajo es realizar un estudio del material procesado en condiciones estándar y después de estar sometido a condiciones severas de envejecimiento, se evaluaron las propiedades mecánicas y lo detallado en cada una de las tareas que se especifican para por lo menos un material para las tecnologías SLS y LCD.

2.2.1 Tarea 5.1. Estudio de las propiedades de los materiales procesados con condiciones estándar

Tecnología de fabricación aditiva de fusión de lecho de polvo en polímeros (PBF-LB/P), conocida como SLS

Caracterización mecánica inicial del material Flexa Performance procesado con la tecnología SLS

Se realizaron los ensayos mecánicos de tracción según la norma UNE ISO 37⁹ para elastómeros, caucho, vulcanizados o termoplásticos con la finalidad de verificar que las propiedades obtenidas se asemejen a lo que reporta el fabricante del equipo Lisa X de Sinterit, obteniéndose los resultados de la tabla, como puede verse la resistencia mecánica expresada como la resistencia máxima, tiene un valor cercano y la deformación máxima que estamos obteniendo es un poco menor a lo esperado, pero lo consideramos aceptable para comenzar con los ensayos de envejecimiento.

Tabla 7. Comparativa de propiedades mecánicas que reporta el fabricante en XY y las probetas de tracción fabricadas en AIDIMME en Z, material Flexa Performance, tecnología SLS

	Resist. Máxima		Max Deformación	
	N/mm ²	Desv. St.	%	Desv. St.
Fabricante				
Sinterit (En XY)¹⁰	7,99	-	182,63	-
Probetas en Z	6,27	0,72	70,10	21,40

⁹ Norma UNE-ISO 37:2013: Elastómeros. Caucho, vulcanizados o termoplásticos. Determinación de las propiedades de esfuerzo-deformación en tracción.

¹⁰ <https://sinterit.com/materials/flexa-performance/>

Inspección visual en probetas procedimiento:

Para el análisis dimensional de las probetas de tracción fabricadas con la tecnología Photocentric, muestra fabricada en resina DL110HB y en la tecnología de lecho de polvo de Sinterit, muestra de material flexible Flexa Performance: se ha escaneado una probeta de cada una de las tecnologías mediante el escáner láser Handyscan Black de Creafom con una precisión de hasta 0.035mm.



Ilustración 28. Escáner Handyscan Black

Para el escaneado de la pieza se requiere la preparación de la zona de escaneo con dianas en todos los planos para que el escáner capte la información y la colocación de la probeta a escanear para que se acceda a su geometría. Para el escaneado, modelado, reconstrucción e inspección de las piezas se utiliza el software Vx Elements que está compuesto por varios módulos: Vx Scan, Vx Model y Vx Inspect.

Escaneado de probeta fabricada en material Flexa Performance, tecnología SLS:

Cuando se realiza el escaneado se capta información tanto de la probeta como del entorno que contiene las dianas, se elimina toda la información que sobra con el fin de dejar solamente la probeta, una vez eliminada la información sobrante, se seleccionan los parámetros adecuados y se procesa la malla.

Se genera el fichero stl escaneado y se abre en el módulo de inspección (VXinspect), donde además del fichero escaneado, se incluye el fichero original como referencia en formato step. Se abre la pieza escaneada de la tecnología SLS de sinterit y la probeta referencia en el módulo VXinspect para alinear las geometrías y hacer la comparativa dimensional. Se ha realizado la comparativa dimensional de las probetas mediante un mapa de colores. Se concluye que en general la probeta escaneada de la tecnología SLS sinterit es más gruesa que la probeta de referencia, teniendo una desviación positiva de 0.3 mm en general en la zona calibrada de la probeta. Hay zonas de las mordazas que la desviación llega a 0.8 mm. La longitud de la probeta no se ha tenido en cuenta porque esa zona no se escaneo bien.

Tecnología de fabricación aditiva de fotopolimerización en tanque o cuba, Vat Photo Polymerization (VPP), conocido como LCD

Caracterización mecánica inicial del material DL110HB procesado con la tecnología LCD

Para la caracterización mecánica inicial el material DL110HB se utiliza la norma UNE ISO 527_1¹¹ para polímeros rígidos, para verificar que las propiedades obtenidas se asemejen a lo que reporta el fabricante del equipo LC Magna, obteniéndose los resultados de la tabla, tanto la resistencia máxima como la máxima deformación obtenidas son inferiores, pero se consideran valores aceptables para realizar los ensayos de envejecimiento.

Tabla 8. Comparativa de propiedades mecánicas que reporta el fabricante y las probetas de tracción fabricadas en AIDIMME en Z, material DL110HB, tecnología LCD.

	Resist. Máxima		Max Deformación	
	N/mm ²	Desv. St.	%	Desv. St.
Fabricante				
Photocentric ¹²	60	-	14	-
Probetas en Z	44,30	0,45	5,69	0,23

Escaneado en probetas tecnología LCD

Se realiza el mismo procedimiento que con la probeta de la tecnología SLS. Se abre la probeta escaneada de la tecnología LCD Photocentric y el fichero original (referencia), pero cada una de ellas está en una zona del espacio diferente y hay que alinearlas para poder compararlas. Se ha realizado la comparativa dimensional de las probetas mediante un mapa de colores. En general la probeta escaneada del material DL110HB de Photocentric está dentro de la tolerancia de ± 0.1 mm a excepción de la zona de redondeo que como se puede comprobar es menor de lo que debería ser, con una desviación de en torno a -0.65 mm. La longitud de la probeta no se ha tenido en cuenta porque esa zona no se escaneo bien.

2.2.2 Tarea 5.2. Estudio de la evolución de las propiedades de los materiales sometidos a envejecimiento acelerado

Para la fase de envejecimiento y caracterización se planteó someter el material objeto del estudio a un ciclo de envejecimiento acelerado en laboratorio, el cual se explica más adelante. Mediante este envejecimiento se pretende observar la evolución y el comportamiento de dicho material en condiciones de exterior.

¹¹ Norma UNE-EN ISO 527-1:2020. Plásticos. Determinación de las propiedades en tracción. Parte 1: Principios generales.

¹² <https://photocentricgroup.com/wp-content/uploads/2024/02/TDS-DL110H-2023-v3.pdf>

Revisión bibliográfica:

En esta fase, se partió de materiales estándar para los cuales se han fabricado probetas de tracción y una placa para inspección visual con los parámetros estándar recomendados por los fabricantes de los equipo para las dos tecnologías de fabricación aditiva del estudio SLS y LCD, por lo que los materiales a envejecer y caracterizar son materiales existentes en la actualidad en el mercado. En este caso para ellos, no existe apenas documentación bibliográfica respecto a su comportamiento para exterior.

Basándose en información bibliográfica y/o normativa vigente, se planteó por una parte, clasificar diferentes ambientes atmosféricos en función de su agresividad e impacto sobre los materiales que se exponen en ellos, por otra parte definir unas durabilidades en años para dichos materiales y por último, definir un ciclo climático consolidado, que permita envejecer los materiales en laboratorio y sea un punto de partida sobre el que ir modificando variables y adaptándolo en función de los resultados que se vayan obteniendo.

La información existente encontrada está enfocada al comportamiento de metales y clasifica los ambientes en función de su corrosividad. Aunque el material objeto de este estudio es polimérico, esta clasificación es un buen punto de partida, en la siguiente tabla pueden verse las distintas categorías de diferentes niveles de corrosividad / agresividad de ambientes exteriores habituales:

Tabla 9. Categorías de niveles de corrosividad/agresividad.

Categoría	Nivel de Corrosividad / Agresividad	Ejemplos de ambientes exteriores habituales
C1	Corrosividad / Agresividad muy baja	(Sin aplicación para ambientes exteriores)
C2	Corrosividad / Agresividad baja	Atmósferas con bajo nivel de contaminantes: básicamente áreas rurales.
C3	Corrosividad / Agresividad media	Atmósferas urbanas e industriales, contaminación moderada de dióxido de azufre: áreas costeras con baja salinidad.
C4	Corrosividad / Agresividad alta	Áreas industriales y áreas costeras con salinidad moderada.
C5	Corrosividad / Agresividad muy alta	Áreas industriales con elevada humedad y atmósfera agresiva y áreas costeras con elevada salinidad.
CX	Corrosividad / Agresividad extrema	Áreas de ultramar con elevada salinidad y áreas industriales con humedad extrema y atmósfera agresiva y atmósferas subtropical y tropical.

Para cada uno de estos ambientes se encuentran diferentes rangos de durabilidad, expresados en años y entendidos como tiempo en el que el material no necesitará de mantenimiento:

- Rango de Durabilidad Bajo: hasta 7 años
- Rango de Durabilidad Medio: de 7 años hasta 15 años
- Rango de Durabilidad Alto: de 15 años hasta 25 años
- Rango de Durabilidad Muy Alto: más de 25 años

En relación con el ciclo climático acelerado que permita envejecer el material en laboratorio y estudiar su comportamiento y evolución en función de su resistencia para ambientes exteriores, se plantea tomar como punto de partida el siguiente ciclo¹³:

Tabla 10. Ciclo climático acelerado propuesto para el proyecto.

Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	Día 6	Día 7
UV /Condensación s/UNE-EN ISO 16474-3 ¹⁴			Pulverización de Niebla Salina Neutra s/UNE-EN ISO 9227 ¹⁵			Exposición a baja temperatura a (-20 ± 2) °C

La duración de cada ciclo es de una semana durante la cual, los ensayos se suceden como sigue: Los tres primeros días se realiza ensayo de envejecimiento con luz UV y condensación de agua, para simular la acción de la exposición al sol con cambios de temperatura y condensaciones. Los tres siguientes días se realiza un ciclo de resistencia a la corrosión, en el que se exponen las probetas a un ambiente salino con temperatura fijada de 35°C. Las últimas 24 horas del ciclo, consisten en exponer las probetas a condiciones de (-20) °C. De esta manera, se consigue que las probetas pasen por los diferentes factores que podrían afectar a alguna/s de sus características en su vida útil (envejecimiento solar, efectos de la condensación de agua, ambientes corrosivos y bajadas de temperatura que pueden provocar contracciones / dilataciones de los materiales).

En este caso se considera importante partir de un ciclo que esté regulado y normalizado, para que permita posicionar los materiales objeto de estudio dentro del contexto de materiales para exterior existentes en la actualidad.

Como referencia general para el posicionado de los materiales en el contexto de materiales para uso en ambientes exteriores, se toman los tiempos de ciclo de envejecimiento siguientes:

Categoría C4 – Intervalo de Durabilidad Muy Alto: 10 ciclos de envejecimiento

Categoría C5 – Intervalo de Durabilidad Alto: 10 ciclos de envejecimiento

Categoría C5 – Intervalo de Durabilidad Muy Alto: 16 ciclos de envejecimiento

¹³ Norma UNE-EN ISO 12944-6:2018: Pinturas y barnices. Protección de estructuras de acero frente a la corrosión mediante sistemas de pintura protectores.

¹⁴ Norma UNE-EN ISO 16474-3. Pinturas y barnices. Métodos de exposición a fuentes luminosas de laboratorio. Parte 3: Lámparas fluorescentes UV. (ISO 16474-3:2021).

¹⁵ Norma UNE-EN ISO 9227. Ensayos de corrosión en atmósferas artificiales. Ensayos de niebla salina. (ISO 9227:2017).

Procedimiento experimental para los ensayos de envejecimiento acelerado

Debido a que se selecciona la Categoría C5 – Intervalo de Durabilidad Muy Alto con 16 ciclos de envejecimiento, se fabrican 80 probetas de tracción (16 ciclos * 5 probetas por ciclo), las cuales junto con la placa para control de dimensiones, brillo y color servirán para la caracterización.

Tras la realización de cada ciclo de envejecimiento (cada semana), se extrae un lote de 5 probetas de tracción y la placa. En ellas se estudian las siguientes características:

- Determinación de brillo especular (sobre la placa).
- Determinación de las coordenadas del color, variación (sobre la placa).
- Estabilidad dimensional (sobre la placa).
- Resistencia a la tracción (sobre el lote de 5 probetas de tracción).

Una vez realizada la evaluación de la placa, ésta vuelve a introducirse en el nuevo ciclo de envejecimiento, junto al resto de probetas de tracción sin evaluar. El lote de 5 probetas de tracción evaluado pasa a ensayo de resistencia a tracción. Este procedimiento se repite durante 16 semanas.

Fabricación de probetas en la tecnología SLS para los ensayos de envejecimiento acelerado:

Antes de realizar los ensayos de envejecimiento previstos durante 16 semanas, se fabricaron 80 probetas de tracción en Z ubicadas en la primera altura, así como una placa de 75 x 120 x 4 mm para la caracterización dimensional, de brillo y de color, como se menciona en la tarea 5.1, en la ilustración puede verse la ubicación de las piezas en la bandeja de fabricación del equipo Sinterit Lisa X con el material Flexa performance. La bandeja de fabricación puede verse en la figura.



Ilustración 29. Bandeja de fabricación con probetas y lámina para caracterización tras envejecido

Fabricación de probetas en la tecnología LCD para los ensayos de envejecimiento acelerado:

Se requieren por lo menos 5 probetas por cada ciclo, siendo 16 ciclos, por lo que se fabricaron 80 probetas de tracción en Z, también se fabrica una placa de 75 x 120 x 4 mm para la caracterización dimensional, de brillo y de color, en la ilustración siguiente puede verse la ubicación de las piezas en las dos (2) bandejas de fabricación utilizadas para fabricar en el equipo LC Magna con el material DL110HB. Las probetas se fabricaron correctamente al igual que la placa brillo/color, como se menciona en la tarea 5.1.

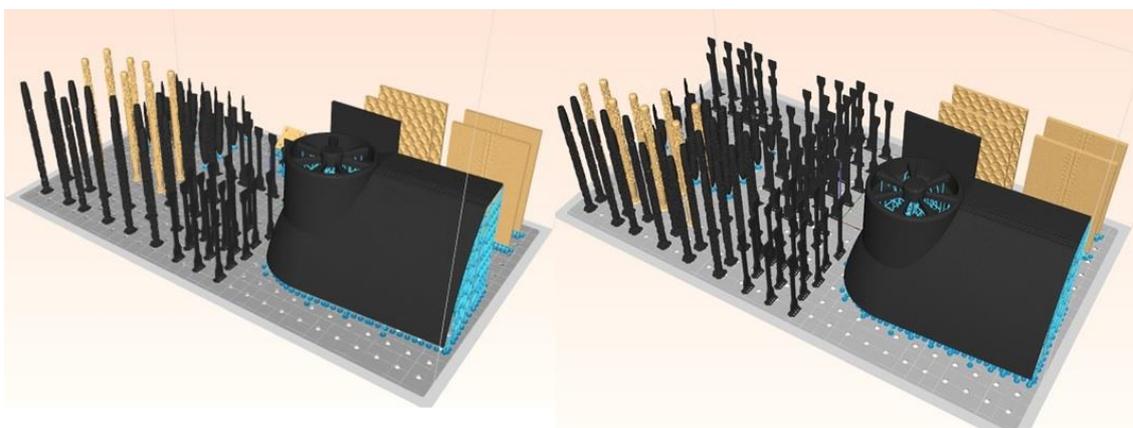


Ilustración 30. Bandejas de fabricación con probetas de tracción y placas brillo color. DL110HB

Resultados de caracterización obtenidos tras los ensayos de envejecimiento acelerado

Determinación de brillo especular:

Condiciones del ensayo de brillo especular:

El ensayo se ha realizado siguiendo la norma de ensayo: UNE-EN ISO 2813_2015¹⁶, con un equipo de ensayo Brillómetro MINOLTA MULTI-GLOSS 268, con juego de Patrones de brillo alta, medio y cero. La geometría utilizada es de 85°, puesto que se trata de superficies de bajo brillo. Para cada probeta y cada medición, se toman 5 medidas en posición paralela al lado menor de la probeta y 5 medidas en posición paralela al lado mayor de la probeta. De esta manera, se obtienen diez valores individuales y un valor medio, por cada medida. Medidas obtenidas como se muestra en las siguientes figuras.

¹⁶ Norma UNE-EN ISO 2813_2015. Pinturas y barnices. Determinación del índice de brillo especular a 20°, 60° y 85°. (ISO 2813:2014).

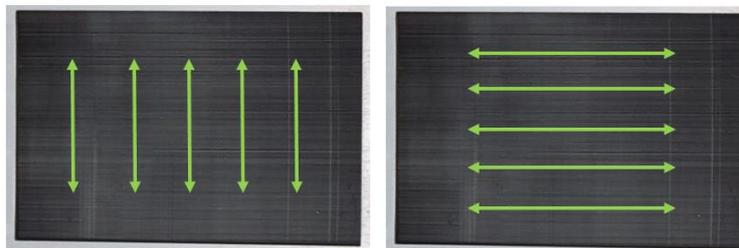


Ilustración 31. Primeras y Segundas 5 medidas de brillo

Estudio de muestra obtenida por tecnología SLS:

Medidas individuales de brillo: como se describió anteriormente se han realizado 10 medidas por condición, 5 en cada dirección, para el caso de estas se observa poca o nula variación del brillo en las muestras.

Valores medios de brillo: cuando se determinan los valores medios, todos dan cero (0), debido a que varían entre -3 y 3, no muestran una variación significativa

Estudio de la muestra obtenida con la tecnología LCD:

Medidas individuales de brillo:

Como se describió anteriormente se han realizado 10 medidas por condición, 5 en cada dirección, se observó que las primeras 5 medidas son inferiores a las segundas, estas corresponden al lado más corto que coinciden con las líneas de las capas de fabricación, por lo que las 2das son valores más alto al aparecer más contraste al medirse perpendicular a las capas.

Valores medios de brillo: cuando se determinan los valores medios se observa que aumentan a medida que la muestra está más envejecida, esto quizás se relacione con un abrillantamiento que se produce en los polímeros al fragilizarse, lo verificaremos más adelante, los resultados pueden verse en la siguiente figura.

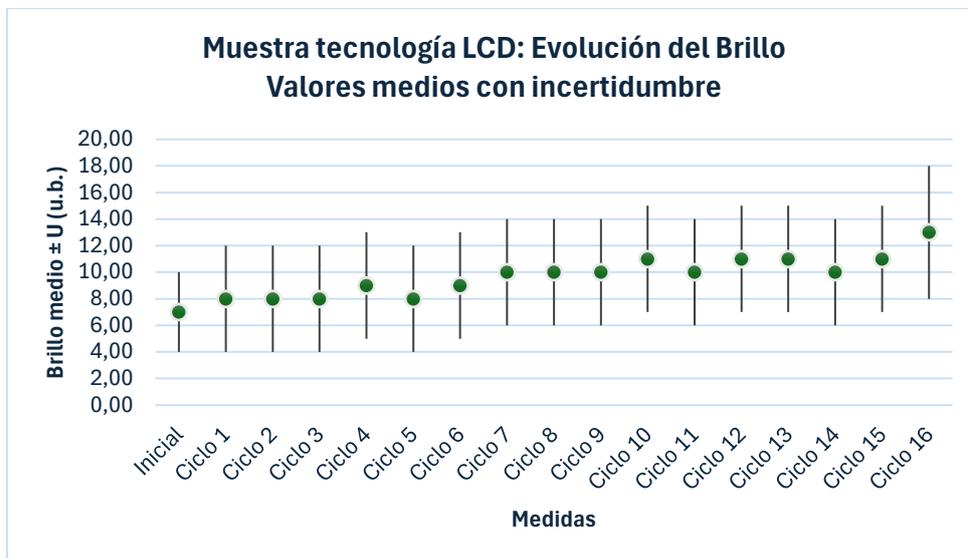


Ilustración 32. Valores medios de evolución de brillo en muestras de tecnología LCD

Determinación de las coordenadas de color:

Condiciones del ensayo de las coordenadas de color:

El ensayo se ha realizado siguiendo la norma de ensayo UNE-EN ISO 7724_1984¹⁷, con un equipo de ensayo Espectrofotómetro simplificado MINOLTA, modelo CM-508d, Sistema de color L* a* b*, iluminante CID D65, observado 10°, Modo SCI (Componente especular incluida), se toman 5 medidas distribuidas por la superficie objeto de estudio.

Muestra obtenida con tecnología SLS:

Medidas individuales obtenidos de coordenadas de color: como se describió anteriormente se han realizado 5 medidas por condición, para el caso de estas muestras puede verse que el valor que presenta mayor variación es la coordenada L*, la cual corresponde al cambio de color negro a color blanco experimentado por la muestras al envejecerse.

Valores de diferencias de color total (ΔE^*): cuando se habla del sistema de color L* a* b, en la variación de color total ΔE^* , se observa un aumento progresivo con la exposición al envejecimiento hasta el ciclo 11. A partir de ese ciclo se produce disminución progresiva y en el 16 vuelve a aumentar. Por los valores de ΔE^* , sí que se puede observar la diferencia a simple vista, aunque en los ciclos finales la tendencia cambia de un ciclo a otro. Los valores obtenidos pueden verse en la siguiente figura.

¹⁷ Norma UNE-EN ISO 7724_1984: Pinturas y barnices. Colorimetría. Parte 2: Medición del color.

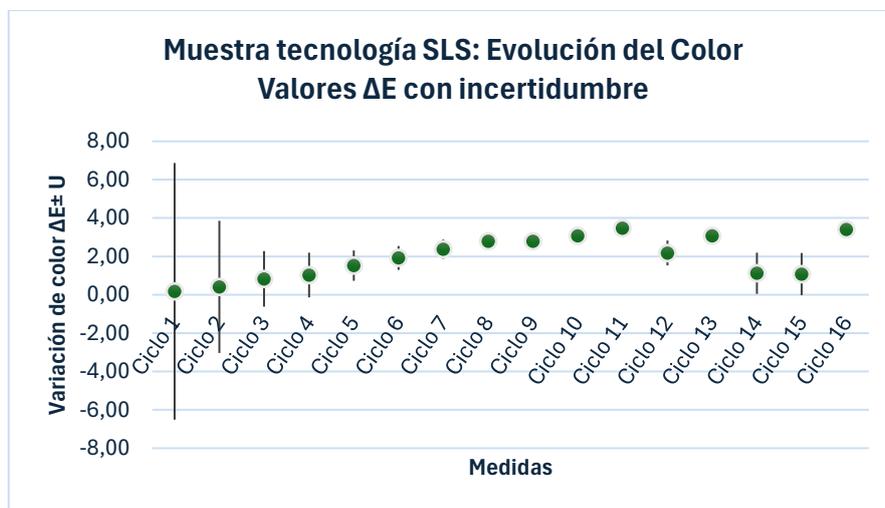


Ilustración 33. Valores ΔE de evolución del color, muestras SLS

Muestra tecnología LCD:

Medidas individuales obtenidos de coordenadas de color: como se describió anteriormente se han realizado 5 medidas por condición, para el caso de estas muestras puede verse en las coordenadas de color que se obtienen en las medidas individuales se observa que no hay prácticamente cambio a lo largo de los ciclos de envejecimiento, véase entregable 5.

Valores de diferencias de color total (ΔE^*): con respecto a la variación de color total ΔE^* , el valor mayor obtenido es de 1,01, el cual se considera pequeño y supone una ligera percepción sensorial de cambio de color. Se observan los valores medidos en la figura siguiente.

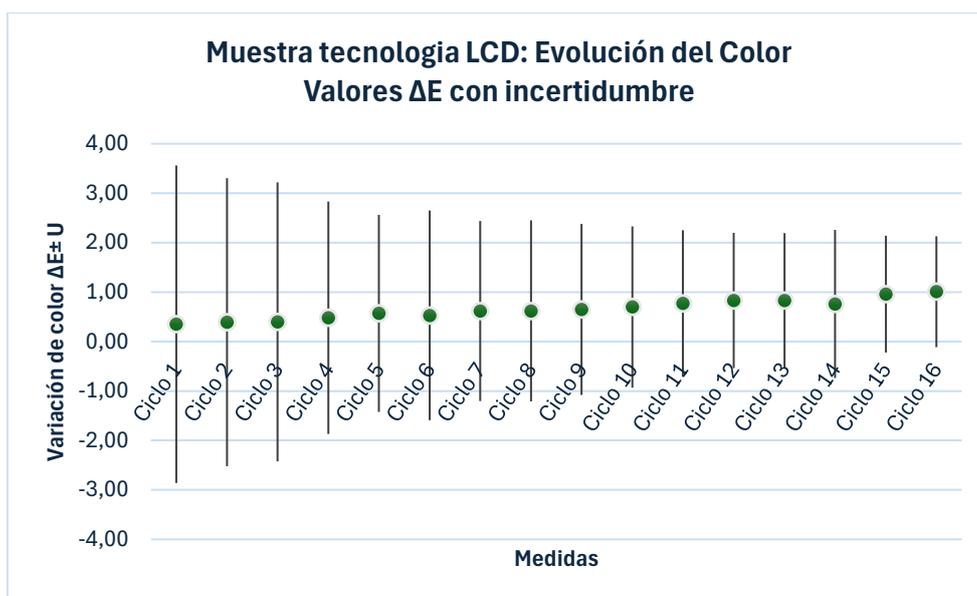


Ilustración 34. Medidas de ΔE de la evolución del color, tecnología LCD.

Determinación de la estabilidad dimensional, dimensiones

El envejecimiento al que se han sometido las muestras de ensayo implica variaciones de temperaturas importantes que, entre otras variables, podrían afectar al cambio de dimensiones de las muestras, por las dilataciones y contracciones producidas. Por esta razón, se ha realizado un control dimensional de la probeta antes del inicio del envejecimiento y posteriormente, tras la finalización de cada ciclo. Para realizar este control dimensional se debe utilizar un instrumento de medida manual que permita tomar las mediciones (por geometría de la pieza y de los palpadores del equipo), que esté debidamente calibrado y cuyas características metrológicas permitan cuantificar las posibles variaciones de dimensión que pudieran aparecer sobre la probeta objeto de estudio. En este caso, dada la geometría sencilla de la probeta y las dimensiones a medir, se ha optado por hacer el control dimensional con un Pie de Rey.

Condiciones de ensayo dimensional:

El ensayo se ha realizado siguiendo Procedimiento interno PE-CA57, con un equipo de ensayo Pie de rey TESA Modelo 05.30034, división de escala 0.01 mm, alcance 150 mm, U uso (k=2):0.03 mm, se realizan 3 medidas de cada una de las cotas, obteniendo su valor medio y la incertidumbre de éste.

Muestra obtenida por tecnología SLS: a continuación, se muestran los resultados obtenidos en las cotas 1, 2 y 3 correspondientes a la anchura, altura y espesor en las siguientes figuras.

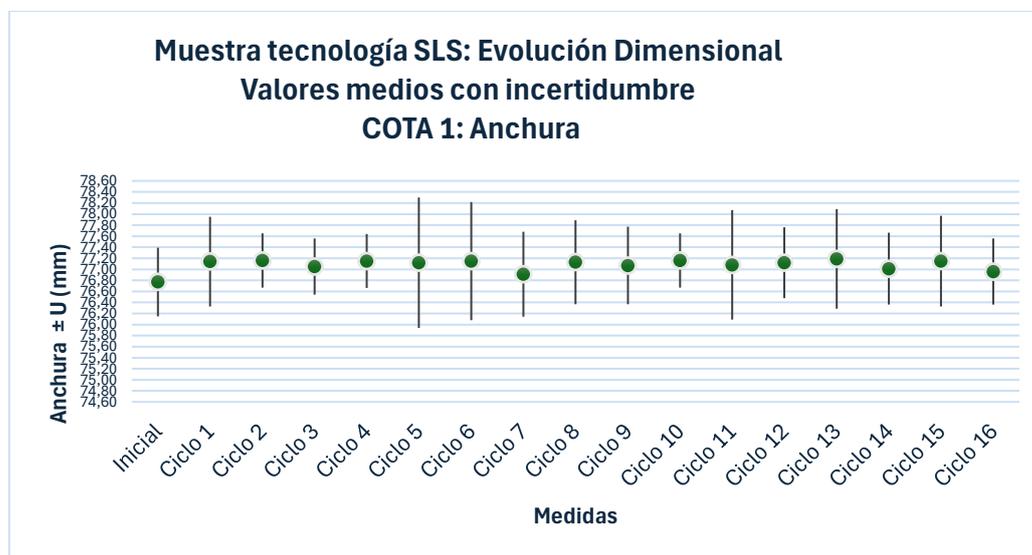


Ilustración 35. Evolución de anchura de la muestra en tecnología SLS.

Variación dimensional: Valores medios de COTA 2 Altura

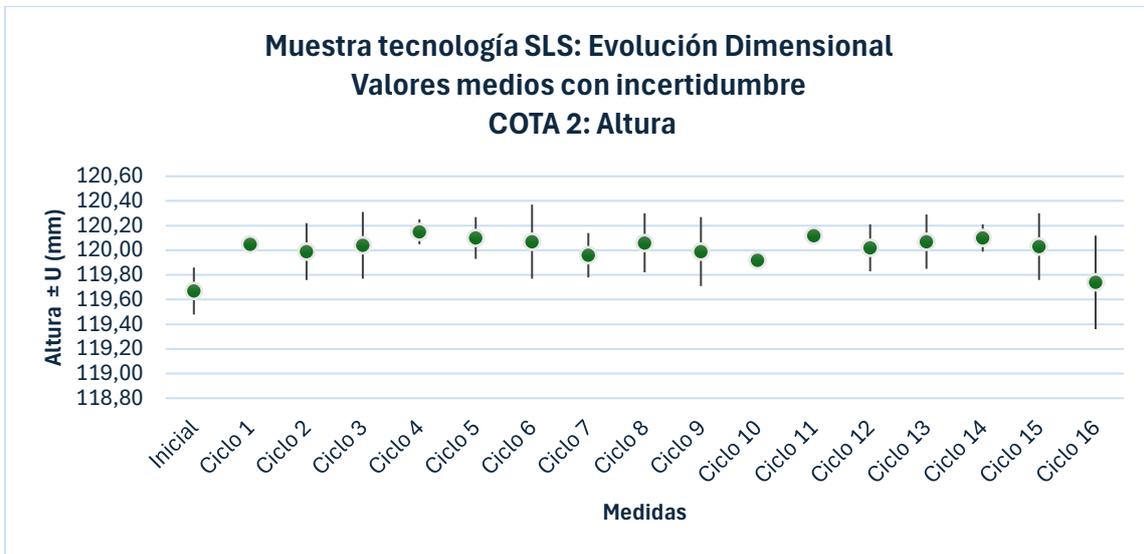


Ilustración 36. Evolución de altura de la muestra en tecnología SLS.

Variación dimensional: Valores medios de COTA 3 Espesor

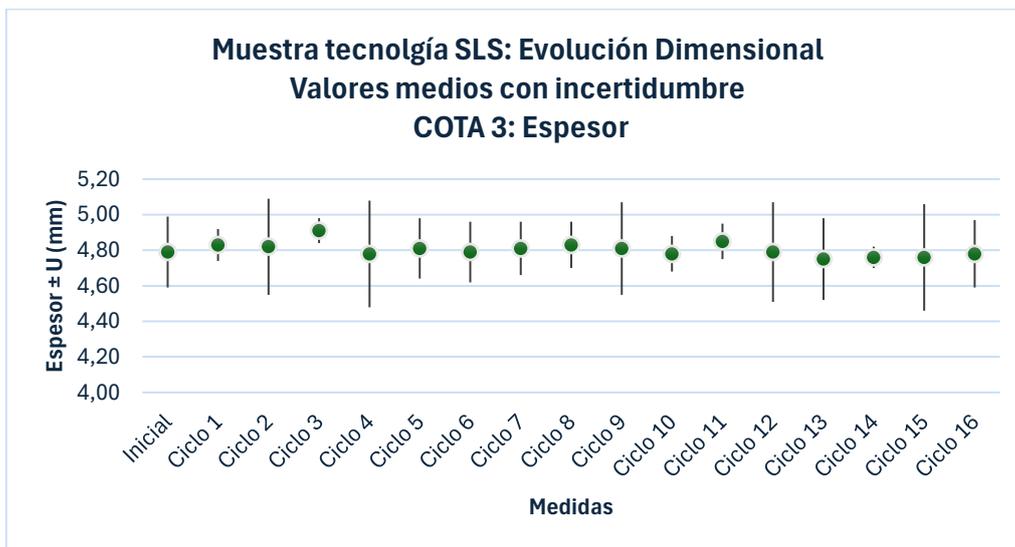


Ilustración 37. Evolución del espesor de la muestra en tecnología SLS.

Muestra tecnología LCD: a continuación, se muestran los resultados obtenidos en las cotas 1, 2 y 3 correspondientes a la anchura, altura y espesor en las siguientes figuras.

Variación dimensional: Valores medios de COTA 1 Anchura

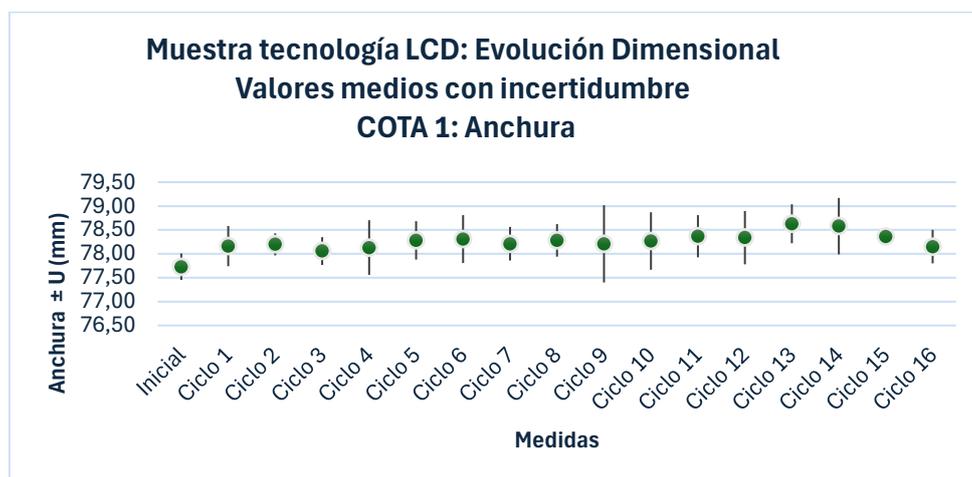


Ilustración 38. Evolución de anchura de la muestra en tecnología LCD

Variación dimensional: Valores medios de COTA 2 Altura

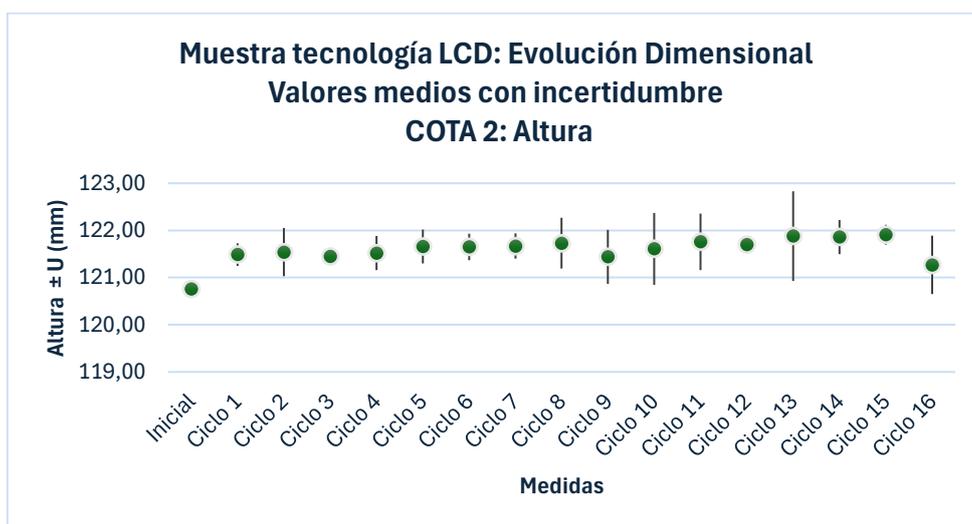


Ilustración 39. Evolución de altura de la muestra en tecnología LCD.

Variación dimensional: Valores medios de COTA 3 Espesor

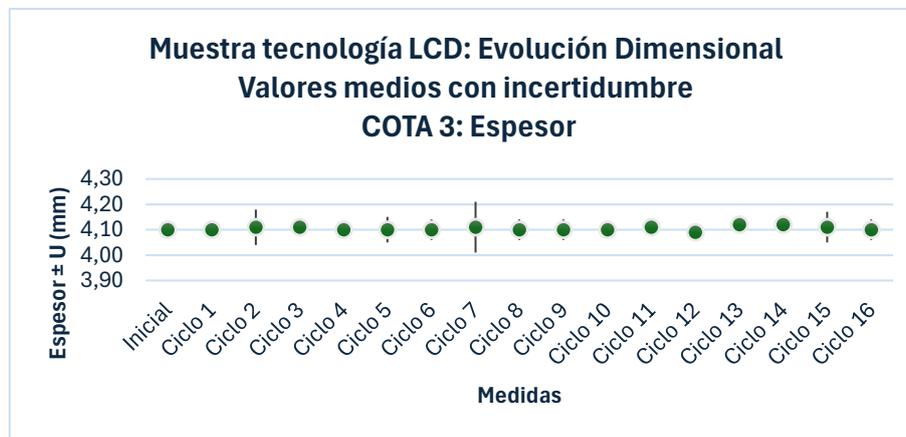


Ilustración 40. Evolución del espesor de la muestra en tecnología LCD.

Determinación de propiedades mecánicas.

Muestras de la tecnología SLS:

Las probetas de tracción se han ensayado según la norma UNE ISO 37¹⁸, norma para elastómeros, caucho, vulcanizados o termoplásticos; los resultados se muestran a continuación:

En cuanto al comportamiento del material, el fabricante del polvo Flexa Performance de la Empresa Sinterit reporta cuando las probetas se fabrican en XY, una resistencia máxima a la tracción de 7,99 N/mm² y una deformación máxima de 182,63 %. El valor inicial obtenido para este proyecto con probetas fabricadas en XZ es de una resistencia máxima a la tracción de 6,27 N/mm² y una deformación máxima de 70,10 %, lo cual consideramos correcto por ser en XZ, el cual es un plano menos favorable.

En las figuras siguientes se presentan los resultados de resistencia máxima (N/mm²) y de la máxima deformación (%) obtenidos con su respectiva desviación estándar. Con respecto a la resistencia máxima se observa una disminución inicial de un 12.20% desde 6,27 N/mm² hasta 5,50 N/mm² en el ciclo 1, luego se mantiene más o menos constante durante 4 ciclos (hasta el ciclo 5), baja los siguientes 2 ciclos hasta un valor de 4.17 N/mm² (lo que representa un 33.50%) se mantiene los siguientes 3 ciclos, baja los siguientes 2 ciclos hasta 3.61 N/mm², lo que representa un 42.42% de disminución de esta propiedad, a partir de ese momento la tendencia cambia y comienza a aumentar la resistencia los siguientes 4 ciclos, hasta el ciclo 16 donde llega a un valor de 5.07 N/mm². Este último cambio de tendencia podría atribuirse a un endurecimiento que podría estar sufriendo el material polimérico al cristalizarse. Con respecto a la máxima deformación se observa una disminución inicial en el ciclo 1 hasta 45,39 %, luego se mantiene más o menos constante hasta el ciclo 5 a partir de ahí fluctúa entre valores de 25.73 y 44.95%, pero la tendencia no es marcada, por lo que solo podemos decir que hay una tendencia a bajar.

¹⁸ UNE-ISO 37:2013: Elastómeros. Caucho, vulcanizados o termoplásticos. Determinación de las propiedades de esfuerzo-deformación en tracción.

Se puede concluir que, en cuanto al comportamiento mecánico, este material en el ciclo 1 ya pierde un 12.20% de su resistencia máxima, pero teniendo en cuenta que la desviación estándar del material en el primer ensayo (antes del inicio del envejecimiento) es de aproximadamente 11,5 %, esta pérdida de resistencia mecánica no es tan significativa. Por tanto, dependiendo de la aplicación del material podría ser aceptable (uso decorativo, uso que no requiera alta resistencia mecánica, ...).

Si intentamos establecer una relación entre las propiedades mecánicas y las medidas obtenidas de brillo, color y estabilidad dimensional vemos que para esta muestra no existen cambios significativos tanto para el brillo como para las dimensiones, por lo que es la variación de color la que se puede relacionar, en este caso con la resistencia máxima.

En la Figura siguiente, se observa claramente que existe una relación entre el cambio de color que va sufriendo la muestra con las sucesivas exposiciones a los ciclos de envejecimiento y la variación de su resistencia mecánica. Hasta el ciclo 11 se tiene un aumento progresivo de la variación de color y una disminución de la resistencia máxima, a partir del ciclo 12 se tiene una menor variación del color y un aumento de la resistencia máxima del material.

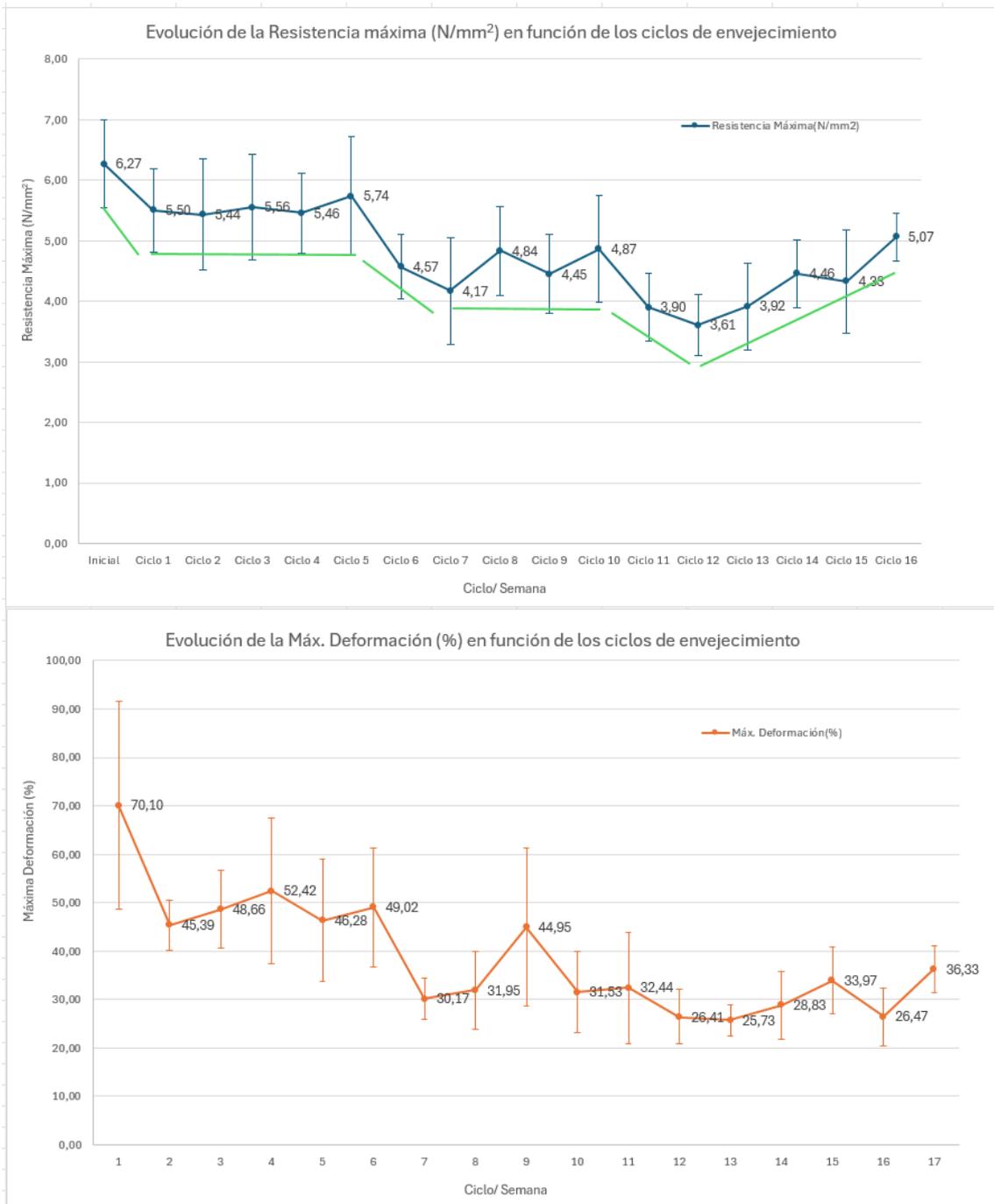


Ilustración 41. Propiedades mecánicas del material Flexa Performance tecnología SLS tras ciclos de envejecimiento

En el ciclo 5 se observa el valor de resistencia más bajo que podría ser asumible dentro de la propia desviación del material. A partir del ciclo 12, cuando su resistencia es de 3.61 N/mm², hay una disminución del 42.42%, lo cual es un valor muy bajo y tendría que verificarse si con esta resistencia máxima la pieza podría estar todavía en uso a la intemperie para otros usos que no sean simplemente decorativos. Luego se observa un aumento, pero podría atribuirse a un endurecimiento / fragilización del material, como se ha mencionado antes.

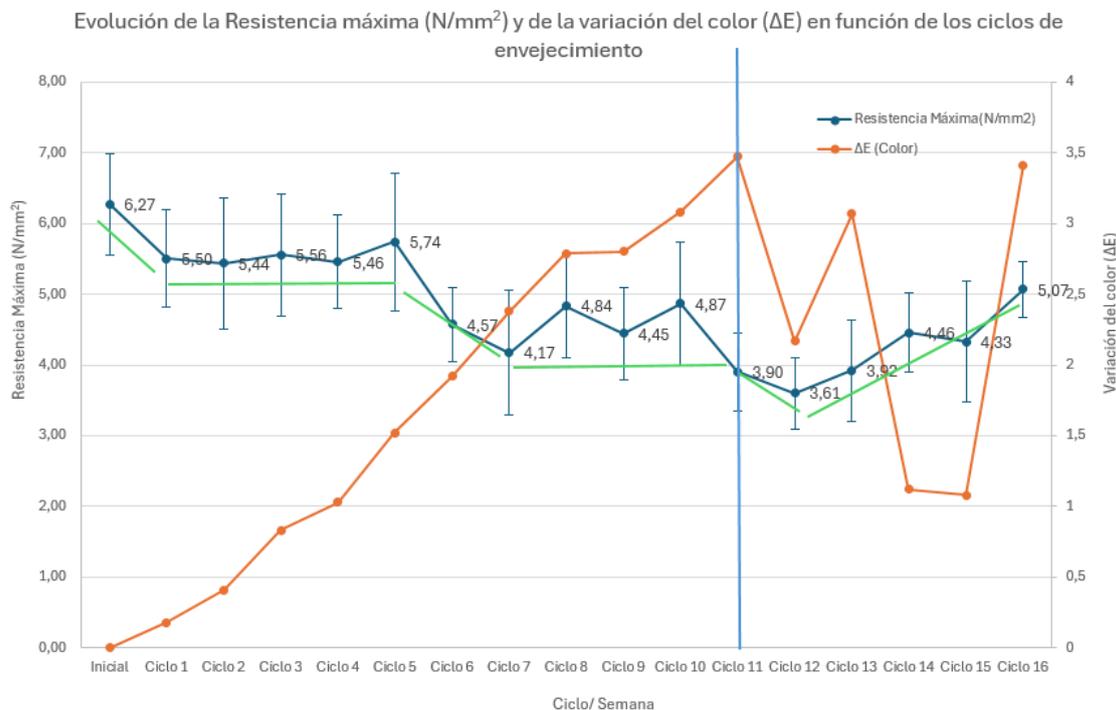


Ilustración 42. Relación entre la variación del color ΔE y la resistencia máxima

El aumento de la variación de color está directamente relacionado con la exposición de las probetas a los rayos UV (primeros tres días de cada ciclo). Viendo el comportamiento de este parámetro, parece que el material de la probeta sufre una mayor degradación del color durante los primeros ciclos (hasta el ciclo 11) y a partir de ahí su variación es más errática. Este comportamiento junto con la variación de resistencia mecánica que hemos evaluado anteriormente, pensamos está relacionado con la capacidad del polímero de absorción de agua y de los cambios que sufre en el ciclo de envejecido (UV/Corrosión/Criogénico) al cual está sometido.

Muestras de la tecnología LCD:

Las probetas de tracción se han ensayado según la norma UNE ISO 527-2¹⁹, norma para determinar propiedades mecánicas en polímeros rígidos y semirrígidos; los resultados se muestran en la figura.

En cuanto al comportamiento del material cuando las probetas se fabrican en XZ, el fabricante del material Photocentric reporta una resistencia máxima a la tracción de 60 N/mm² y una deformación máxima de 14 %. El valor inicial obtenido en XZ en nuestro equipo LC Magna, es de una resistencia máxima a la tracción de 44,30 N/mm² y una deformación máxima de 5,69 %, valores iniciales que están por debajo de lo esperado pero que nos sirven de referencia para este estudio.

¹⁹ UNE-ISO 527-2:2012: Plásticos. Determinación de las propiedades en tracción. Parte 2: Condiciones de ensayo de plásticos para moldeo y extrusión

Con respecto a la resistencia mecánica se observa que se mantiene constante en los primeros tres ciclos y luego baja un 21.48% hasta los 34.78 N/mm², se mantiene aproximadamente constante dos ciclos hasta 33.86 N/mm² en el ciclo 6, para luego fluctuar con el valor más bajo de 29.48 N/mm² en el ciclo 8 que indica una disminución de un 33.43% de esta propiedad, pero también se alcanza un valor máximo en el ciclo 15 donde sube hasta 48.50 N/mm² lo que se considera un aumento de un 9.48% de esta propiedad.

Con respecto a la máxima deformación, en el primer ciclo baja hasta un valor de 5.21%, lo que representa una disminución de un 8,43% de esta propiedad, luego sube hasta 8.71% en el ciclo 8, se observa una tendencia a aumentar hasta el ciclo 8 y luego fluctúa con tendencia a bajar hasta que llega a un valor de 6.33% en el ciclo 16, lo que representa un 11% más que la deformación máxima inicial, véase en la figura.

Se puede concluir que este material a partir del 4to ciclo pierde un 21.43% de su resistencia máxima. Teniendo en cuenta que la desviación estándar del ensayo antes de inicial el envejecimiento es de aproximadamente el 1%, el valor obtenido a partir del 4to ciclo supone una pérdida importante de las propiedad de resistencia máxima. Por tanto, a partir de este ciclo, es probable que quedara restringido su uso a fines meramente decorativos o de baja resistencia.

En la búsqueda de obtener una relación entre las propiedades mecánicas y las medidas obtenidas de brillo, color y estabilidad dimensional vemos que para esta muestra no existen cambios significativos tanto para el color ni para las dimensiones, por lo que es la variación de brillo lo que se puede relacionar, en este caso con la deformación máxima.

En la siguiente figura se observa la relación encontrada entre la máxima deformación y el brillo medio medido. Se tiene que hasta el ciclo 8 aumenta la máxima deformación y aumenta el brillo, luego ambos valores fluctúan de manera similar entre ellos y a partir del ciclo 14 el brillo de la muestra aumenta y la deformación máxima disminuye, lo cual puede deberse a un abrillantamiento producido por una fragilización del material.

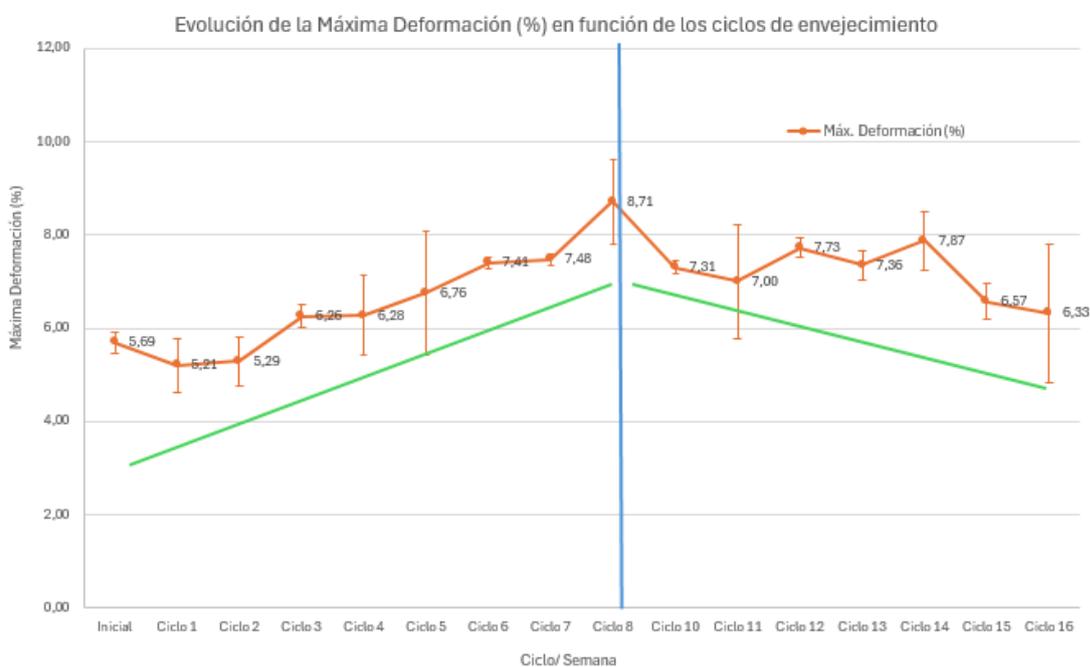
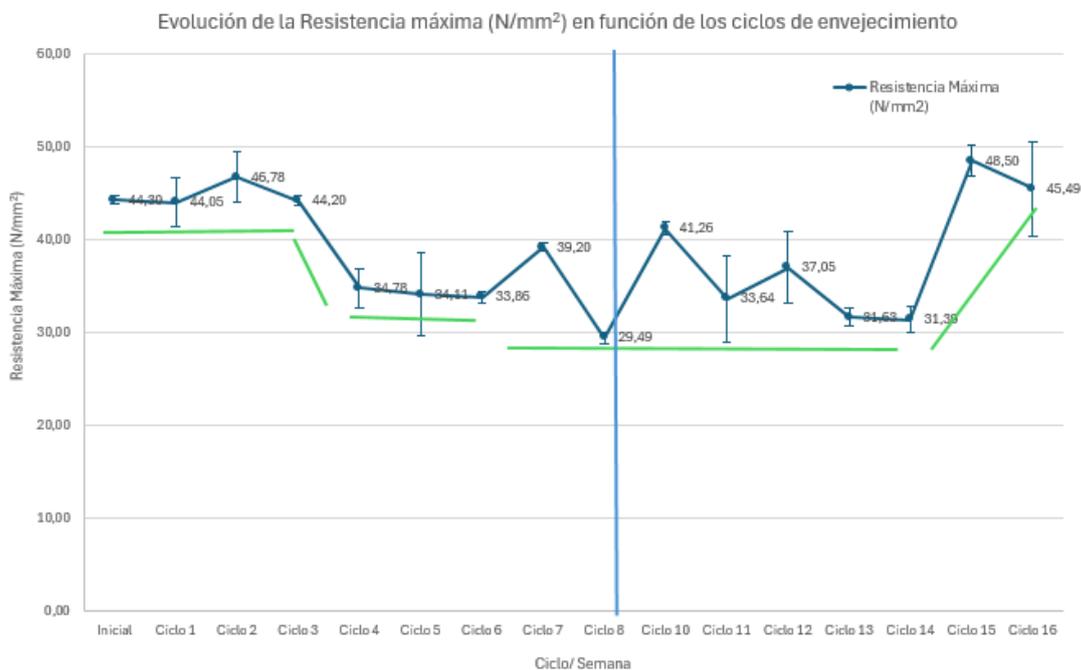


Ilustración 43. Propiedades mecánicas del material DL110HB tecnología LCD tras ciclos de envejecimiento

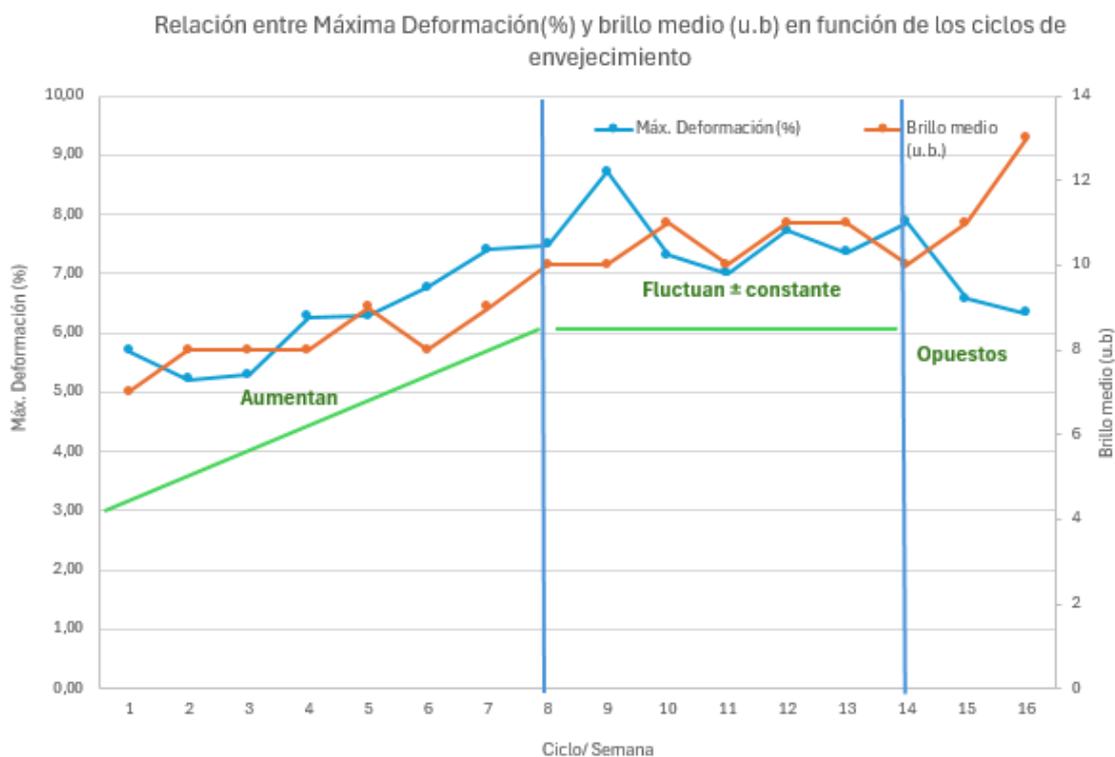


Ilustración 44. Relación entre propiedades mecánicas y el brillo especular, muestras obtenidas por LCD.

2.2.3 Tarea 5.3. Evaluación de los resultados obtenidos para su aplicación en casos industriales.

El objetivo de este estudio ha sido relacionar el uso industrial de los materiales ensayados para exteriores, en función de los diferentes ambientes en los que pudieran exponerse, así como evaluar un rango de durabilidad en años de uso. Para ello y puesto que no encontramos normativa que relacionara ensayos de laboratorio con la información a estudiar, nos basamos en normas que aplican a materiales metálicos.

En la norma UNE-EN ISO 12944-6:2018²⁰, para estructuras de acero con recubrimiento orgánico, se requieren 10 ciclos de envejecimiento para asegurar el uso del material en un ambiente con Categoría de Corrosividad C4 y una durabilidad Muy Alta y/o C5 durabilidad Alta, lo cual se traduce en:

- C4 Muy alto (C4 VH): Áreas industriales y áreas costeras con salinidad moderada, con una durabilidad de más de 25 años.
- C5 Alto (C5 H): Áreas industriales con elevada humedad y atmósfera agresiva y áreas costeras con elevada salinidad, con una durabilidad de 15 años hasta 25 años.

Para el ambiente con Categoría de Corrosividad más agresiva y la durabilidad más alta, esta norma requiere 16 ciclos de envejecimiento:

²⁰ Norma UNE-EN ISO 12944-6:2018: Pinturas y barnices. Protección de estructuras de acero frente a la corrosión mediante sistemas de pintura protectores.

- C5 Muy alto (C5 VH): Áreas industriales con elevada humedad y atmósfera agresiva y áreas costeras con elevada salinidad, con una durabilidad de más de 25 años.

Evidentemente, no podemos realizar la evaluación que requiere esta normativa para los materiales estudiados, puesto que ésta va en base a la aparición de signos de corrosión, que en nuestro caso no van a aparecer. No obstante, estos valores nos sirven como referencia para ver en qué tipos de ambiente podrían ser utilizados.

Primer material estudiado, material Flexa Performance Tecnología SLS:

La resistencia máxima obtenida se considera aceptable hasta el Ciclo 5, por tanto, su uso en ambientes exteriores agresivos estaría restringido por las necesidades de resistencia mecánica de su aplicación.

No se produce desintegración del material tras 16 ciclos de envejecimiento, la variación de brillo no es significativa y la de color es muy ligeramente apreciable a la vista, por lo que podría tener un buena respuesta en ambientes exteriores muy agresivos (C5) a largo plazo, para usos decorativos.

Segundo material estudiado, material DL110HB tecnología LCD:

La resistencia máxima obtenida se considera aceptable hasta el Ciclo 4, por tanto, su uso en ambientes exteriores agresivos estaría restringido por las necesidades de resistencia mecánica de su aplicación.

No se produce desintegración del material tras 16 ciclos de envejecimiento y la variación de color no es significativa y la de brillo es progresivamente ascendente, lo que podría afectar a la apariencia, por lo que su respuesta en ambientes exteriores muy agresivos (C5) a largo plazo para uso decorativo, podría verse afectada por este hecho. Si bien es cierto que tras 10 ciclos el aumento de brillo observado es menor, con lo que en ambientes exteriores menos agresivos (C4) podría tener una mejor respuesta para usos decorativos.

2.3 Paquete de trabajo 6: Desarrollo de demostradores industriales.

Los objetivos para este paquete de trabajo se dividen en dos tareas, una primera donde se estudió la metodología para texturizar superficies en piezas obtenidas por las tecnologías del estudio y una segunda parte donde se establecieron y realizaron demostradores acordados con las empresas colaboradoras del proyecto.

2.3.1 Tarea 6.1. Estudio de la metodología para la aplicación de texturas 3D sobre superficies complejas.

En esta tarea se realizó el estudio de diferentes softwares para generar texturas tridimensionales, el diseño de estructuras a medida (gradadas) y la metodología para texturizar piezas con geometrías complejas.

La pieza con geometría compleja seleccionada para esta tarea es una pieza con forma esférica, acompañada de una base y una marca de referencia. Esta pieza ha sido diseñada hueca en su interior para optimizar el uso de material, siguiente figura.

Se ha realizado un diseño paramétrico y se han empleado dos softwares diferentes para la creación de texturas: **SolidWorks** y **4D Additive**.



Ilustración 45.. Pieza seleccionada para realizar el estudio de texturas 3D.

Generación de texturas con el software SolidWorks

Para SolidWorks, se ha decidido realizar un patrón de textura estriada, para conocer cómo se comporta creando texturas de repetición, como puede verse en la figura se han generado tres tipos de texturas S1, S2 y S3, siendo esta la metodología recomendada en esta tarea para producir piezas texturizadas.

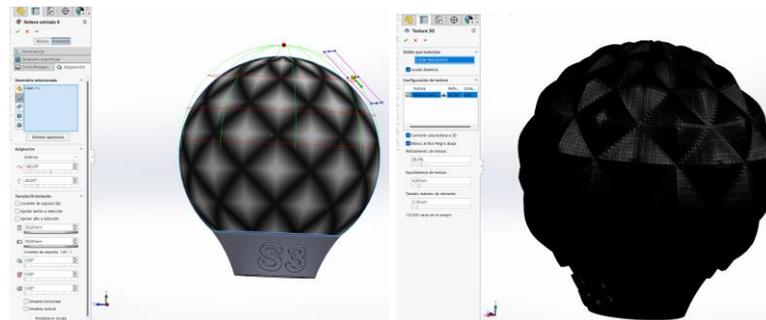


Ilustración 46. Personalización y generación de la textura S3.

Generación de texturas con el software 4D Additive

El software 4D Additive se especializa en la creación de texturas para archivos importados; no permitiendo el diseño de piezas, es decir, que se deben importar archivos STEP y aplicarles la textura deseada, Para 4D Additive se ha decidido generar una textura con patrón aleatorio de círculos, para ver cómo se comporta generando mallas con aleatoriedad. Para ello, se han generado tres tipos de texturas A1, A2 y A3 siendo esta la metodología recomendada en esta tarea para producir piezas texturizadas.

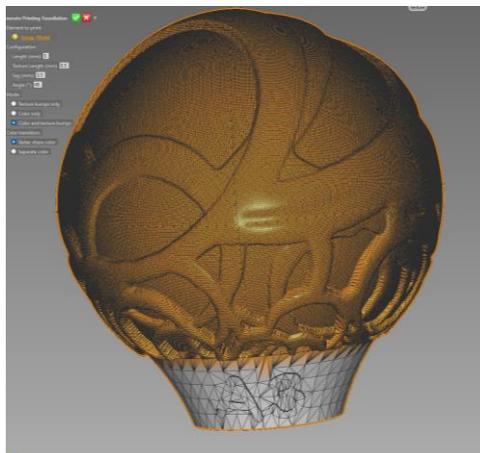


Ilustración 47..Personalización y generación de la textura A3.

2.3.2 Tarea 6.2: Desarrollo de demostradores industriales

Con el objetivo de valorar los resultados obtenidos en el proyecto, se realizó el desarrollo de demostradores de carácter industrial. Para ello se estuvo en contacto directo con las 4 empresas colaboradoras que trabajan en diferentes aplicaciones finales, y que pensamos, podrían ser potenciales usuarias de estas tecnologías SLS y LCD.

Empresa colaboradora 1 GH ELECTROTERMIA S.A

En la memoria de solicitud se había especificado que los demostradores a fabricar serian duchas industriales para enfriado de piezas metálicas en tratamientos térmicos. Este demostrador se cambió por un grupo de demostradores que han atendido a las necesidades de la empresa durante el proyecto, estos demostradores presentados en la siguiente tabla se describen a continuación:

Tabla 11. Listado de demostradores fabricados para la empresa Gh Electrotermia S.A.

Empresa: GH ELECTROTERMIA		
Demostrador	Nombre del demostrador	Tecnología/ Material
1	Ventosa	SLS / TPU (Flexa Performance)
2	Soporte de pantalla	LCD / Resina DL110 HB y Resina HARD
3	Carcasa grande	LCD / Resina HARD
4	Brida mordaza inductor	LCD / Resina High Temp DL401
5	Brida mordaza inductor resistente al fuego	LCD / Resina Rigid DLFR

Demostrador 1 Ventosa: puede verse la pieza demostrador en uso en la siguiente figura.



Ilustración 48. Ventosa fabricada en Flexa Performance, tecnología SLS

Demostrador 2 Soporte de pantalla: está pieza solicitada es un soporte de pantalla que requería GH Electrotermia en un material polimérico rígido, por lo que se decide fabricar en la tecnología LCD, puede verse la pieza en la bandeja de fabricación, se ha fabricado en las resinas DL110HB y HARD. Está pieza ha funcionado correctamente.

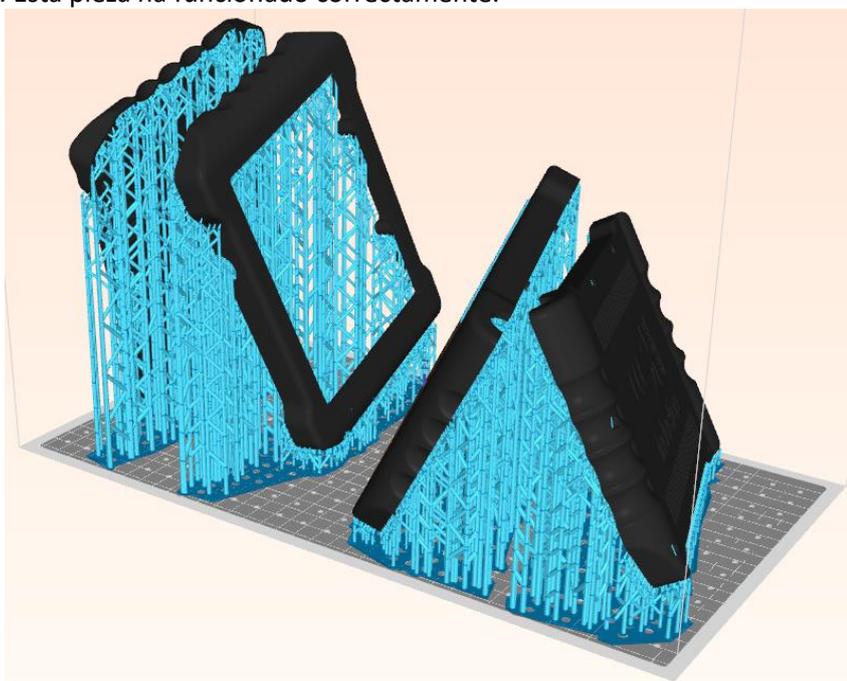


Ilustración 49. Pieza demostrador soporte de pantalla, material rígido

Demostrador 3 Carcasa grande: siguiendo con la exploración de lo que es capaz de fabricar esta tecnología LCD con la resina HARD, la empresa nos ha pedido hacer una pieza de gran tamaño,

observada en la siguiente figura. Esta pieza no se ha fabricado correctamente debido a su gran tamaño.

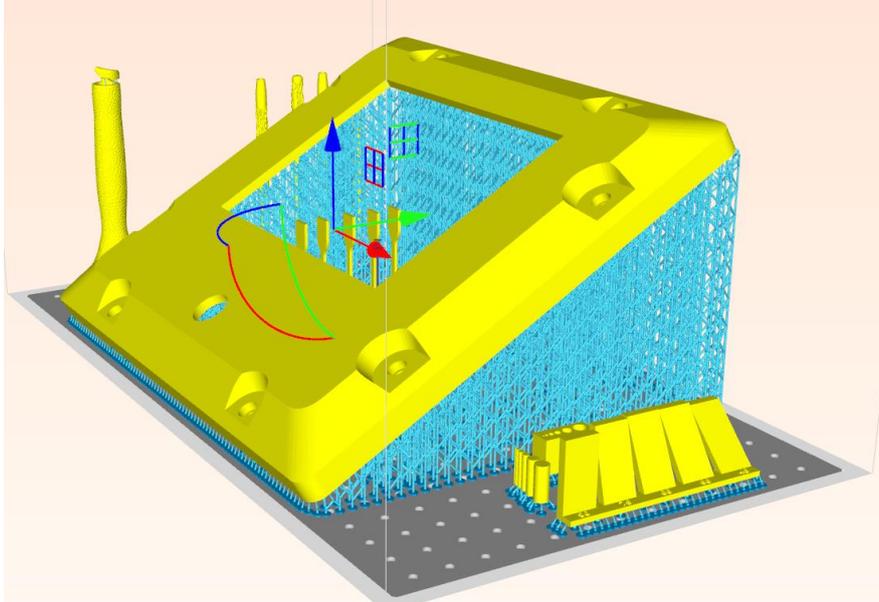


Ilustración 50. Bandeja de fabricación de carcasa grande para maquinaria de GH Electrotermia.

Demostrador 4 Brida mordaza inductor: nos han solicitado una pieza a fabricar con una resina resistente a elevada temperatura y en una resina resistente al fuego, se señala en la bandeja de fabricación. Se han puesto en uso correctamente.

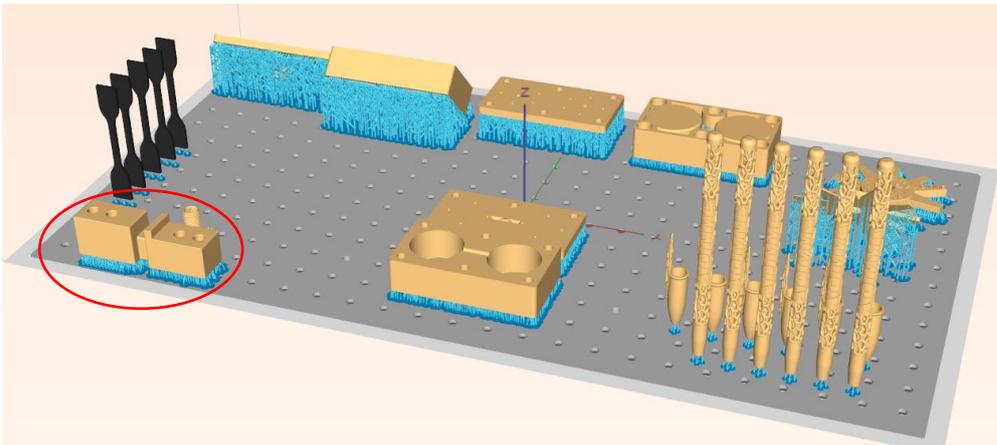


Ilustración 51. Bandeja de fabricación en resina High Temp DL401.

Empresa colaboradora 2 VALVER SPEED AIR S.L

En la memoria de solicitud se especificó que los demostradores a fabricar requeridos eran Sistemas de pulverización para aplicación de pinturas: boquillas o dispositivos similares, en la siguiente tabla se ven los demostradores fabricados según las necesidades de la empresa durante el proyecto.

Tabla 12. Listado de demostradores fabricados para la empresa Valver Speed Air S.L.

Empresa: VALVER AIR SPEED		
Demostrador	Nombre del demostrador	Tecnología/ Material
1	Pincel pequeño	SLS / TPU (Flexa Performance)
2	Pincel grande	SLS / TPU (Flexa Performance)
3	Mango pistola	LCD / Resina HARD
4	Jaula muelle válvula antirretorno	LCD / Resina High Temp DL401

Demostrador 1 Pincel pequeño y grande: esta pieza se ha fabricado en la tecnología SLS, según el archivo STL suministrado por la empresa VALVER SPEED AIR SL, se ve en uso en la figura.



Ilustración 52. Pincel pequeño puesto en uso en la empresa VALVER AIR SPEED SL.

Demostrador 3 Mango de pistola: la empresa suministra a AIDIMME el archivo STL para fabricar y nos pide que se haga en un material polimérico rígido, por lo que se selecciona la tecnología LCD con la resina HARD. Se ve la pieza antes de quitarle los soportes en la figura, esta puesta a sido puesta en uso satisfactoriamente, tiene superficie texturizada.



Ilustración 53. Mango de pistola con soportes mejorados y después de quitar los soportes, tecnología LCD, resina HARD.

Demostrador 4 Jaula muelle válvula antirretorno: la empresa ha mostrado su interés por obtener esta pieza con resistencia a elevada temperatura, por lo que nos suministran el archivo STL para fabricarla. Se ha seleccionado la resina High Temp DL401 y se ha fabricado con los parámetros estándar recomendados por el fabricante, esta pieza es confidencial.

Empresa colaboradora 3 CLINICA GIRONÉS

En la memoria de solicitud se había especificado que los demostradores a fabricar para esta empresa eran plantillas ortopédicas, generalmente estas plantillas son geometrías adaptadas al usuario por lo que se diseñan a medida, por lo que las tecnologías de fabricación aditiva propuestas pueden ser una vía de producción interesante debido a la ausencia de moldes y a la flexibilidad que éstas otorgan. En la siguiente tabla se ven los demostradores fabricados según las necesidades de la empresa durante el proyecto y en la siguiente figura algunas de las fabricadas durante el proyecto.

Tabla 13. Listado de demostradores fabricados para la Clínica Gironés durante el Proyecto.

Empresa: CLINICA GIRONÉS			
Demostrador	Nombre del demostrador		Tecnología/ Material
1	Plantilla tamaño real		SLS / TPU (Flexa Performance)
2	Plantilla pequeña		SLS / TPU (Flexa Performance)
3	Plantilla personalizada	tamaño real	SLS / TPU (PA11 ONYX y en PP)



Ilustración 54. Plantilla obtenidas en una bandeja de fabricación (6 pares), donde se ven algunas con defectos.

Empresa colaboradora 4 CLADES COMPOSITES S.L

En la memoria de solicitud se había especificado que los demostradores se enfocaran en la evaluación de estas tecnologías para su uso en piezas de entornos exteriores y del hábitat con aplicación de texturas avanzadas, en la siguiente tabla se ven los demostradores fabricados según las necesidades de la empresa durante el proyecto.

Tabla 14. Estado de demostradores fabricados para CLADES COMPOSITES SL durante el Proyecto.

Empresa: CLADES COMPOSITES S. L		
Demostrador	Nombre del demostrador	Tecnología/ Material
1	Pieza para fachada (conchas)	LCD / Resina HARD
2	Piezas con texturas	LCD / Resina HARD

Demostrador 1 Pieza para fachada exterior (conchas): la empresa nos ha solicitado diseñar una pieza para colocar en una pared exterior, específicamente con formas de conchas de mar, esta pieza debía ser rígida, por lo que se ha fabricado en la tecnología LCD con la resina HARD, con los parámetros estándar recomendados por el fabricante. Como se ha comentado en el paquete de trabajo 4, esta pieza se ha utilizado para un estudio de soportes, los cuales se muestran en la siguiente figura, se utilizó un soporte tipo árbol en el centro en la parte de abajo y en los laterales. Las piezas se fabricaron verticales e inclinadas a 45°. Fueron entregadas a CLADES COMPOSITES SL para su

verificación como posible uso en exteriores.



Ilustración 55. Pieza demostrador para fachada conchas, tecnología LCD, resina HARD, donde pueden verse los soportes tipo árbol en las piezas fabricadas inclinadas.



Ilustración 56. Pieza demostrador de empresa CLADES COMPOSITES en bandeja de fabricación fabricadas verticales.

Demostrador 2 Pieza con texturas: como parte de la tarea 6.1, se han diseñado y fabricado piezas con texturas, en este caso para la empresa CLADES COMPOSITES SL, ha sido de interés las obtenidas en el material rígido resina HARD con la tecnología LCD, se ha comentado con la empresa las distintas capacidades de fabricación de textura con dos (02) softwares y se ha mostrado específicamente las siguientes piezas. La empresa se ha visto muy interesada en los diseños y los potenciales usos de texturas para piezas

que serán utilizadas en condiciones exteriores para fachadas.

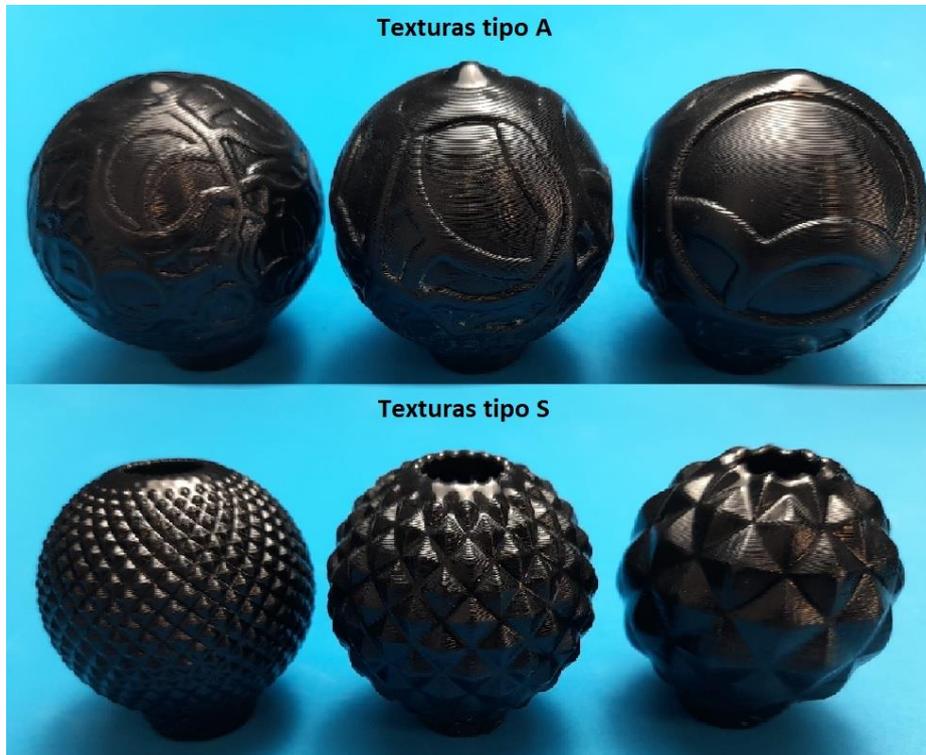


Ilustración 57. Piezas con texturas fabricadas con la tecnología LCD.

3 Resumen de resultados obtenidos

- 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. En el estudio del aumento de la productividad, incluyendo todos los tiempos involucrados en el proceso, se obtuvo para la tecnología SLS un aumento de un 26% y para la tecnología LCD un aumento de entre 76 y 110% en la productividad al aumentar el espesor de capa.
- Se realizaron 16 ciclos de envejecimiento acelerado (7 días por ciclo), con ensayo de envejecimiento con luz UV, ensayo de resistencia a la corrosión y exposición a condiciones extremas de -20 °C. Después de esto se determinó la variación del color, la variación del brillo especular y la variación dimensional, obteniéndose que:
 - Para la tecnología SLS en muestras fabricadas en el material Flexa performance, no se observa variación del brillo, hay variación del color la cual se ha podido asociar con su resistencia máxima, las dimensiones se mantienen y se conserva la integridad tras los 16 ciclos, aunque pierde sus propiedades mecánicas consideradas aceptables al 5to ciclo, por lo que a partir de allí su uso podría ser solo decorativo.
 - Para el caso de la tecnología LCD, con el material DL110HB, se determina que las muestras tienen brillo diferente dependiendo de la dirección en la que se mida debido al proceso de fabricación, aumentando ligeramente tras los ciclos, la variación en su color es muy poca y se consigue establecer una relación entre la máxima deformación y el brillo medio. A partir del 4to ciclo pierde sus propiedades mecánicas iniciales un 21.48%. Las muestras conservan su estabilidad dimensional e integridad después de los 16 ciclos.
 - Se ha estudiado la factibilidad y/o adecuación de diferentes texturizados sobre piezas finales, con los softwares SolidWorks y 4D Additive, determinándose que son adecuados para generar texturas en ambas tecnologías.
- Las cuatro empresas colaboradoras; GH Electrotermia S.A, Clades composites S.L, Clínica Girones y Valver Air Speed S.L, han realizado reuniones periódicas con AIDIMME para solicitar demostradores, los cuales hemos fabricado en ambas tecnologías y hemos recibido por su parte comentarios y/o retroalimentación satisfactoria.

4 Conclusiones

- Para aumentar la productividad nos hemos enfocado en disminuir los costes asociados al proceso de fabricación; después de una exhaustiva búsqueda bibliográfica presentada previamente, se ha decidido que la modificación en el espesor de capa en ambos procesos será la estrategia principal para utilizar. Para la tecnología SLS, se puede aumentar el espesor de capa desde 125 μm (valor estándar recomendado) hasta 175 μm y conseguir tener un aumento de un 26% en la productividad. Para el caso de piezas fabricadas con la tecnología LCD, se ha encontrado que aumentando el espesor de capa desde 100 μm hasta 175 μm 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 muestra obtenida con la tecnología SLS, después de ser sometidas a envejecimiento acelerado; no se produce desintegración del material tras 16 ciclos de envejecimiento, la variación de brillo no es significativa y la de color es muy ligeramente apreciable a la vista, por lo que podría tener un buena respuesta en ambientes exteriores muy agresivos (C5) a largo plazo, solo para usos decorativos. Se pudo obtener una relación entre la variación de color y la resistencia máxima; hasta el ciclo 11.
- Con respecto a las muestra obtenida con la tecnología LCD, después de ser sometidas a envejecimiento acelerado; no se produce desintegración del material tras 16 ciclos de envejecimiento y la variación de color no es significativa y la de brillo es progresivamente ascendente, lo que podría afectar a la apariencia, por lo que su respuesta en ambientes exteriores muy agresivos (C5) a largo plazo para uso decorativo, podría verse afectada por este hecho. Se observa una relación entre la máxima deformación y el brillo medio medido, teniendo comportamiento opuesto a partir del ciclo 14
- Se he determinado que ambos softwares Solidworks y 4D Additive, son completamente válidos para la generación de texturas en piezas fabricadas en las tecnología SLS y LCD.

5 Bibliografía

1. 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>
2. 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.
3. 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>
4. 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>
5. Pilipović, A.; Brajljić, T.; Drstvenšek, I. Influence of Processing Parameters on Tensile Properties of SLS Polymer Product. *Polymers* 2018, 10, 1208. <https://doi.org/10.3390/polym10111208>
6. 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>.
7. <https://sinterit.com/materials/>
8. UNE-ISO 37:2013: Elastómeros. Caucho, vulcanizados o termoplásticos. Determinación de las propiedades de esfuerzo-deformación en tracción.
9. UNE-ISO 527-2:2012: Plásticos. Determinación de las propiedades en tracción. Parte 2: Condiciones de ensayo de plásticos para moldeo y extrusión.
10. <https://photocentricgroup.com/wp-content/uploads/2024/09/TDS-Magna-Hard-Black.pdf>
11. <https://sinterit.com/materials/flexa-performance/>
12. Norma UNE-EN ISO 527-1:2020. Plásticos. Determinación de las propiedades en tracción. Parte 1: Principios generales.
13. Norma UNE-EN ISO 16474-3. Pinturas y barnices. Métodos de exposición a fuentes luminosas de laboratorio. Parte 3: Lámparas fluorescentes UV. (ISO 16474-3:2021).
14. Norma UNE-EN ISO 9227. Ensayos de corrosión en atmósferas artificiales. Ensayos de niebla salina. (ISO 9227:2017).
15. Norma UNE-EN ISO 2813_2015. Pinturas y barnices. Determinación del índice de brillo especular a 20°, 60° y 85°. (ISO 2813:2014).
16. Norma UNE-EN ISO 7724_1984: Pinturas y barnices. Colorimetría. Parte 2: Medición del color.
17. Norma UNE-EN ISO 12944-6:2018: Pinturas y barnices. Protección de estructuras de acero frente a la corrosión mediante sistemas de pintura protectores.

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