

ENTREGABLE E5

PROYECTOS—

2023-2024

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

Entregable: Estudio de caracterización de muestras sometidas a ensayos
cíclicos de envejecimiento, caracterización mecánica, inspección visual y de
deformación dimensional.

Programa: Proyectos de I+D en colaboración con empresas

Número de proyecto: 22300043

Expediente: IMDEEA/2023/15

Duración: 01/07/2023- 31/10/2024



AIDIMME
INSTITUTO TECNOLÓGICO

INDICE

1	Introducción y objetivos del entregable	1
1.1	Resumen del trabajo realizado:	2
2	Actividades realizadas.....	3
2.1	Estudio de las propiedades de los materiales procesados con condiciones estándar (Tarea 5.1)	3
2.1.1	Tecnología de fabricación aditiva de fusión de lecho de polvo en polímeros (PBF-LB/P), conocida como SLS.....	3
2.1.1.1	Caracterización mecánica inicial del material Flexa Performance procesado con la tecnología SLS	3
2.1.1.2	Inspección visual en probetas tecnología SLS:	4
2.1.1.3	Escaneado de probeta fabricada en material Flexa Performance, tecnología SLS:	5
2.1.2	Tecnología de fabricación aditiva de fotopolimerización en tanque o cuba, Vat Photo Polimerization (VPP), conocido como LCD.....	11
2.1.2.1	Caracterización mecánica inicial del material DL110HB procesado con la tecnología LCD	11
2.1.2.2	Escaneado en probetas tecnología LCD	12
2.2	Estudio de la evolución de las propiedades de los materiales sometidos a envejecimiento acelerado (T5.2)	14
2.2.1	Revisión bibliográfica:.....	15
2.2.2	Procedimiento experimental para los ensayos de envejecimiento acelerado:	17
2.2.3	Resultados de caracterización obtenidos tras los ensayos de envejecimiento acelerado ..	18
2.2.3.1	Determinación de brillo especular:.....	19
2.2.3.2	Determinación de las coordenadas de color:	31
2.2.3.3	Determinación de la estabilidad dimensional, dimensiones:	43
2.2.3.4	Determinación de propiedades mecánicas:.....	50
2.3	Evaluación de los resultados obtenidos para su aplicación en casos industriales (T5.3) ..	58
3	Conclusiones	60

1 Introducción y objetivos del entregable

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

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

El presente entregable está relacionado con las actividades desarrolladas en el paquete de trabajo 5, “Estudio de la evolución de las características del material bajo condiciones severas de uso” y tiene como propósito alcanzar lo descrito a continuación:

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, evaluar 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. Para lo cual se realizará lo siguiente:

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

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

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

1.1 Resumen del trabajo realizado:

A continuación, se muestra un resumen de las actividades técnicas del proyecto específicamente del paquete de trabajo 5:

Se ha realizado una revisión bibliográfica exhaustiva acerca de los ensayos de envejecimiento realizables a piezas poliméricas cuyo uso final es en exteriores, para lo cual ha sido difícil encontrar una normativa y se ha optado por utilizar como referencia una norma correspondiente a pinturas colocadas sobre piezas metálicas, de donde se ha obtenido el ciclo de envejecimiento a utilizar y la forma de interpretar los resultados obtenidos en función de grados de durabilidad.

Para ello, se han fabricado probetas de tracción y una placa con un material estándar. Para cada una de las tecnologías estudiadas en este proyecto se ha realizado la caracterización mecánica, así como la determinación de brillo, color y estabilidad dimensional tanto en condiciones estándar como después de haber estado sometidos a diferentes ciclos de envejecimiento acelerado del material Flexa performance en la tecnología SLS y del material DL110HB en la tecnología LCD.

Se ha encontrado relación entre la variación del color y la resistencia máxima en las muestras de la tecnología SLS tras el envejecimiento acelerado y se ha encontrado una relación entre la máxima deformación y la variación del brillo en la muestra obtenida con la tecnología LCD.

Y finalmente se dan recomendaciones generales de uso en cuanto a los materiales estudiados y la modificación de sus propiedades físicas y mecánicas después de someterse al envejecimiento acelerado.

2 Actividades realizadas

2.1 Estudio de las propiedades de los materiales procesados con condiciones estándar (Tarea 5.1)

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

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

La norma UNE ISO 37¹ para elastómeros, caucho, vulcanizados o termoplásticos establece que para determinar propiedades mecánicas mediante ensayo de tracción se requieren por lo menos 5 probetas, por lo que se fabricaron 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, las probetas se fabricaron correctamente al igual que la placa y se observan en la ilustración 1



Ilustración 1. Probetas de tracción y placa para caracterización dimensional, de brillo y color, muestra SLS, Flexa Performance

Se realizaron los ensayos mecánicos de tracción 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 1, como puede verse la resistencia mecánica expresada como la resistencia máxima, tiene un valor cercano y la

¹ Norma UNE-ISO 37:2013: Elastómeros. Caucho, vulcanizados o termoplásticos. Determinación de las propiedades de esfuerzo-deformación en tracción.

deformación máxima que estamos obteniendo es un poco menor a lo esperado, pero lo consideramos aceptable para comenzar con los ensayos de envejecimiento.

Tabla 1. 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)²	7,99	-	182,63	-
Probetas en Z	6,27	0,72	70,10	21,40

2.1.1.2 Inspección visual en probetas tecnología SLS:

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 Creaform con una precisión de hasta 0.035mm.



Ilustración 2. 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. Módulo encargado del escaneado de las piezas, en este módulo se incluyen los parámetros del escaneado como es la resolución de malla, así como el modo de reconstrucción de la malla. Dispone de modos de reconstrucción optimizados para generar mallas más automáticas. En caso de utilizar el escáner para metrología es necesario desactivar todas estas opciones automáticas para disponer de la malla lo

² <https://sinterit.com/materials/flexa-performance/>

más parecida a la realidad. Antes de iniciar cualquier escaneado es necesario calibrar el equipo e incluir la intensidad inicial del láser (esta intensidad depende del color y la textura de la pieza a escanear).



Ilustración 3. Placa de calibración

- Vx Model. Tras el escaneado con este módulo es posible depurar la malla, eliminando ruido del propio escaneo, así como tapando pequeños huecos de esta. En caso necesario es posible reconstruir zonas que no se han escaneado, así como se orienta la malla con respecto a unos planos conocidos para facilitar la inspección posterior.
- Vx Inspect. Este módulo permite la validación y verificación dimensional de los resultados de un escaneado comparado con el fichero original de la pieza. De un modo muy sencillo con un mapa de colores se aprecian las desviaciones, también es posible obtener medidas reales de la pieza e incluso incluir tolerancias geométricas.

Las dos probetas han sido escaneadas en la siguiente posición y utilizando la peana y los elementos que contienen las dianas o referencias.

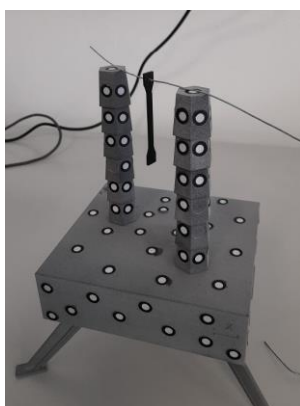


Ilustración 4. Colocación de las probetas y preparación de la zona de escaneado

2.1.1.3 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.

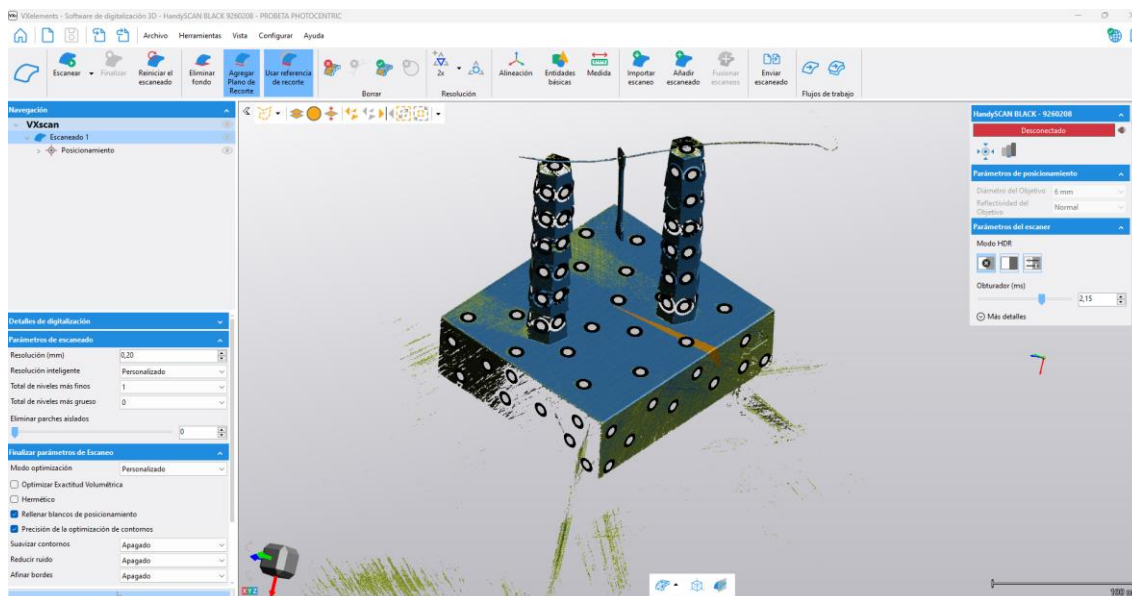


Ilustración 5.Resultado del escaneo (probeta Photocentric y elementos que contiene las dianasy)

Se elimina toda la información que sobra con el fin de dejar solamente la probeta.

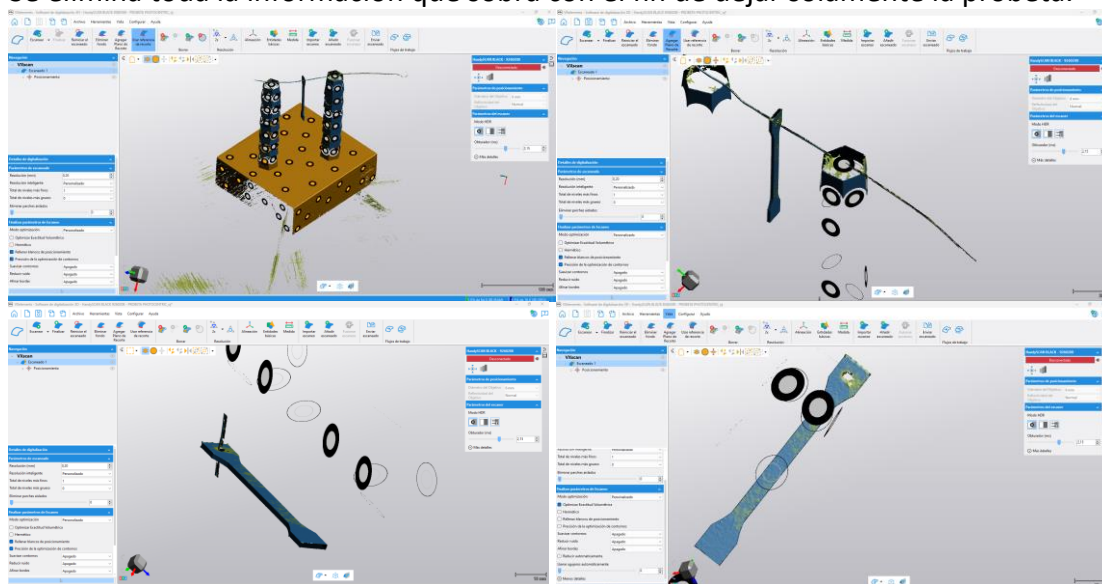


Ilustración 6.Proceso de eliminación de los elementos que no forman parte de la probeta

Una vez eliminada la información sobrante, se seleccionan los parámetros adecuados y se procesa la malla quedando del siguiente modo:

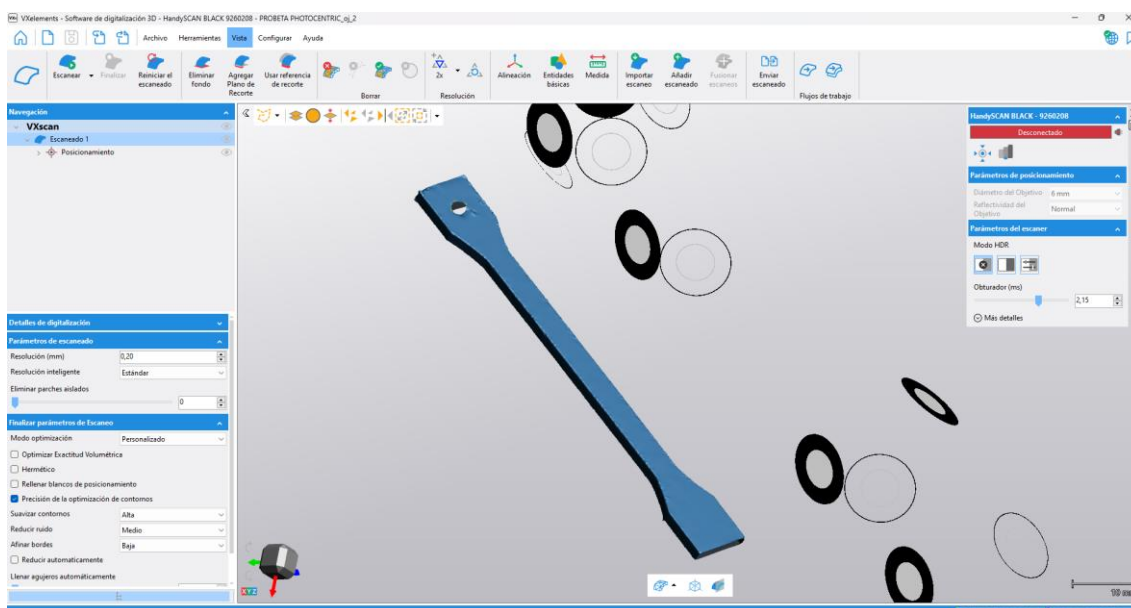


Ilustración 7. Parámetros para finalizar el escaneo y pieza final escaneada

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.

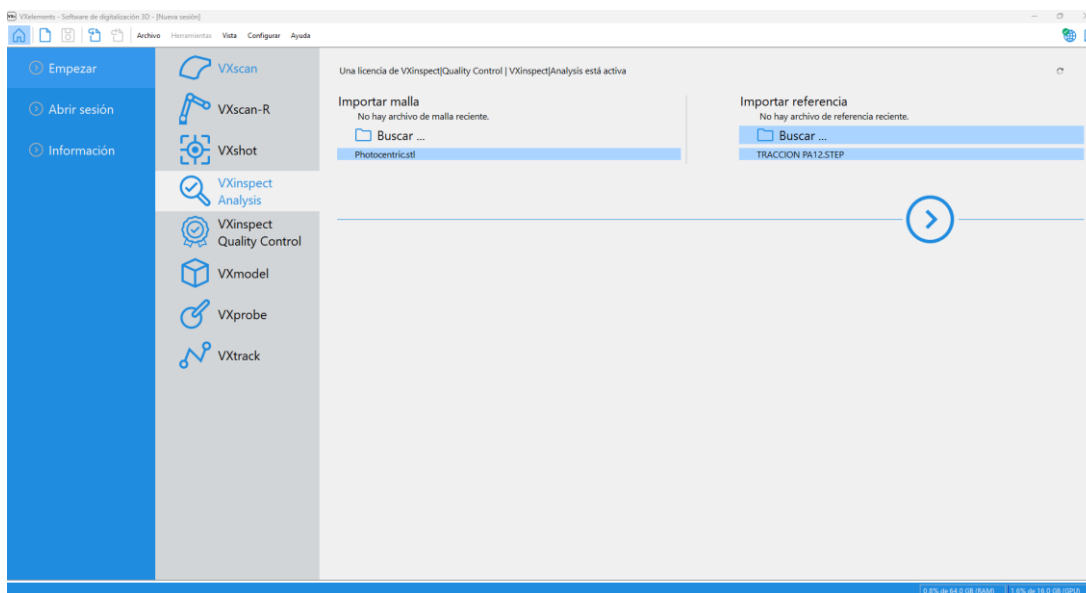


Ilustración 8. Módulo VXinspect

A continuación, se muestra las imágenes del proceso de inspección de esta probeta de la tecnología SLS.

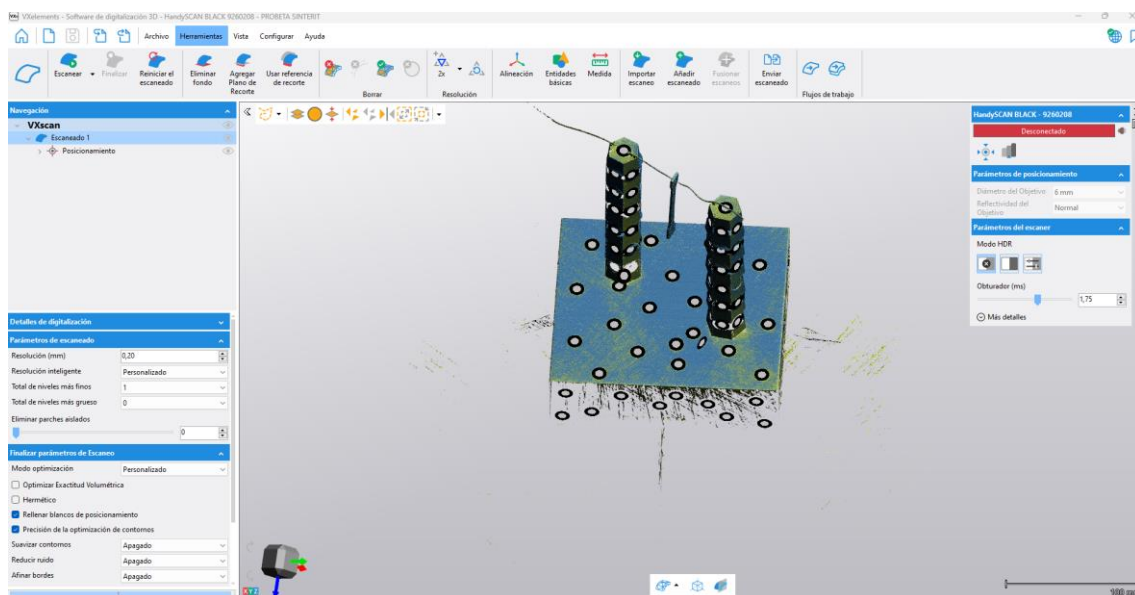


Ilustración 9.Resultado del escaneo (probeta de la tecnología SLS y elementos que contiene las dianas)

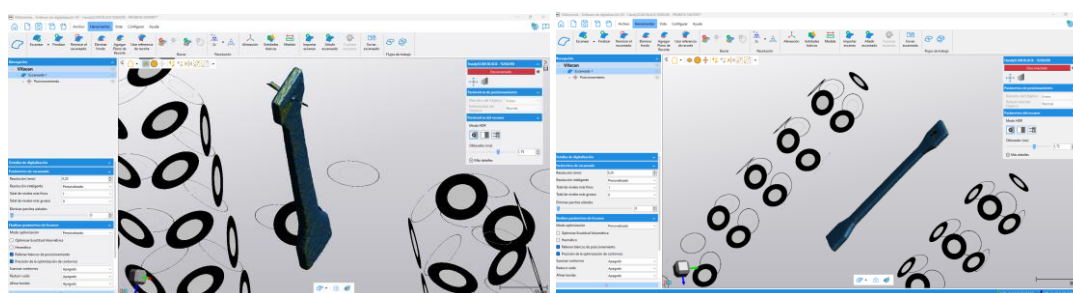


Ilustración 10.Proceso de eliminación de los elementos que no forman parte de la probeta

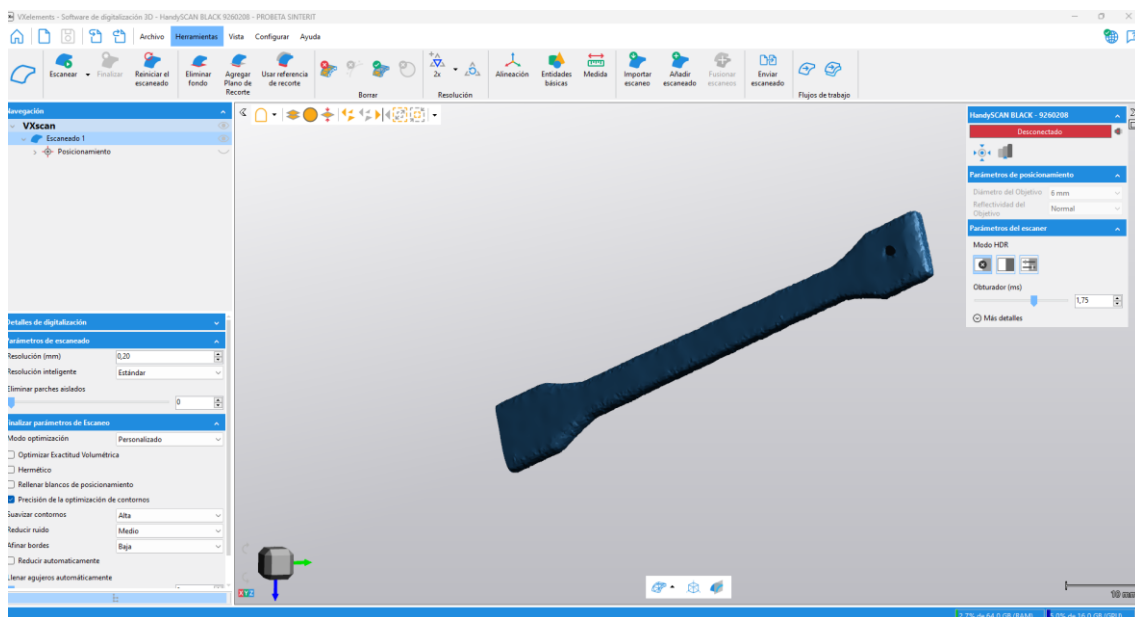


Ilustración 11.Parámetros para finalizar el escaneo y pieza final escaneada

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.

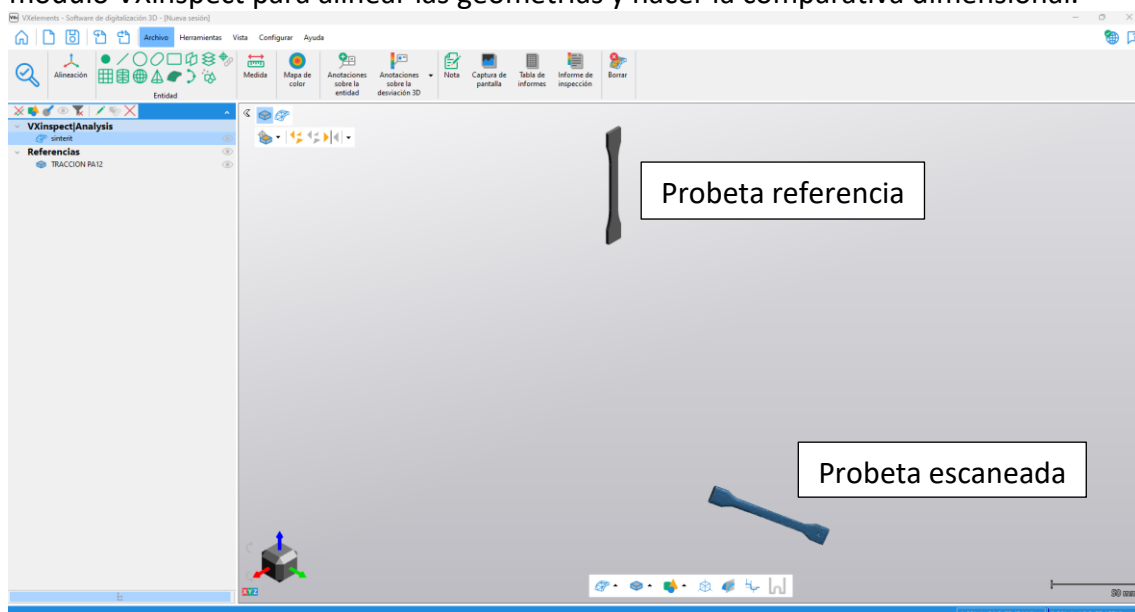


Ilustración 12. Módulo VXinspect. Probeta escaneada sinterit y probeta referencia, cada una en una localización diferente

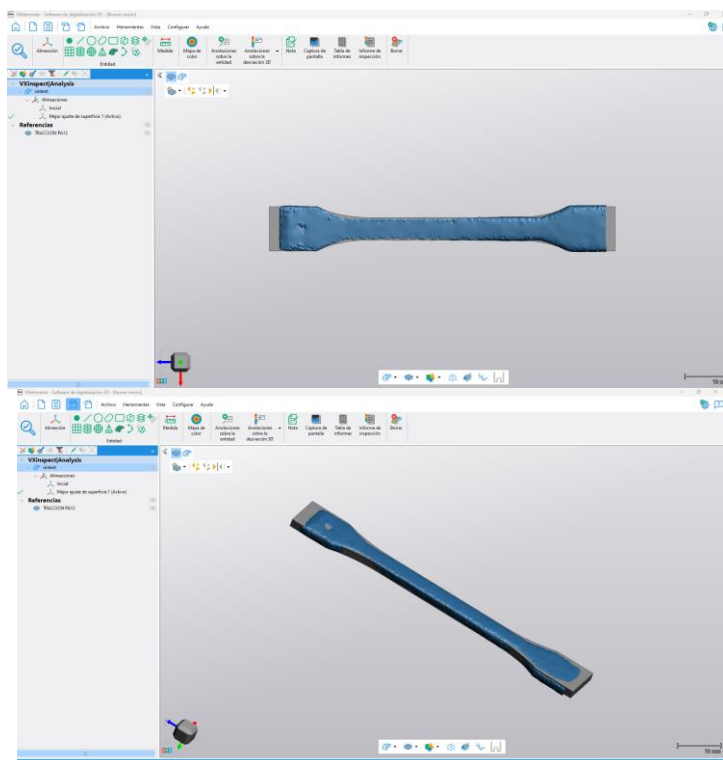


Ilustración 13. Módulo VXinspect. Probetas alineadas (geometría azul probeta escaneada sinterit, geometría gris probeta referencia)

Se ha realizado la comparativa dimensional de las probetas mediante un mapa de

colores.

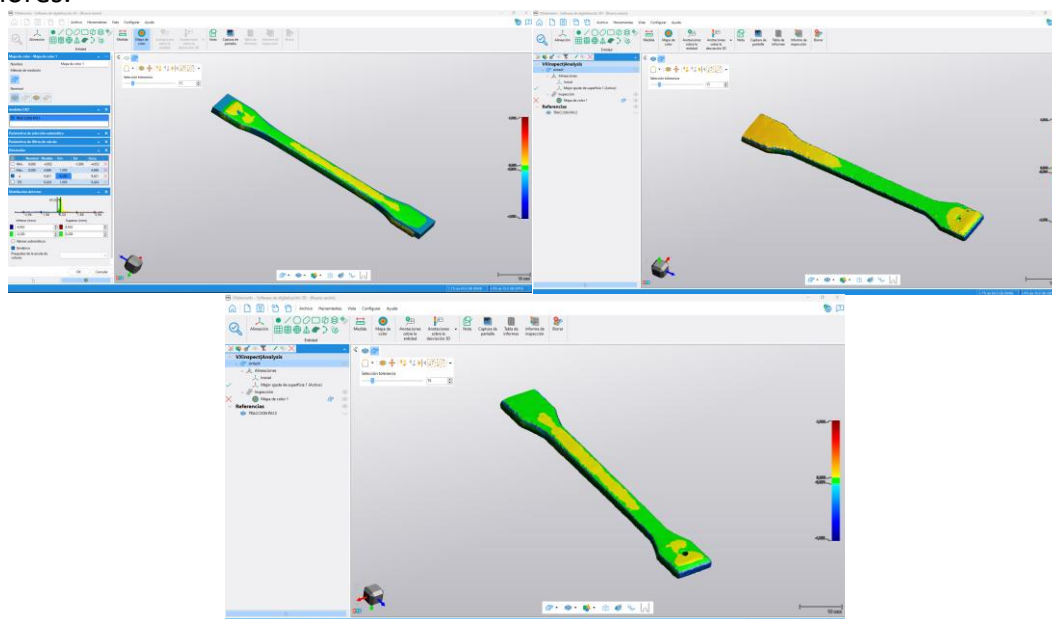


Ilustración 14. Módulo VXinspect. Comparativa entre probeta referencia y probeta escaneada sinterit

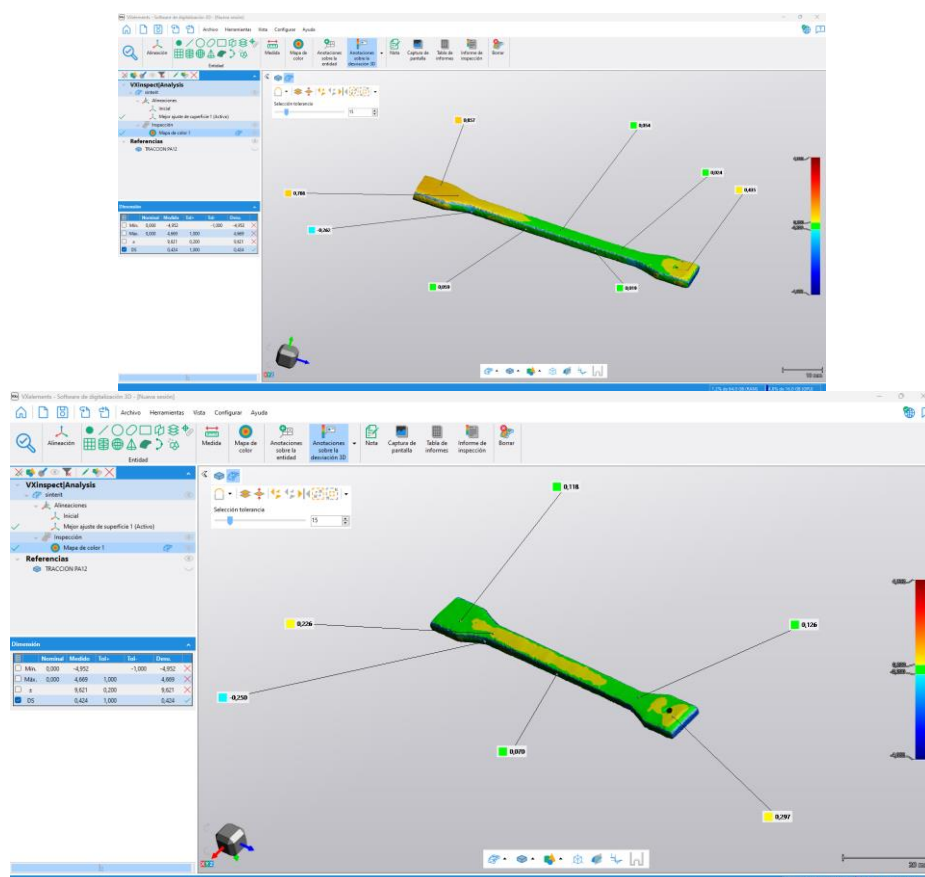


Ilustración 15. Módulo VXinspect. Comparativa entre probeta referencia y probeta escaneada sinterit

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.

Se ha realizado una inspección visual para determinar la caracterización dimensional, de color y de brillo, la cual se describe con detalle más adelante al realizar la comparativa a lo largo de los ensayos de envejecimiento.

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

2.1.2.1 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_1³ para polímeros rígidos, donde establece que para determinar propiedades mecánicas mediante ensayo de tracción se requieren por lo menos 5 probetas, también se fabrica una placa de 75 x 120 x 4 mm para la caracterización dimensional, de brillo y de color. Las probetas se fabricaron correctamente al igual que la placa brillo/color como puede verse en la siguiente figura.



Ilustración 16. Placa brillo color y probetas de tracción, DL110HB

Se realizaron los ensayos mecánicos de tracción para verificar que las propiedades

³ Norma UNE-EN ISO 527-1:2020. Plásticos. Determinación de las propiedades en tracción. Parte 1: Principios generales.

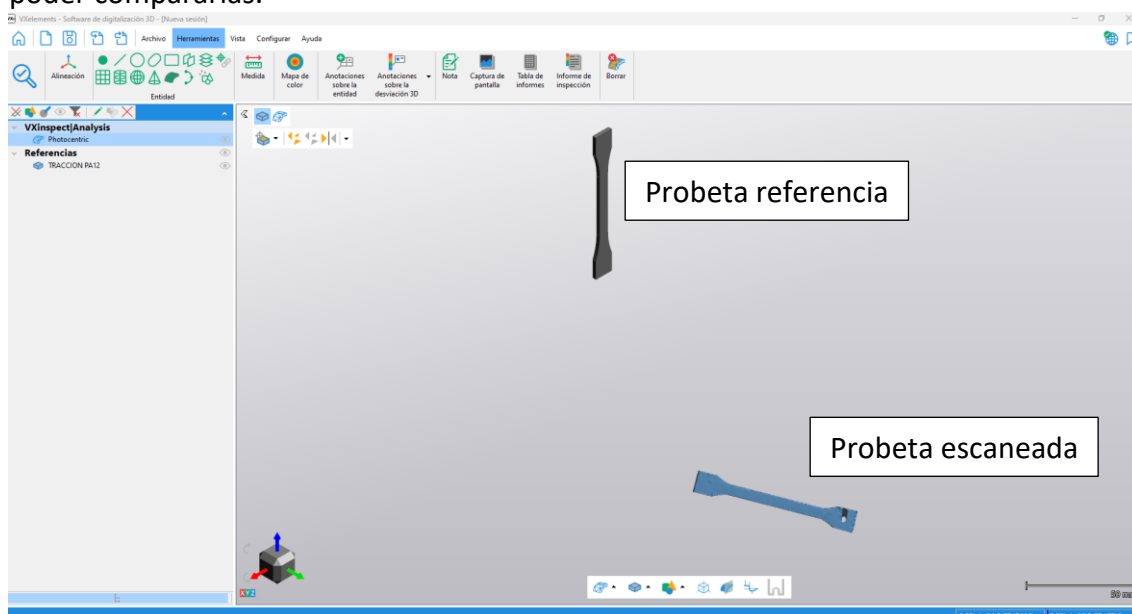
obtenidas se asemejen a lo que reporta el fabricante del equipo LC Magna, obteniéndose los resultados de la tabla 2, tanto la resistencia máxima como la máxima deformación obtenidas son inferiores, pero se consideran valores aceptables para realizar los ensayos de envejecimiento.

Tabla 2. 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 ⁴	60	-	14	-
Probetas en Z	44,30	0,45	5,69	0,23

2.1.2.2 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.



Módulo VXinspect. Probeta escaneada photocentric y probeta referencia, cada una en una localización diferente

⁴ <https://photocentricgroup.com/wp-content/uploads/2024/02/TDS-DL110H-2023-v3.pdf>

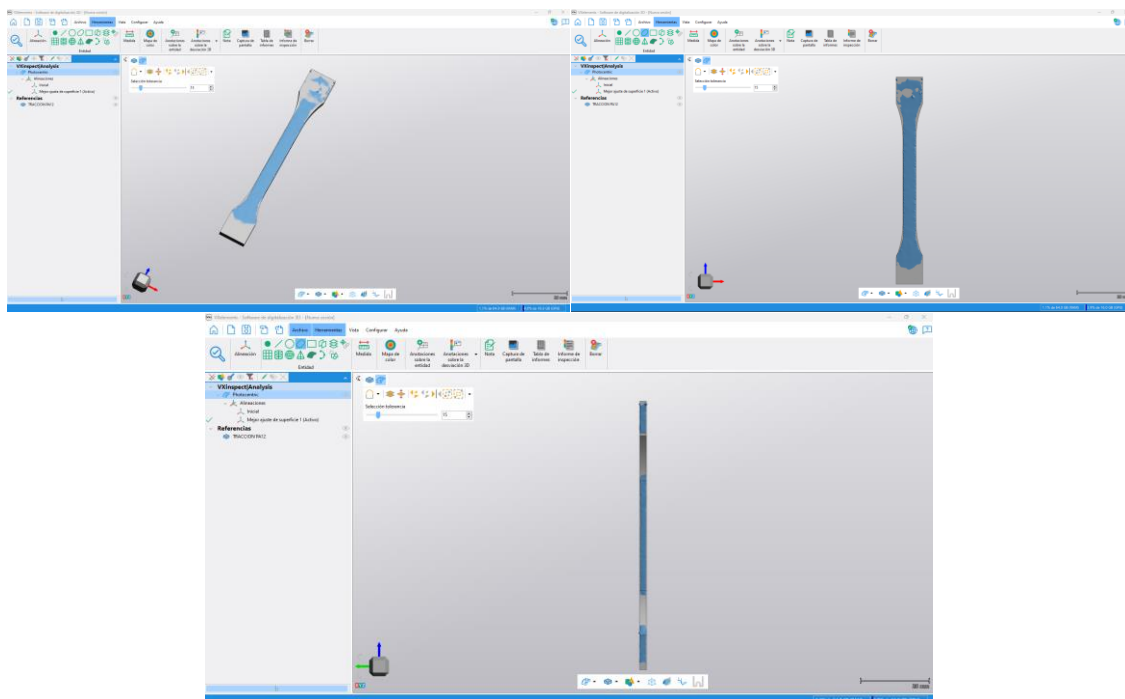


Ilustración 17. Módulo VXinspect. Probetas alineadas (geometría azul probeta escaneada Photocentric, geometría gris probeta referencia)

Se ha realizado la comparativa dimensional de las probetas mediante un mapa de colores.

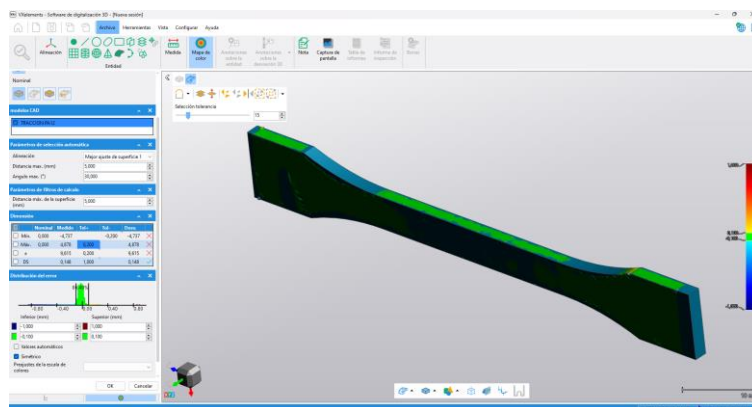


Ilustración 18. Módulo VXinspect. Comparativa con mapa de colores

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.

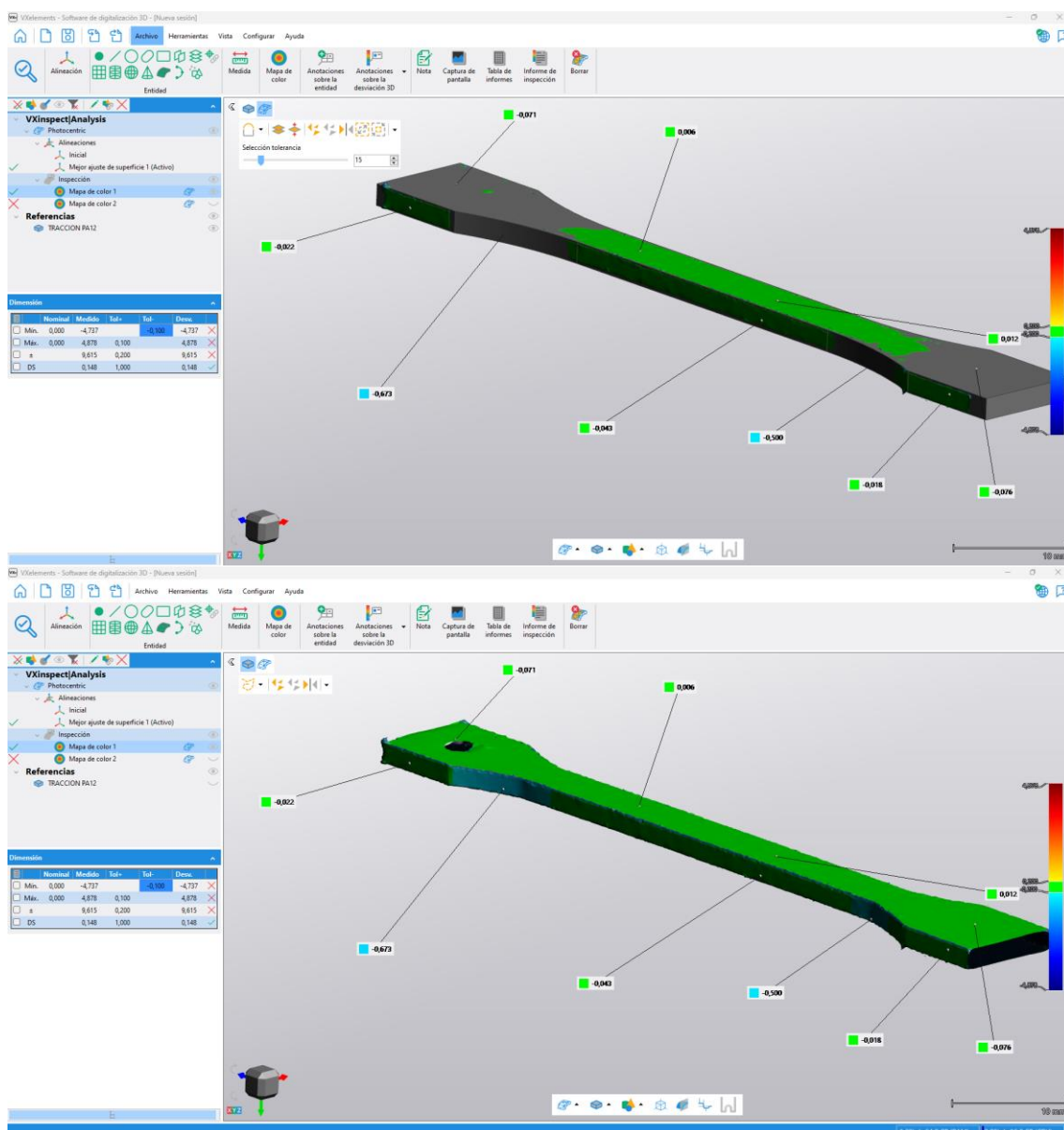


Ilustración 19. Módulo VXinspect. Comparativa entre probeta referencia y probeta escaneada Photocentric

Se ha realizado una inspección visual para determinar la caracterización dimensional, de color y de brillo, la cual se describe con detalle más adelante al realizar la comparativa tras ser sometido el material a los ensayos de envejecimiento acelerado.

2.2 Estudio de la evolución de las propiedades de los materiales sometidos a envejecimiento acelerado (T5.2)

Para la fase de envejecimiento y caracterización se plantea 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.

2.2.1 Revisión bibliográfica:

En esta fase, se parte 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 equipos 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 plantea 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 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 3. 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 /	Áreas de ultramar con elevada salinidad y

	Agresividad extrema	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 ciclo⁵:

Tabla 4. 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 ⁶			Pulverización de Niebla Salina Neutra s/UNE-EN ISO 9227 ⁷			Exposición a baja temperatura a $(-20 \pm 2) ^\circ\text{C}$

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 $(-20) ^\circ\text{C}$. 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).

⁵ Norma UNE-EN ISO 12944-6:2018: Pinturas y barnices. Protección de estructuras de acero frente a la corrosión mediante sistemas de pintura protectores.

⁶ 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).

⁷ Norma UNE-EN ISO 9227. Ensayos de corrosión en atmósferas artificiales. Ensayos de niebla salina. (ISO 9227:2017).

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

2.2.2 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 20.

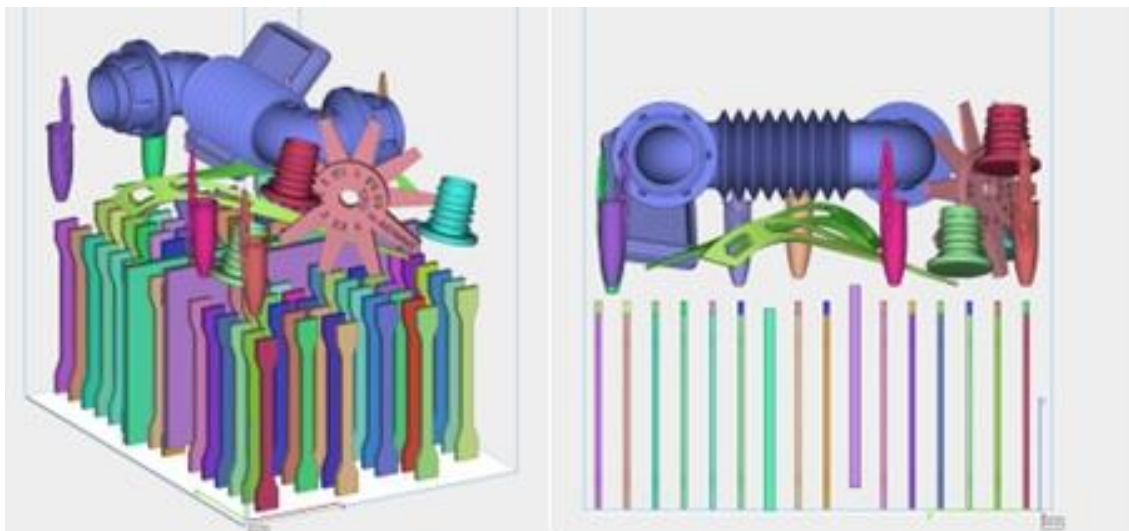


Ilustración 20. Bandeja de fabricación con probetas y lámina para caracterización tras envejecido

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.

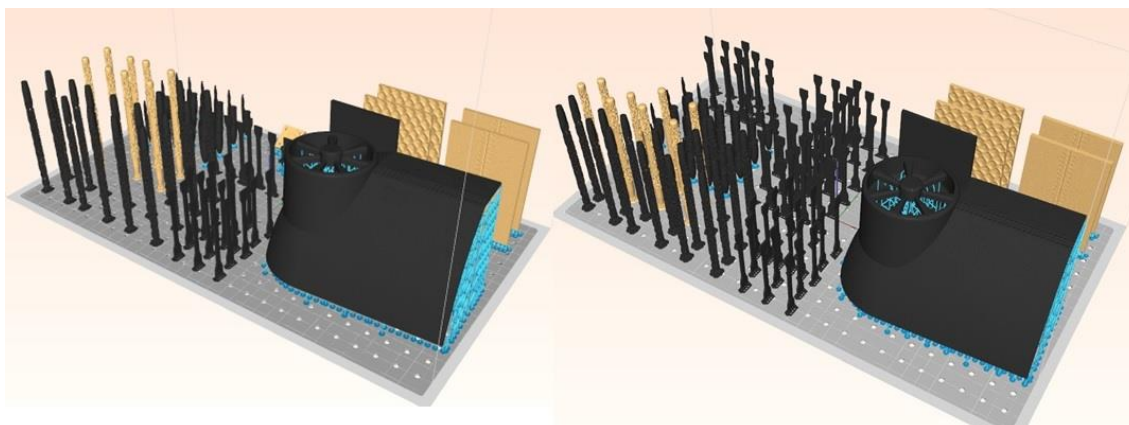


Ilustración 21. Bandejas de fabricación con probetas de tracción y placas brillo color. DL110HB

2.2.3 Resultados de caracterización obtenidos tras los ensayos de envejecimiento acelerado

2.2.3.1 Determinación de brillo especular:

El brillo es una propiedad óptica de una superficie, que se caracteriza por su capacidad para reflejar la luz de manera especular, por tanto, es una percepción visual del observador. La reflexión especular de los objetos se diferencia incluso más cuando la luz se refleja de una manera más direccional en la superficie, es decir, puede ocurrir que en cada una de las direcciones que refleje la luz se observe un brillo diferente. La luz incidente se refleja en las superficies de alto brillo únicamente en la dirección especular principal. Sobre superficies mates la luz no se refleja únicamente en la dirección especular principal, sino que también se dispersa de manera difusa en todos los ángulos sólidos. Cuanto más uniforme sea la dispersión de la luz en el espacio, menor es la intensidad del componente dirigido y la superficie aparece más mate.

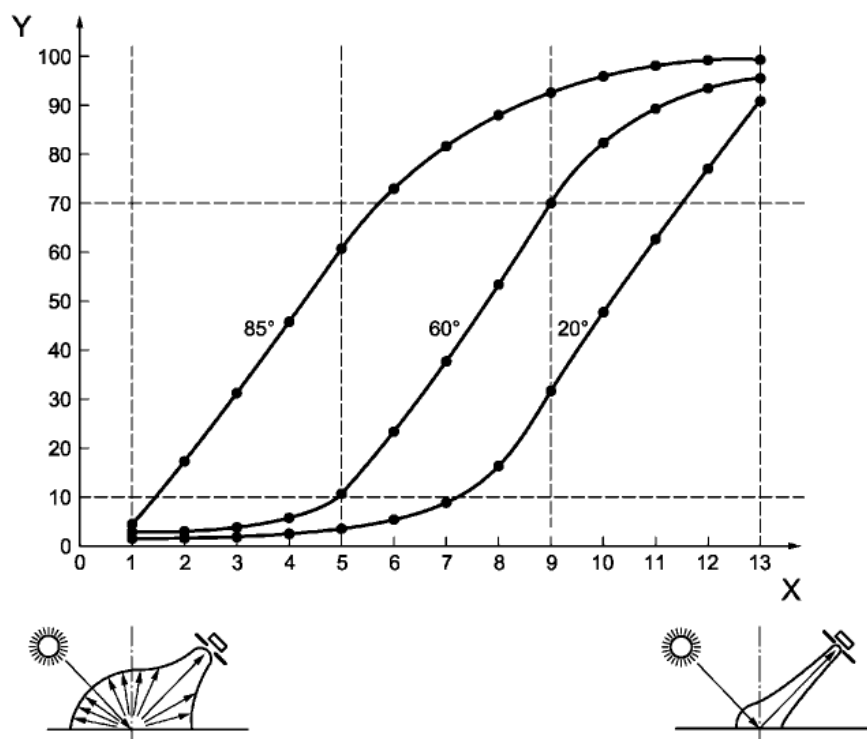
Con un aparato reflectométrico o brillómetros, se determinan los índices de brillo especular en las superficies estudiadas, que se correlacionan con la percepción visual del brillo. Con este brillómetro se obtiene la relación de brillo de la superficie a medir y el brillo de una placa plana de vidrio pulido con un índice de refracción específico.

El fundamento de la medición del brillo se basa en la medición de la luz reflejada de manera direccional. Así pues, se mide la intensidad en un campo angular definido alrededor del ángulo de reflexión. La intensidad de la luz reflejada depende del material superficial y el ángulo incidente. Por tanto, se refleja más luz al incrementar el ángulo incidente sobre las superficies objeto de estudio.

Los índices de brillo especular no están relacionados con la intensidad de la luz incidente sino con las propiedades de reflexión de un patrón de vidrio pulido y negro con un índice de refracción específico.

Para diferentes ángulos del observador o ángulos visuales, la percepción del brillo puede variar de manera considerable. Por ejemplo, las superficies mates pueden aparecer brillantes si se observan bajo una luz lateral no incidente y un ángulo de visión pequeño, porque en estas condiciones de reflexión se refleja de manera direccional una cantidad de luz considerable y también la intensidad de difusión es menor.

En la siguiente figura se observa la relación entre la percepción del brillo de superficies clasificadas como “iguales” de manera visual (de mate a brillante) y los índices de brillo obtenidos cuando se obtienen con ángulos de medición de 20°, 60° y 85°, respectivamente:



Leyenda

Y Índice de brillo especular

X Incremento de la percepción de brillo de mate a brillante

Ilustración 22. Relación entre la percepción del brillo de superficies iguales y los índices de brillo obtenidos con ángulos de medición de 20°, 60° y 85°

Por ejemplo, para una clasificación visual de 9, corresponde un valor de 35 UB si se mide a 20°, 70 UB si se mide a 60° y 95 UB si se mide a 85°. Para una clasificación visual de 5 corresponden los valores de 2 UB medidas a 20°, 10 UB medidas a 60° y 60 UB medidas a 85°.

Debido a la no linealidad de las curvas características que se observan en la figura anterior, el brillo a cada ángulo de medición sólo se puede diferenciar sobre un intervalo específico. En la práctica, se ha comprobado que, en función del grado de brillo de la superficie objeto de estudio, los ángulos de medición adecuados son los siguientes vistos en la figura:

- Geometría de 20° para superficies de alto brillo.
- Geometría de 60° para superficies de semi-brillo.
- Geometría de 85° para superficies mate.

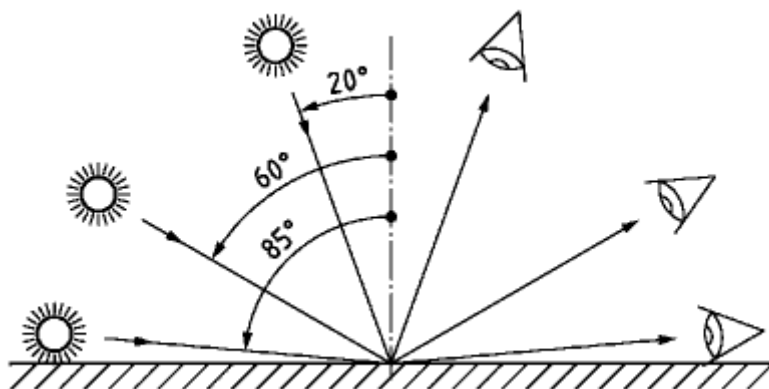


Ilustración 23. Ángulos de medición recomendados según el brillo observado

Condiciones del ensayo de brillo especular:

El ensayo se ha realizado siguiendo la norma de ensayo: UNE-EN ISO 2813_2015⁸, 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.

⁸ Norma UNE-EN ISO 2813_2015. Pinturas y barnices. Determinación del índice de brillo especular a 20°, 60° y 85°. (ISO 2813:2014).

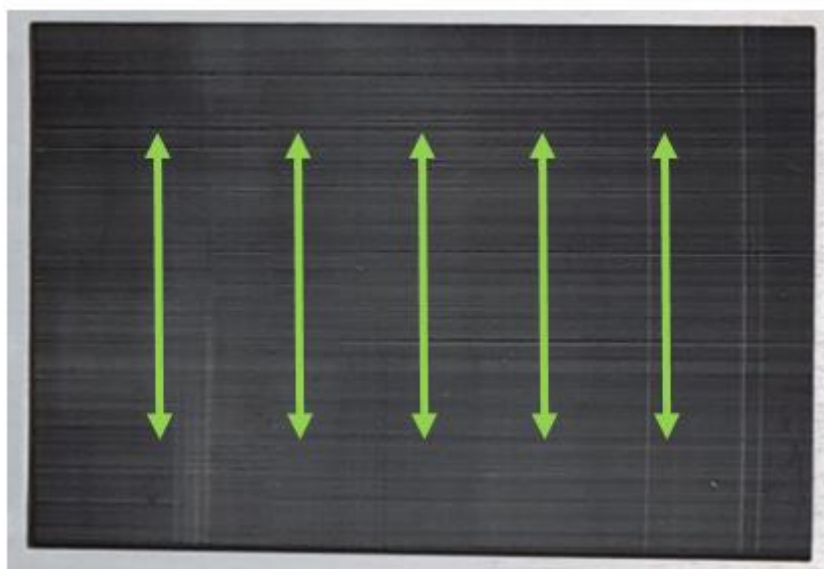


Ilustración 24. Primeras 5 medidas de brillo

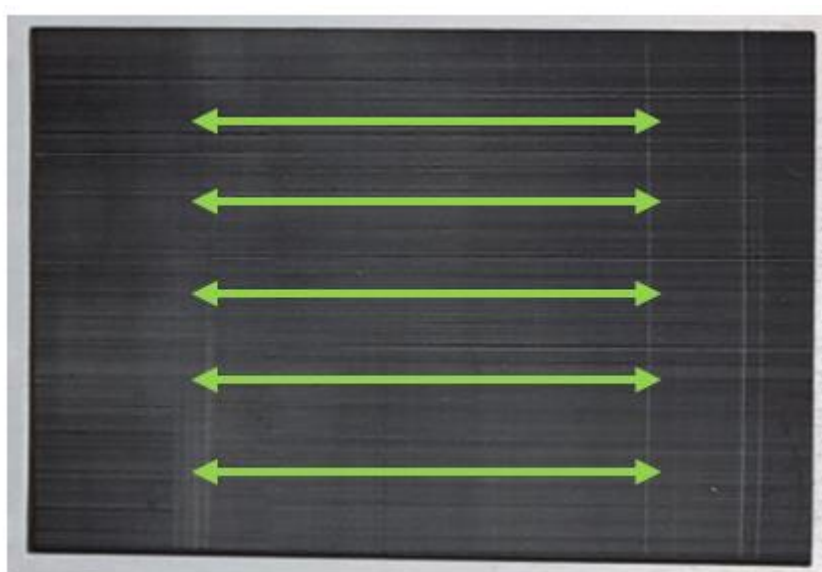


Ilustración 25. Segundas 5 medidas de brillo

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 muestras puede verse en la tabla siguiente los valores obtenidos y en la figura 26 su representación gráfica, donde se observa poca o nula variación del brillo en las muestras.

Tabla 5. Medidas individuales de brillo en muestras obtenidas con la tecnología SLS.

Medidas	Nº ciclos envejecimiento	Brillo (u.b.)	Medidas	Nº ciclos envejecimiento	Brillo (u.b.)	Medidas	Nº ciclos envejecimiento	Brillo (u.b.)
1	Inicial	0,2	58	Ciclo 5	0,2	115	Ciclo 11	0,2
2	Inicial	0,2	59	Ciclo 5	0,2	116	Ciclo 11	0,2
3	Inicial	0,3	60	Ciclo 5	0,2	117	Ciclo 11	0,2
4	Inicial	0,2	61	Ciclo 6	0,2	118	Ciclo 11	0,2
5	Inicial	0,2	62	Ciclo 6	0,2	119	Ciclo 11	0,2
6	Inicial	0,2	63	Ciclo 6	0,2	120	Ciclo 11	0,2
7	Inicial	0,2	64	Ciclo 6	0,2	121	Ciclo 12	0,2
8	Inicial	0,2	65	Ciclo 6	0,2	122	Ciclo 12	0,2
9	Inicial	0,2	66	Ciclo 6	0,2	123	Ciclo 12	0,2
10	Inicial	0,2	67	Ciclo 6	0,2	124	Ciclo 12	0,2
11	Ciclo 1	0,2	68	Ciclo 6	0,2	125	Ciclo 12	0,2
12	Ciclo 1	0,2	69	Ciclo 6	0,2	126	Ciclo 12	0,2
13	Ciclo 1	0,2	70	Ciclo 6	0,2	127	Ciclo 12	0,2
14	Ciclo 1	0,2	71	Ciclo 7	0,2	128	Ciclo 12	0,2
15	Ciclo 1	0,2	72	Ciclo 7	0,2	129	Ciclo 12	0,2
16	Ciclo 1	0,2	73	Ciclo 7	0,2	130	Ciclo 12	0,2
17	Ciclo 1	0,2	74	Ciclo 7	0,2	131	Ciclo 13	0,2
18	Ciclo 1	0,2	75	Ciclo 7	0,2	132	Ciclo 13	0,2
19	Ciclo 1	0,2	76	Ciclo 7	0,2	133	Ciclo 13	0,2
20	Ciclo 1	0,2	77	Ciclo 7	0,2	134	Ciclo 13	0,3
21	Ciclo 2	0,2	78	Ciclo 7	0,2	135	Ciclo 13	0,3
22	Ciclo 2	0,2	79	Ciclo 7	0,2	136	Ciclo 13	0,3
23	Ciclo 2	0,3	80	Ciclo 7	0,2	137	Ciclo 13	0,3
24	Ciclo 2	0,3	81	Ciclo 8	0,2	138	Ciclo 13	0,2
25	Ciclo 2	0,3	82	Ciclo 8	0,2	139	Ciclo 13	0,2
26	Ciclo 2	0,2	83	Ciclo 8	0,2	140	Ciclo 13	0,2
27	Ciclo 2	0,2	84	Ciclo 8	0,2	141	Ciclo 14	0,2
28	Ciclo 2	0,3	85	Ciclo 8	0,2	142	Ciclo 14	0,2
29	Ciclo 2	0,3	86	Ciclo 8	0,2	143	Ciclo 14	0,2
30	Ciclo 2	0,3	87	Ciclo 8	0,2	144	Ciclo 14	0,2
31	Ciclo 3	0,3	88	Ciclo 8	0,2	145	Ciclo 14	0,2
32	Ciclo 3	0,2	89	Ciclo 8	0,2	146	Ciclo 14	0,2
33	Ciclo 3	0,2	90	Ciclo 8	0,2	147	Ciclo 14	0,2
34	Ciclo 3	0,2	91	Ciclo 9	0,2	148	Ciclo 14	0,2
35	Ciclo 3	0,2	92	Ciclo 9	0,2	149	Ciclo 14	0,2
36	Ciclo 3	0,3	93	Ciclo 9	0,2	150	Ciclo 14	0,2
37	Ciclo 3	0,2	94	Ciclo 9	0,2	151	Ciclo 15	0,2
38	Ciclo 3	0,2	95	Ciclo 9	0,2	152	Ciclo 15	0,2
39	Ciclo 3	0,2	96	Ciclo 9	0,2	153	Ciclo 15	0,2
40	Ciclo 3	0,2	97	Ciclo 9	0,2	154	Ciclo 15	0,2
41	Ciclo 4	0,2	98	Ciclo 9	0,2	155	Ciclo 15	0,2
42	Ciclo 4	0,3	99	Ciclo 9	0,2	156	Ciclo 15	0,2
43	Ciclo 4	0,3	100	Ciclo 9	0,2	157	Ciclo 15	0,2
44	Ciclo 4	0,2	101	Ciclo 10	0,2	158	Ciclo 15	0,2
45	Ciclo 4	0,2	102	Ciclo 10	0,2	159	Ciclo 15	0,2
46	Ciclo 4	0,2	103	Ciclo 10	0,2	160	Ciclo 15	0,2
47	Ciclo 4	0,2	104	Ciclo 10	0,2	161	Ciclo 16	0,2
48	Ciclo 4	0,2	105	Ciclo 10	0,2	162	Ciclo 16	0,2
49	Ciclo 4	0,2	106	Ciclo 10	0,2	163	Ciclo 16	0,2
50	Ciclo 4	0,2	107	Ciclo 10	0,2	164	Ciclo 16	0,2
51	Ciclo 5	0,2	108	Ciclo 10	0,2	165	Ciclo 16	0,2
52	Ciclo 5	0,2	109	Ciclo 10	0,2	166	Ciclo 16	0,2
53	Ciclo 5	0,2	110	Ciclo 10	0,2	167	Ciclo 16	0,2
54	Ciclo 5	0,2	111	Ciclo 11	0,2	168	Ciclo 16	0,2
55	Ciclo 5	0,2	112	Ciclo 11	0,2	169	Ciclo 16	0,2
56	Ciclo 5	0,2	113	Ciclo 11	0,2	170	Ciclo 16	0,2
57	Ciclo 5	0,2	114	Ciclo 11	0,2			

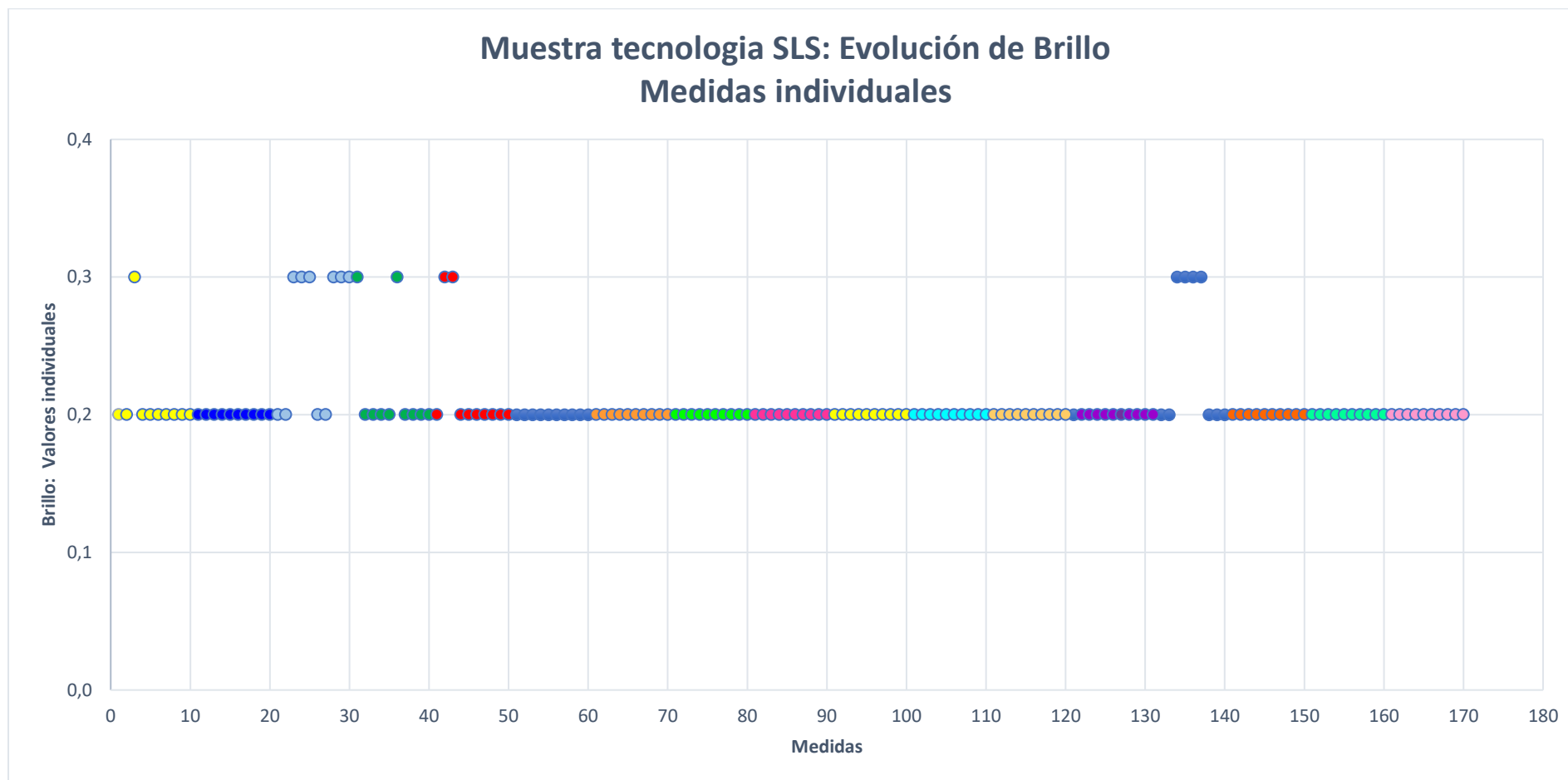


Ilustración 26. Representación gráfica de medidas individuales del brillo, muestras SLS

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, como puede verse en la siguiente tabla y figura.

Tabla 6. Valores medios de brillo obtenidos en la muestra de la tecnología SLS.

Medidas	Nº ciclos envejecimiento	U (k=2) (u.b.)	Brillo medio (u.b.)
1	Inicial	3,00	0,00
2	Ciclo 1	3,00	0,00
3	Ciclo 2	3,00	0,00
4	Ciclo 3	3,00	0,00
5	Ciclo 4	3,00	0,00
6	Ciclo 5	3,00	0,00
7	Ciclo 6	3,00	0,00
8	Ciclo 7	3,00	0,00
9	Ciclo 8	3,00	0,00
10	Ciclo 9	3,00	0,00
11	Ciclo 10	3,00	0,00
12	Ciclo 11	3,00	0,00
13	Ciclo 12	3,00	0,00
14	Ciclo 13	3,00	0,00
15	Ciclo 14	3,00	0,00
16	Ciclo 15	3,00	0,00
17	Ciclo 16	3,00	0,00

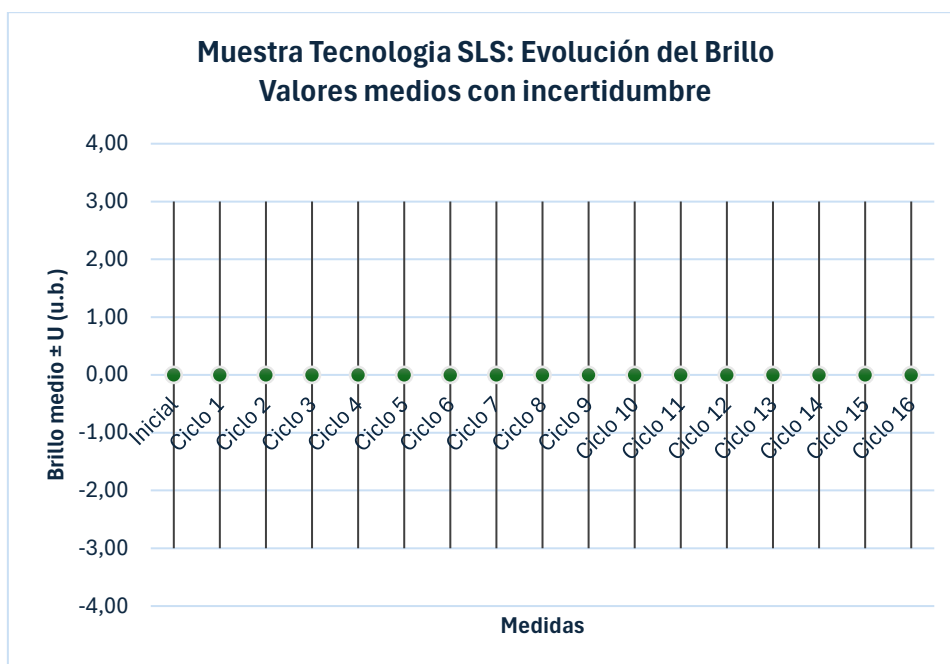


Ilustración 27. Valores medios de evolución de brillo tecnología SLS

Muestra de tecnología LCD:

Medidas individuales de brillo:

Como se describió anteriormente se han realizado 10 medidas por condición, 5 en cada dirección, para el caso de estas muestras puede verse en la tabla siguiente los valores obtenidos y en la figura 28 su representación gráfica. Se observa 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.

Tabla 7. Medidas individuales de brillo en muestras obtenidas con la tecnología LCD.

Medidas	Nº ciclos envejecimient o	Brillo (u.b.)	Medidas	Nº ciclos envejecimient o	Brillo (u.b.)	Medidas	Nº ciclos envejecimient o	Brillo (u.b.)
1	Inicial	4,9	58	Ciclo 5	10,2	115	Ciclo 11	7,3
2	Inicial	5,8	59	Ciclo 5	10,2	116	Ciclo 11	12,6
3	Inicial	5,6	60	Ciclo 5	9,9	117	Ciclo 11	12,7
4	Inicial	5,4	61	Ciclo 6	5,8	118	Ciclo 11	12,0
5	Inicial	5,5	62	Ciclo 6	7,8	119	Ciclo 11	11,2
6	Inicial	8,0	63	Ciclo 6	7,3	120	Ciclo 11	11,4
7	Inicial	7,8	64	Ciclo 6	7,1	121	Ciclo 12	8,5
8	Inicial	8,5	65	Ciclo 6	7,6	122	Ciclo 12	8,2
9	Inicial	9,2	66	Ciclo 6	12,3	123	Ciclo 12	7,6
10	Inicial	9,2	67	Ciclo 6	12,0	124	Ciclo 12	7,8
11	Ciclo 1	5,0	68	Ciclo 6	11,4	125	Ciclo 12	8,2
12	Ciclo 1	5,6	69	Ciclo 6	11,1	126	Ciclo 12	13,7
13	Ciclo 1	5,9	70	Ciclo 6	11,6	127	Ciclo 12	13,7
14	Ciclo 1	5,6	71	Ciclo 7	6,3	128	Ciclo 12	12,9
15	Ciclo 1	5,5	72	Ciclo 7	6,8	129	Ciclo 12	12,5
16	Ciclo 1	10,9	73	Ciclo 7	7,4	130	Ciclo 12	12,3
17	Ciclo 1	11,1	74	Ciclo 7	7,8	131	Ciclo 13	7,2
18	Ciclo 1	9,9	75	Ciclo 7	7,8	132	Ciclo 13	7,7
19	Ciclo 1	9,1	76	Ciclo 7	12,8	133	Ciclo 13	8,3
20	Ciclo 1	9,5	77	Ciclo 7	12,5	134	Ciclo 13	7,8
21	Ciclo 2	5,4	78	Ciclo 7	11,8	135	Ciclo 13	8,8
22	Ciclo 2	5,7	79	Ciclo 7	11,8	136	Ciclo 13	13,2
23	Ciclo 2	6,1	80	Ciclo 7	11,9	137	Ciclo 13	13,8
24	Ciclo 2	6,1	81	Ciclo 8	6,2	138	Ciclo 13	13,4
25	Ciclo 2	5,9	82	Ciclo 8	6,9	139	Ciclo 13	12,9
26	Ciclo 2	10,7	83	Ciclo 8	7,5	140	Ciclo 13	13,6
27	Ciclo 2	10,9	84	Ciclo 8	8,2	141	Ciclo 14	7,3
28	Ciclo 2	10,1	85	Ciclo 8	8,8	142	Ciclo 14	7,8
29	Ciclo 2	9,4	86	Ciclo 8	12,4	143	Ciclo 14	8,0
30	Ciclo 2	9,2	87	Ciclo 8	12,4	144	Ciclo 14	7,8
31	Ciclo 3	5,4	88	Ciclo 8	11,6	145	Ciclo 14	8,2
32	Ciclo 3	5,7	89	Ciclo 8	11,0	146	Ciclo 14	13,0
33	Ciclo 3	6,1	90	Ciclo 8	12,1	147	Ciclo 14	13,3
34	Ciclo 3	6,1	91	Ciclo 9	6,6	148	Ciclo 14	13,1
35	Ciclo 3	5,9	92	Ciclo 9	8,0	149	Ciclo 14	12,0
36	Ciclo 3	10,7	93	Ciclo 9	8,1	150	Ciclo 14	11,9
37	Ciclo 3	10,9	94	Ciclo 9	8,3	151	Ciclo 15	7,9
38	Ciclo 3	10,1	95	Ciclo 9	8,4	152	Ciclo 15	8,2
39	Ciclo 3	9,4	96	Ciclo 9	12,6	153	Ciclo 15	8,6
40	Ciclo 3	9,2	97	Ciclo 9	12,5	154	Ciclo 15	8,2
41	Ciclo 4	5,8	98	Ciclo 9	12,3	155	Ciclo 15	9,3
42	Ciclo 4	6,8	99	Ciclo 9	12,1	156	Ciclo 15	13,3
43	Ciclo 4	6,6	100	Ciclo 9	11,8	157	Ciclo 15	11,1
44	Ciclo 4	6,5	101	Ciclo 10	8,2	158	Ciclo 15	13,2
45	Ciclo 4	6,6	102	Ciclo 10	7,9	159	Ciclo 15	14,1
46	Ciclo 4	11,1	103	Ciclo 10	7,9	160	Ciclo 15	13,1
47	Ciclo 4	11,3	104	Ciclo 10	8,1	161	Ciclo 16	8,2
48	Ciclo 4	10,4	105	Ciclo 10	10,2	162	Ciclo 16	8,0
49	Ciclo 4	10,2	106	Ciclo 10	13,5	163	Ciclo 16	8,4
50	Ciclo 4	10,3	107	Ciclo 10	13,2	164	Ciclo 16	9,1
51	Ciclo 5	5,8	108	Ciclo 10	13,0	165	Ciclo 16	9,5
52	Ciclo 5	6,5	109	Ciclo 10	12,6	166	Ciclo 16	17,4
53	Ciclo 5	6,2	110	Ciclo 10	12,9	167	Ciclo 16	16,5
54	Ciclo 5	6,3	111	Ciclo 11	6,7	168	Ciclo 16	17,3
55	Ciclo 5	6,5	112	Ciclo 11	8,0	169	Ciclo 16	17,8
56	Ciclo 5	10,7	113	Ciclo 11	7,7	170	Ciclo 16	17,0
57	Ciclo 5	10,4	114	Ciclo 11	7,0			

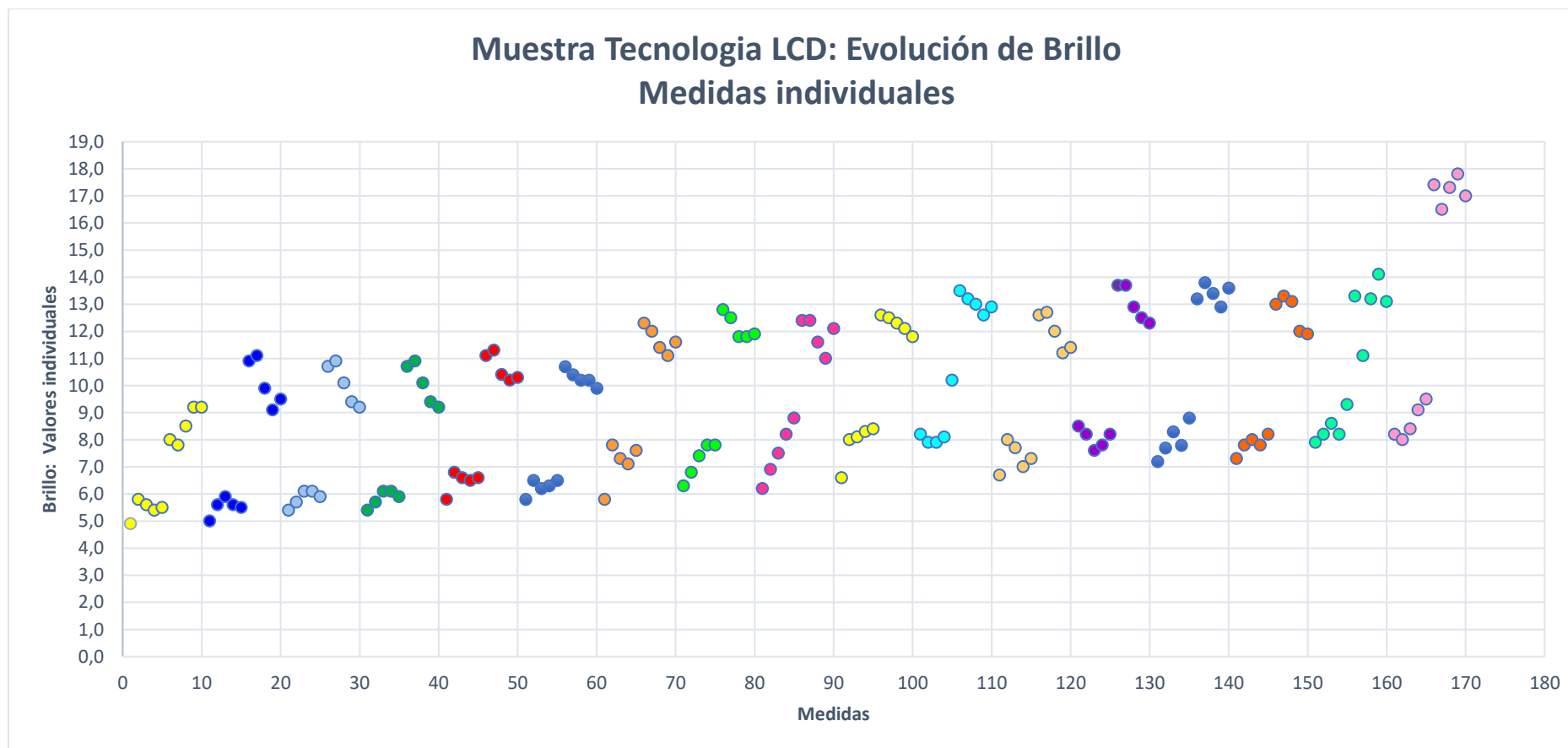


Ilustración 28. Valores individuales de evolución del brillo en muestra de tecnología LCD.

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 tabla y figura.

Tabla 8. Valores medios de brillo obtenidos en la muestra de la tecnología LCD.

Medidas	Nº ciclos envejecimiento	U (k=2) (u.b.)	Brillo medio (u.b.)
1	Inicial	3,00	7,00
2	Ciclo 1	4,00	8,00
3	Ciclo 2	4,00	8,00
4	Ciclo 3	4,00	8,00
5	Ciclo 4	4,00	9,00
6	Ciclo 5	4,00	8,00
7	Ciclo 6	4,00	9,00
8	Ciclo 7	4,00	10,00
9	Ciclo 8	4,00	10,00
10	Ciclo 9	4,00	10,00
11	Ciclo 10	4,00	11,00
12	Ciclo 11	4,00	10,00
13	Ciclo 12	4,00	11,00
14	Ciclo 13	4,00	11,00
15	Ciclo 14	4,00	10,00
16	Ciclo 15	4,00	11,00
17	Ciclo 16	5,00	13,00

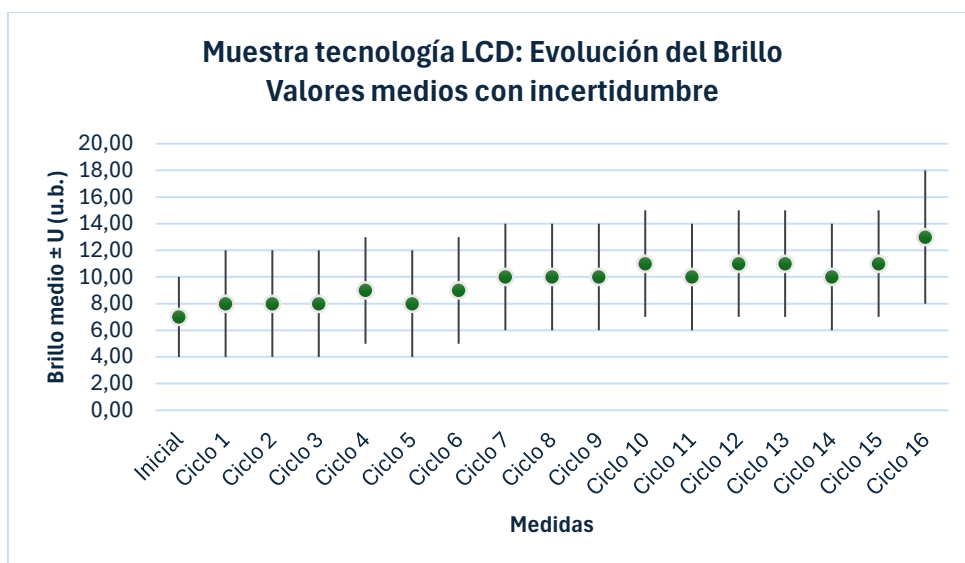


Ilustración 29. Valores medios de evolución de brillo en muestras de tecnología LCD

Conclusiones de la evolución del brillo:

Conclusiones de la muestra obtenida con la tecnología SLS:

- En las mediciones de brillo individuales no se observa diferencia entre el brillo que se obtiene en una dirección de medida y en la perpendicular.
- El brillo obtenido se mantiene prácticamente constante a lo largo de todos los ciclos de envejecimiento.
- La muestra es totalmente mate, ya que su brillo es prácticamente cero.
- Si se trabaja con los valores medios obtenidos en las mediciones realizadas tras cada ciclo de envejecimiento, se observa que no existe variación en el brillo a lo largo de los ciclos de envejecimiento.

Conclusiones Muestra tecnología LCD:

- En las mediciones de brillo individuales se observa que existe una diferencia importante entre el brillo que se obtiene en una dirección de medida y en la perpendicular, siendo menor el brillo que se obtiene en la dirección paralela al Eje Z (lado corto) y mayor en la dirección paralela al Eje Z (lado largo).
- Tanto el brillo obtenido en la dirección paralela al lado corto como el obtenido en la dirección paralela al lado largo siguen la misma progresión a lo largo de los envejecimientos.
- El brillo aumenta ligeramente a medida que aumenta la exposición al envejecimiento.
- Si se trabaja con los valores medios obtenidos en las mediciones realizadas tras cada ciclo de envejecimiento, se observa un incremento del brillo progresivo.

2.2.3.2 Determinación de las coordenadas de color:

Un Color determinado se caracteriza únicamente para un observador y una fuente de luz determinados, por medio de las coordenada de un punto en un espacio definido por tres vectores perpendiculares entre sí. De entre las distintas coordenadas de color recomendadas por la Comisión Internacional de Iluminación (CIE) para medidas colorimétricas de superficies, se van a utilizar para este estudio las Coordenadas de color en el espacio de color aproximadamente uniforme CIE, ($L^* a^* b^*$).

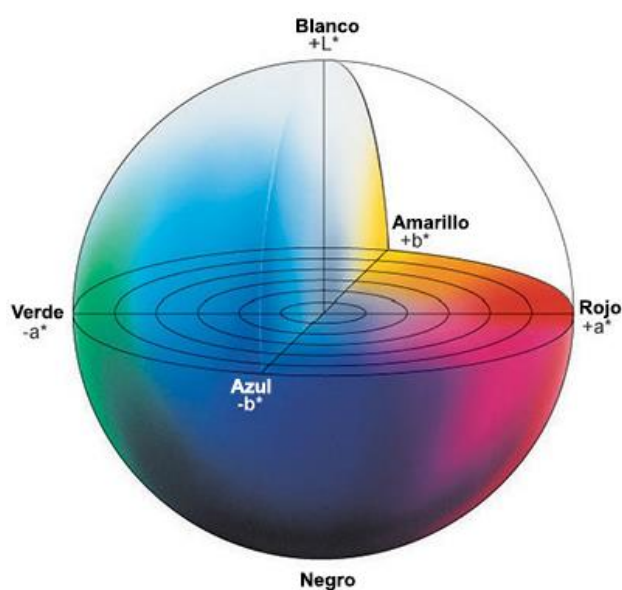


Ilustración 30. Coordenadas de color en el espacio de color aproximadamente uniforme CIE, ($L^* a^* b^*$)

Un color concreto determina un punto en el espacio tridimensional de coordenadas. Por ejemplo:

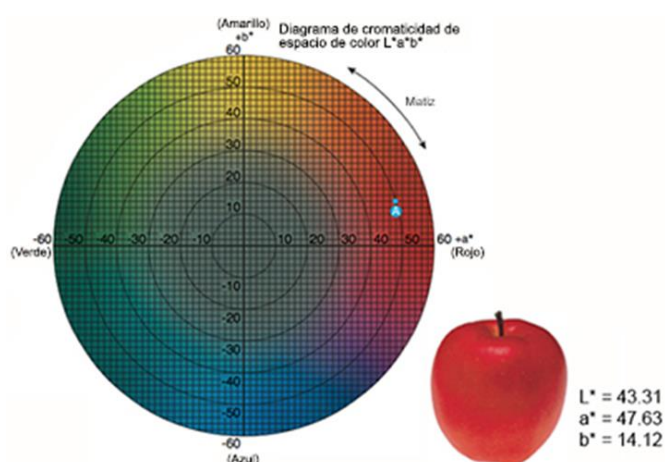


Ilustración 31. Diagrama de cromaticidad de espacio de color $L^* a^* b^*$

Rangos de valores de las coordenadas:

L*: Puede ir de 0 a 100 (mide luminosidad, 0 es negro y 100 blanco)

a*: Puede ir de +60 (rojo) a -60 (verde).

b*: Puede ir de +60 (amarillo) a -60 (azul).

Estas coordenadas son las del espacio de color de percepción más uniforme y por tanto son las que se especifican para evaluación de diferencias de color, que es lo que se estudia a lo largo de los diferentes ciclos de envejecimiento. Para las mediciones de coordenadas de color deben elegirse las condiciones de iluminación y observación adecuadas, en función de las características de la superficie a medir, de entre las siguientes:

Tabla 9. Características radiométricas espectrales.

Características radiométricas espectrales		Condiciones de medida		
	Símbolo	Iluminación	Observación	Designación (abreviada)
Factor de reflectancia espectral	$R_{45/0}(\lambda)$	direccional $45^\circ \pm 5^\circ$	direccional $0^\circ \pm 10^\circ$	45°/normal (45/0)
	$R_{0/45}(\lambda)$	direccional ¹⁾ $0^\circ \pm 10^\circ$	direccional $45^\circ \pm 5^\circ$	normal/45° (0/45)
	$R_{d/8}(\lambda)$	difusa, esfera integradora	direccional ²⁾ $8^\circ \pm 2^\circ$	difusa/8° (d/8)
	$R_{(d) d/8}(\lambda)$	difusa, esfera integradora con trampa de brillo	direccional ²⁾ $8^\circ \pm 2^\circ$	difusa/8° (d/8) reflexión especular excluida
Reflectancia espectral	$p_{8/d}(\lambda)$	direccional ²⁾ $8^\circ \pm 2^\circ$	difusa esfera integradora	8°/difusa (8/d)
Reflectancia espectral difusa	$p_{(d)8/d}(\lambda)$	direccional ²⁾ $8^\circ \pm 2^\circ$	difusa, esfera integradora con trampa de brillo	8°/difusa (8/d) reflexión especular excluida

En los haces luminosos direccionales de iluminación y observación, el ángulo entre el eje del haz y cualquier rayo no sobrepasará los 5° . La observación e iluminación difusa tiene lugar en una esfera integradora con un recubrimiento interno elegido de tal manera que la luz se difunde por la pared de la esfera uniforme y no selectivamente con respecto a la longitud de onda. El área total de la ventana de la esfera integradora no sobrepasará el 10% del total del área interna reflectante de la esfera.

La luz reflejada especularmente puede suprimirse parcialmente bajo las condiciones de iluminación y observación 8/d y d/8 mediante una trampa de brillo. Los resultados de las medidas dependen del tamaño, la posición y la estructura de la trampa de brillo. En este estudio se ha utilizado esta forma de medición, incluyendo la componente de reflexión especular.

Para la realización de las medidas se ha utilizado un espectrofotómetro simplificado equipado con una cabeza fotométrica. Este instrumento es un fotómetro que contiene al menos 16 filtros interferenciales distribuidos uniformemente en un rango de longitud de onda de 400 nm a 700 nm y un ancho de banda de 20 nm o menos.

Una vez realizada la medida de coordenadas de color sobre la muestra inicial, se va evaluando, tras cada ciclo de envejecimiento, la variación cuantitativa de pequeñas diferencias de color. A esta variación se le conoce como Diferencia de color (ΔE).

La diferencia total ΔE^*_{ab} entre dos colores es la distancia geométrica entre sus posiciones en el espacio de color CIE (L^* , a^* , b^*), y se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$\Delta E^*_{ab} = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]$$

Donde:

$\Delta L^* = L^*_{\text{final}} - L^*_{\text{referencia}}$ (Diferencia de luminosidad)

$\Delta a^* = a^*_{\text{final}} - a^*_{\text{referencia}}$ (Diferencia de saturación)

$\Delta b^* = b^*_{\text{final}} - b^*_{\text{referencia}}$ (Diferencia de tono)

Las tres diferencias se calculan entre el valor de la muestra a medir tras cada ciclo de envejecimiento y el valor de la muestra de referencia (antes de envejecimiento). Estas tres diferencias, ΔL^* , Δa^* y Δb^* , pueden ser positivas (+) o negativas (-), mientras que la diferencia de color total ΔE^* siempre es positiva.

ΔL^* = diferencia en luz y oscuridad (+ = más luminoso, - = más oscuro)

Δa^* = diferencia en rojo y verde (+ = más rojo, - = más verde)

Δb^* = diferencia en amarillo y azul (+ = más amarillo, - = más azul)

Existe relación entre el juicio del observador y la diferencia de color ΔE^* , que puede verse en la siguiente tabla:

Tabla 10. Relación de diferencia percibida sensorialmente y el valor ΔE^*

Diferencia percibida sensorialmente	Valor de ΔE^* (instrumentalmente)
Ninguna	0 - 0.7
Ligera	0.7 - 2.5
Notable	2.5 - 3.0
Apreciable	3.0 - 6.0
Considerable	6.0 - 12.0
Extraordinaria	12.0

Condiciones del ensayo de las coordenadas de color:

El ensayo se ha realizado siguiendo la norma de ensayo UNE-EN ISO 7724_1984⁹, 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 en la tabla siguiente los valores obtenidos y en la figura 32 su representación gráfica. 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.

⁹ Norma UNE-EN ISO 7724_1984: Pinturas y barnices. Colorimetría. Parte 2: Medición del color.

Tabla 11. Medidas individuales de coordenadas de color en muestras obtenidas con la tecnología SLS.

Medidas	Nº ciclos envejecimiento	L*	a*	b*	Medidas	Nº ciclos envejecimiento	L*	a*	b*
1	Inicial	33,07	0,26	-0,19	44	Ciclo 8	35,85	0,12	-0,30
2	Inicial	33,43	0,31	-0,11	45	Ciclo 8	36,09	0,16	0,03
3	Inicial	32,67	0,29	-0,21	46	Ciclo 9	35,50	0,14	-0,08
4	Inicial	34,08	0,28	-0,11	47	Ciclo 9	36,15	0,51	-0,02
5	Inicial	32,62	0,25	-0,24	48	Ciclo 9	35,65	0,21	-0,14
6	Ciclo 1	32,32	0,23	-0,12	49	Ciclo 9	36,03	0,11	-0,25
7	Ciclo 1	33,45	0,29	0,01	50	Ciclo 9	36,51	0,19	0,02
8	Ciclo 1	33,11	0,25	-0,10	51	Ciclo 10	35,48	0,16	0,26
9	Ciclo 1	33,26	0,27	-0,05	52	Ciclo 10	36,60	0,04	-0,25
10	Ciclo 1	32,94	0,23	-0,17	53	Ciclo 10	35,87	0,13	-0,04
11	Ciclo 2	32,76	0,23	-0,14	54	Ciclo 10	36,60	0,06	-0,23
12	Ciclo 2	33,83	0,25	0,25	55	Ciclo 10	36,67	0,15	0,23
13	Ciclo 2	31,52	0,25	-0,15	56	Ciclo 11	36,73	0,12	-0,01
14	Ciclo 2	32,75	0,20	-0,26	57	Ciclo 11	36,52	0,16	0,10
15	Ciclo 2	33,06	0,27	0,04	58	Ciclo 11	37,03	0,09	-0,22
16	Ciclo 3	33,69	0,19	-0,25	59	Ciclo 11	36,84	0,06	-0,18
17	Ciclo 3	34,10	0,24	-0,06	60	Ciclo 11	36,04	0,14	-0,10
18	Ciclo 3	33,69	0,20	-0,18	61	Ciclo 12	34,57	0,17	0,14
19	Ciclo 3	33,83	0,17	-0,30	62	Ciclo 12	36,50	0,17	0,24
20	Ciclo 3	34,67	0,28	0,07	63	Ciclo 12	35,19	0,25	0,77
21	Ciclo 4	34,20	0,20	0,03	64	Ciclo 12	34,30	0,12	-0,07
22	Ciclo 4	33,69	0,21	-0,14	65	Ciclo 12	35,72	0,22	0,93
23	Ciclo 4	34,44	0,21	-0,05	66	Ciclo 13	36,98	0,12	0,12
24	Ciclo 4	34,47	0,13	-0,35	67	Ciclo 13	35,97	0,13	0,16
25	Ciclo 4	34,17	0,26	-0,02	68	Ciclo 13	35,70	0,17	0,07
26	Ciclo 5	34,55	0,21	-0,17	69	Ciclo 13	36,46	0,08	-0,10
27	Ciclo 5	35,13	0,18	-0,31	70	Ciclo 13	36,03	0,18	0,31
28	Ciclo 5	34,43	0,21	-0,26	71	Ciclo 14	33,84	0,15	0,27
29	Ciclo 5	34,51	0,18	-0,33	72	Ciclo 14	34,48	0,14	0,18
30	Ciclo 5	34,80	0,21	-0,08	73	Ciclo 14	34,05	0,16	0,24
31	Ciclo 6	34,89	0,20	0,02	74	Ciclo 14	33,95	0,13	0,08
32	Ciclo 6	35,28	0,19	-0,24	75	Ciclo 14	34,76	0,12	0,22
33	Ciclo 6	34,78	0,19	-0,22	76	Ciclo 15	33,89	0,19	0,42
34	Ciclo 6	34,93	0,14	-0,20	77	Ciclo 15	34,38	0,05	-0,14
35	Ciclo 6	35,54	0,20	0,12	78	Ciclo 15	34,06	0,18	0,11
36	Ciclo 7	35,34	0,17	-0,07	79	Ciclo 15	33,92	0,14	0,27
37	Ciclo 7	35,57	0,15	-0,27	80	Ciclo 15	34,59	0,20	0,47
38	Ciclo 7	35,63	0,18	-0,15	81	Ciclo 16	37,30	0,11	0,13
39	Ciclo 7	35,65	0,10	-0,32	82	Ciclo 16	35,93	0,09	0,07
40	Ciclo 7	35,56	0,19	-0,11	83	Ciclo 16	36,72	0,13	0,07
41	Ciclo 8	35,81	0,15	-0,13	84	Ciclo 16	36,60	0,05	0,01
42	Ciclo 8	36,17	0,15	-0,13	85	Ciclo 16	36,28	0,09	0,14
43	Ciclo 8	35,85	0,15	-0,22					

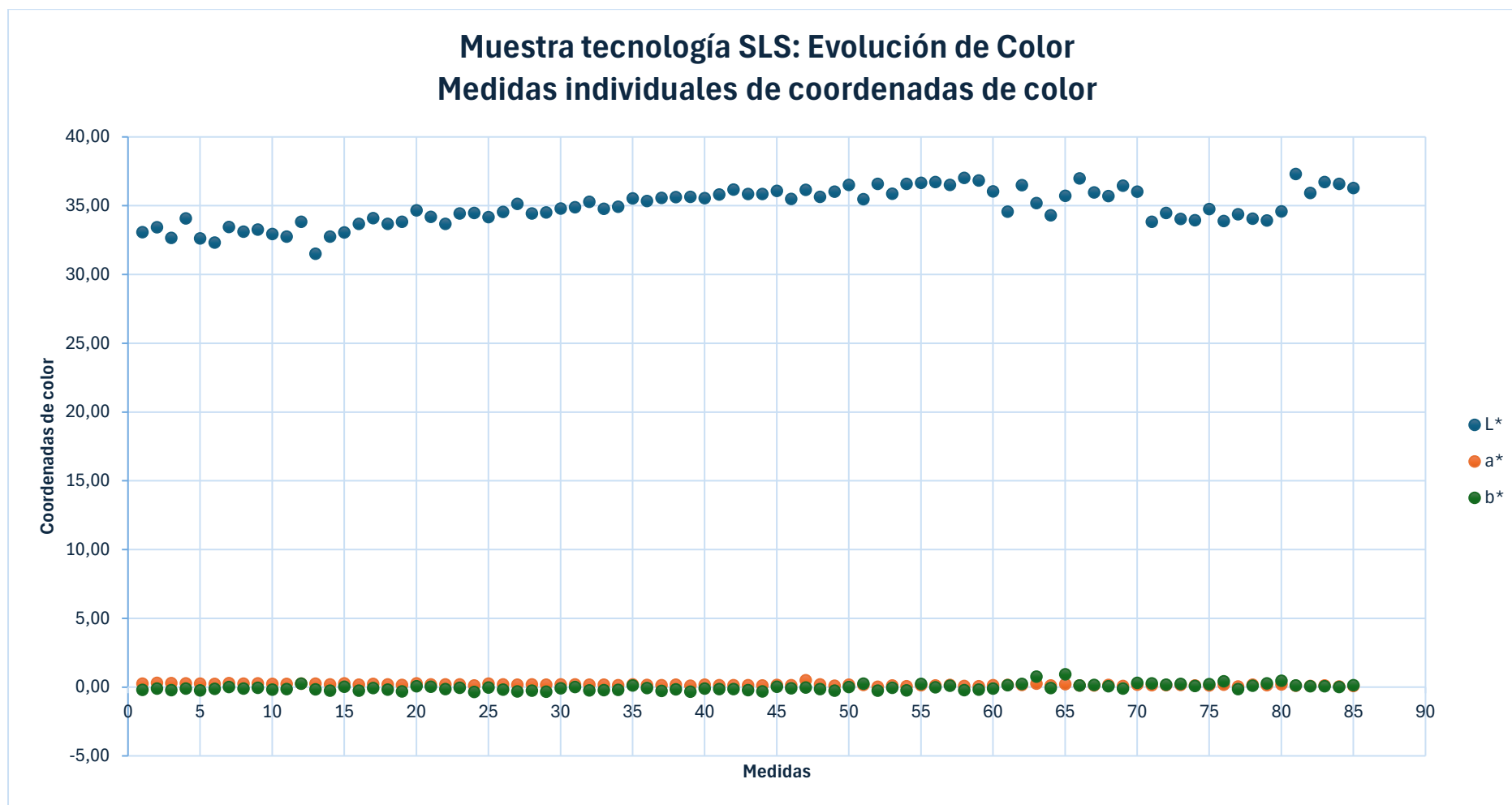


Ilustración 32. Medidas individuales de evolución del color, tecnología SLS.

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 tabla y su representación en la figura 33.

Tabla 12. Valores de diferencia de color total (ΔE), muestra obtenida con tecnología SLS.

Medidas	Nº ciclos envejecimiento	U (k=2)	ΔE
1	Inicial	--	--
2	Ciclo 1	6,69	0,18
3	Ciclo 2	3,44	0,41
4	Ciclo 3	1,45	0,83
5	Ciclo 4	1,17	1,03
6	Ciclo 5	0,79	1,52
7	Ciclo 6	0,63	1,92
8	Ciclo 7	0,51	2,38
9	Ciclo 8	0,43	2,79
10	Ciclo 9	0,43	2,80
11	Ciclo 10	0,41	3,08
12	Ciclo 11	0,35	3,47
13	Ciclo 12	0,65	2,17
14	Ciclo 13	0,41	3,07
15	Ciclo 14	1,07	1,12
16	Ciclo 15	1,10	1,08
17	Ciclo 16	0,37	3,41

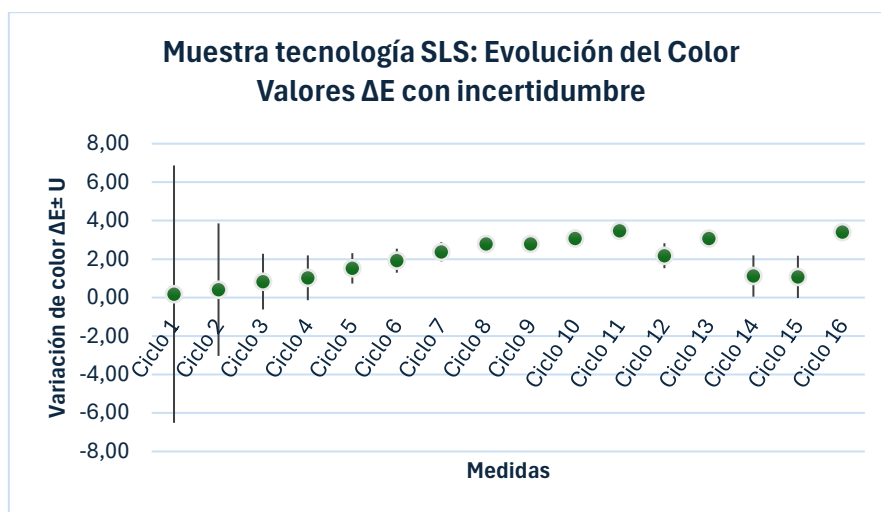


Ilustración 33. Valores ΔE de evolución del color, muestras SLS

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 la tabla siguiente los valores obtenidos y en la figura 34 su representación gráfica. 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.

Tabla 13. Valores individuales obtenidos para coordenadas de color, muestra LCD.

Medidas	Nº ciclos envejecimiento	L*	a*	b*	Medidas	Nº ciclos envejecimiento	L*	a*	b*
1	Inicial	26,16	0,09	-0,64	44	Ciclo 8	25,72	-0,12	0,16
2	Inicial	25,44	-0,05	-0,41	45	Ciclo 8	25,60	-0,20	0,25
3	Inicial	25,64	0,00	-0,38	46	Ciclo 9	25,85	-0,13	0,06
4	Inicial	25,63	0,01	-0,43	47	Ciclo 9	25,63	-0,14	0,14
5	Inicial	25,81	0,07	-0,53	48	Ciclo 9	25,73	-0,11	0,08
6	Ciclo 1	26,04	-0,01	-0,30	49	Ciclo 9	25,66	-0,16	0,19
7	Ciclo 1	25,78	-0,09	-0,14	50	Ciclo 9	25,60	-0,21	0,29
8	Ciclo 1	25,80	-0,08	-0,13	51	Ciclo 10	26,33	-0,07	0,00
9	Ciclo 1	25,68	-0,11	-0,11	52	Ciclo 10	25,33	-0,12	0,23
10	Ciclo 1	25,70	-0,08	-0,05	53	Ciclo 10	25,75	-0,14	0,18
11	Ciclo 2	26,24	-0,04	-0,30	54	Ciclo 10	25,42	-0,20	0,29
12	Ciclo 2	26,24	0,00	-0,29	55	Ciclo 10	25,42	-0,17	0,26
13	Ciclo 2	25,81	-0,14	-0,07	56	Ciclo 11	25,85	-0,16	0,18
14	Ciclo 2	25,69	-0,14	-0,04	57	Ciclo 11	25,34	-0,16	0,31
15	Ciclo 2	25,62	-0,08	-0,06	58	Ciclo 11	25,80	-0,17	0,16
16	Ciclo 3	26,18	-0,09	-0,20	59	Ciclo 11	25,86	-0,24	0,24
17	Ciclo 3	25,77	-0,07	-0,11	60	Ciclo 11	25,35	-0,22	0,37
18	Ciclo 3	25,88	-0,08	-0,11	61	Ciclo 12	25,86	-0,20	0,25
19	Ciclo 3	25,78	-0,11	-0,06	62	Ciclo 12	25,42	-0,21	0,37
20	Ciclo 3	25,46	-0,12	-0,03	63	Ciclo 12	25,77	-0,19	0,25
21	Ciclo 4	26,21	-0,08	-0,15	64	Ciclo 12	25,62	-0,21	0,29
22	Ciclo 4	25,73	-0,09	0,03	65	Ciclo 12	25,40	-0,18	0,39
23	Ciclo 4	25,87	-0,09	-0,04	66	Ciclo 13	25,75	-0,15	0,27
24	Ciclo 4	25,62	-0,14	0,02	67	Ciclo 13	25,73	-0,07	0,29
25	Ciclo 4	25,54	-0,12	0,05	68	Ciclo 13	25,76	-0,21	0,28
26	Ciclo 5	25,66	-0,11	-0,02	69	Ciclo 13	25,62	-0,23	0,37
27	Ciclo 5	25,49	-0,14	0,18	70	Ciclo 13	25,46	-0,23	0,41
28	Ciclo 5	25,82	-0,12	0,01	71	Ciclo 14	26,30	-0,06	0,00
29	Ciclo 5	25,56	-0,12	-0,01	72	Ciclo 14	25,24	-0,18	0,32
30	Ciclo 5	25,37	-0,11	0,08	73	Ciclo 14	25,87	-0,23	0,21
31	Ciclo 6	25,87	-0,08	-0,12	74	Ciclo 14	25,66	-0,24	0,34
32	Ciclo 6	25,84	-0,10	0,06	75	Ciclo 14	25,43	-0,24	0,36
33	Ciclo 6	25,77	-0,10	0,00	76	Ciclo 15	25,17	-0,21	0,41
34	Ciclo 6	25,62	-0,13	0,06	77	Ciclo 15	25,09	-0,24	0,42
35	Ciclo 6	25,39	-0,14	0,18	78	Ciclo 15	25,76	-0,21	0,33
36	Ciclo 7	25,80	-0,21	0,05	79	Ciclo 15	25,53	-0,21	0,34
37	Ciclo 7	25,34	-0,06	0,09	80	Ciclo 15	25,21	-0,20	0,32
38	Ciclo 7	25,75	-0,13	0,01	81	Ciclo 16	24,98	-0,29	0,47
39	Ciclo 7	25,58	-0,16	0,15	82	Ciclo 16	25,48	-0,24	0,37
40	Ciclo 7	25,58	-0,15	0,24	83	Ciclo 16	25,82	-0,27	0,42
41	Ciclo 8	25,94	-0,12	0,04	84	Ciclo 16	25,15	-0,27	0,42
42	Ciclo 8	25,61	-0,02	0,10	85	Ciclo 16	25,31	-0,20	0,36
43	Ciclo 8	25,84	-0,14	0,06					

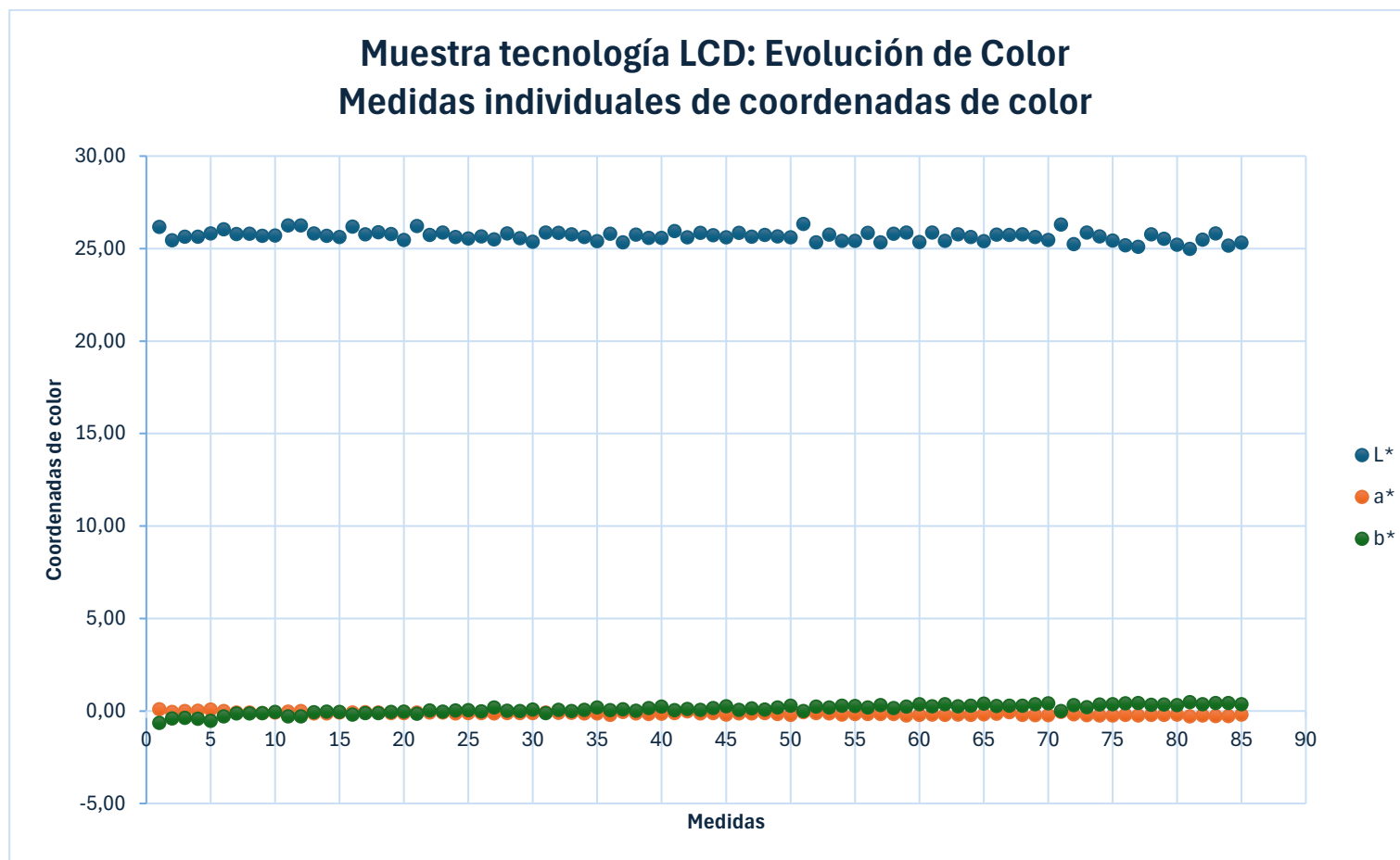


Ilustración 34. Medidas individuales de evolución del color, tecnología LCD.

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, según la tabla 10. Se observan los valores medidos en la tabla 14 y la representación gráfica en la figura 35.

Tabla 14. Valores de diferencia de color total (ΔE), muestra obtenida con tecnología LCD.

Medidas	Nº ciclos envejecimiento	U (k=2)	ΔE
1	Inicial	--	--
2	Ciclo 1	3,21	0,35
3	Ciclo 2	2,91	0,39
4	Ciclo 3	2,82	0,40
5	Ciclo 4	2,35	0,48
6	Ciclo 5	1,99	0,57
7	Ciclo 6	2,12	0,53
8	Ciclo 7	1,82	0,62
9	Ciclo 8	1,83	0,62
10	Ciclo 9	1,73	0,65
11	Ciclo 10	1,63	0,70
12	Ciclo 11	1,48	0,77
13	Ciclo 12	1,37	0,83
14	Ciclo 13	1,36	0,83
15	Ciclo 14	1,50	0,76
16	Ciclo 15	1,18	0,96
17	Ciclo 16	1,12	1,01

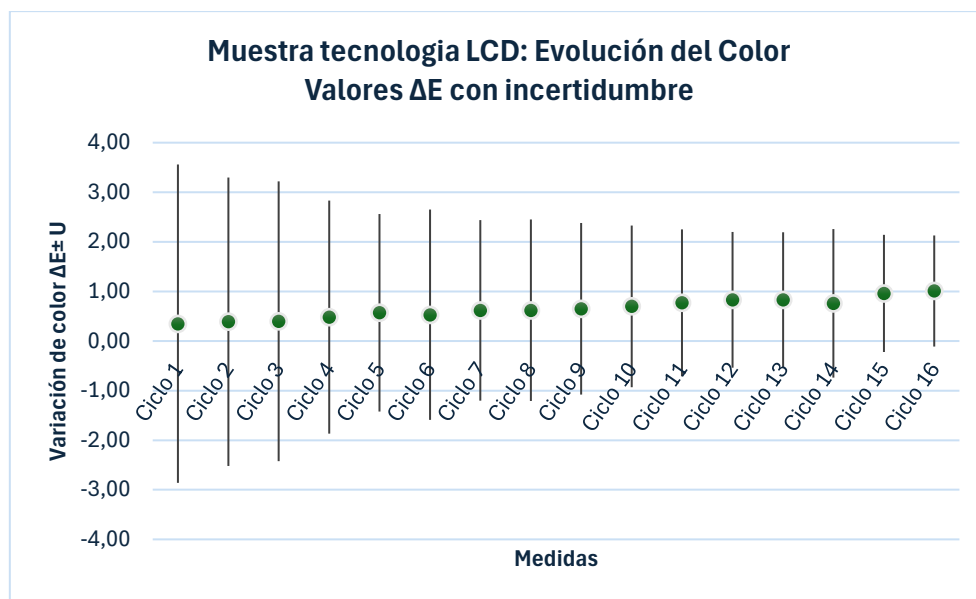


Ilustración 35. Medidas de ΔE de la evolución del color, tecnología LCD.

Conclusiones de la evolución del color:

Conclusiones de la muestra obtenida con la tecnología SLS:

- A la vista de la gráfica de las medidas individuales, se observa que L^* aumenta ligeramente con el envejecimiento, por la que la muestra tiende a aclararse un poco. Tanto a^* como b^* se mantienen prácticamente constantes, con lo que no aparecen cambios de color significativos.
- A partir del ciclo 14 se observa que L^* cambia la tendencia de subida y la vuelve a recuperar en el último ciclo.
- En los ciclos 12 y 13 principalmente, se observa mayor dispersión entre las medidas individuales. Esto podría ser debido a que, tras algunos de los ciclos se observaba que aparecían zonas más oscurecidas (como si la muestra absorbiera humedad), que iban aclarándose e igualando su color al del resto de la probeta con el paso del tiempo.
- Con respecto a 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.

Conclusiones en la muestra obtenida con la tecnología LCD:

- En las coordenadas de color que se obtienen en las medidas individuales se observa que no hay prácticamente cambio de las coordenadas de color a lo largo de los ciclos de envejecimiento.
- A la vista de la gráfica se observa que L^* se mantiene prácticamente constante, por lo que la muestra no se oscurece ni se aclara. a^* se mantiene prácticamente constante, con lo que la muestra no adquiere tono rojizo ni verdoso, y b^* aumenta ligeramente, pero es tan poco que no se llega a observar amarilleamiento.
- Con respecto a la variación de color total ΔE^* , se observa un ligero aumento progresivo con la exposición al envejecimiento. No obstante, el valor mayor obtenido de 1,01 es pequeño y supone una ligera percepción sensorial de cambio de color.

2.2.3.3 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.

Variación dimensional: Valores medios de COTA 1 Anchura

Tabla 15. Valores medios de Cota 1 Anchura.

Medidas	N° ciclos envejecimiento	U ($k=2$) en mm	Anchura media (mm)
1	Inicial	0,62	76,77
2	Ciclo 1	0,81	77,14

3	Ciclo 2	0,49	77,16
4	Ciclo 3	0,51	77,05
5	Ciclo 4	0,49	77,15
6	Ciclo 5	1,18	77,12
7	Ciclo 6	1,07	77,15
8	Ciclo 7	0,77	76,91
9	Ciclo 8	0,76	77,13
10	Ciclo 9	0,70	77,07
11	Ciclo 10	0,49	77,16
12	Ciclo 11	0,99	77,08
13	Ciclo 12	0,64	77,12
14	Ciclo 13	0,90	77,19
15	Ciclo 14	0,65	77,01
16	Ciclo 15	0,82	77,15
17	Ciclo 16	0,60	76,96

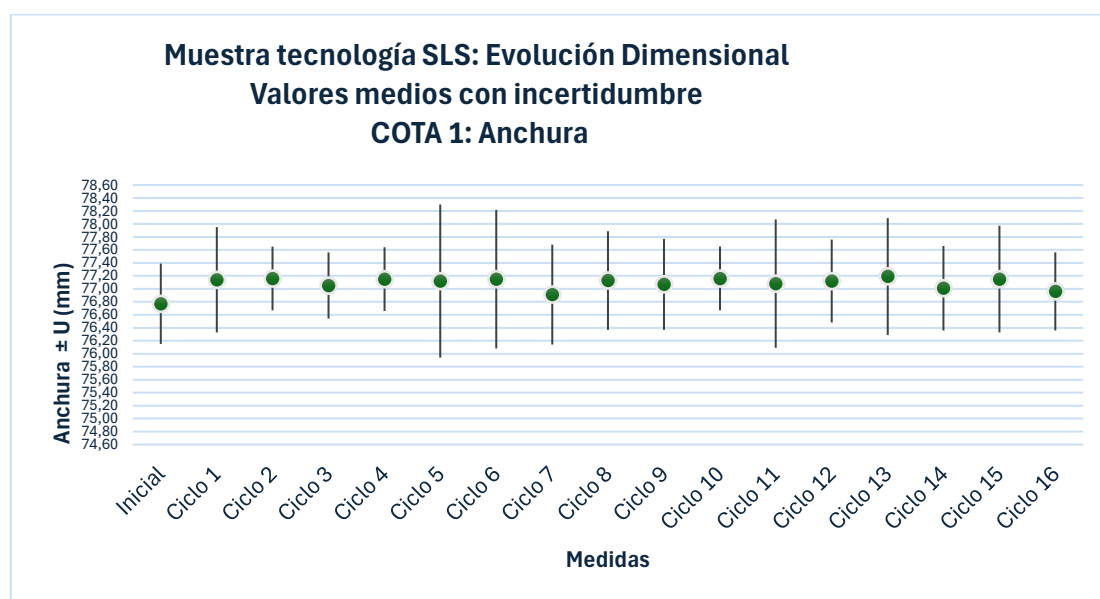


Ilustración 36. Evolución de anchura de la muestra en tecnología SLS.

Variación dimensional: Valores medios de COTA 2 Altura

Tabla 16. Valores medios de Cota 2 Altura.

Medidas	N° ciclos envejecimiento	U (k=2) en mm	Altura media (mm)
1	Inicial	0,19	119,67
2	Ciclo 1	0,07	120,05
3	Ciclo 2	0,23	119,99
4	Ciclo 3	0,27	120,04
5	Ciclo 4	0,10	120,15
6	Ciclo 5	0,17	120,10
7	Ciclo 6	0,30	120,07
8	Ciclo 7	0,18	119,96
9	Ciclo 8	0,24	120,06
10	Ciclo 9	0,28	119,99
11	Ciclo 10	0,06	119,92
12	Ciclo 11	0,06	120,12
13	Ciclo 12	0,19	120,02
14	Ciclo 13	0,22	120,07
15	Ciclo 14	0,11	120,10
16	Ciclo 15	0,27	120,03
17	Ciclo 16	0,38	119,74

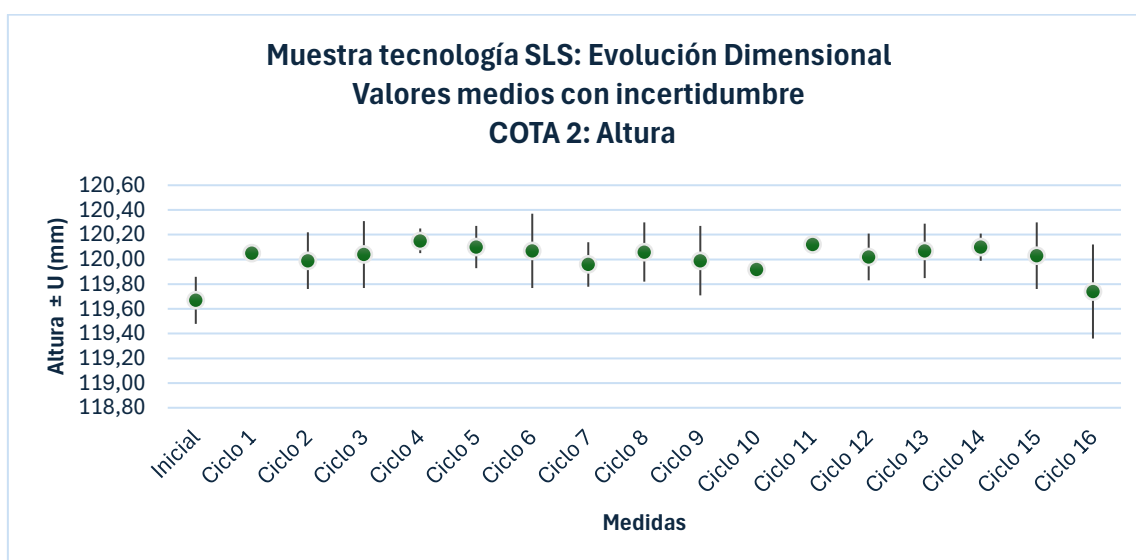


Ilustración 37. Evolución de altura de la muestra en tecnología SLS.

Variación dimensional: Valores medios de COTA 3 Espesor

Tabla 17. Valores medios de cota 3 Espesor

Medidas	N° ciclos envejecimiento	U (k=2) en mm	Espesor medio (mm)
1	Inicial	0,20	4,79
2	Ciclo 1	0,09	4,83
3	Ciclo 2	0,27	4,82
4	Ciclo 3	0,07	4,91
5	Ciclo 4	0,30	4,78
6	Ciclo 5	0,17	4,81
7	Ciclo 6	0,17	4,79
8	Ciclo 7	0,15	4,81
9	Ciclo 8	0,13	4,83
10	Ciclo 9	0,26	4,81
11	Ciclo 10	0,10	4,78
12	Ciclo 11	0,10	4,85
13	Ciclo 12	0,28	4,79
14	Ciclo 13	0,23	4,75
15	Ciclo 14	0,06	4,76
16	Ciclo 15	0,30	4,76
17	Ciclo 16	0,19	4,78

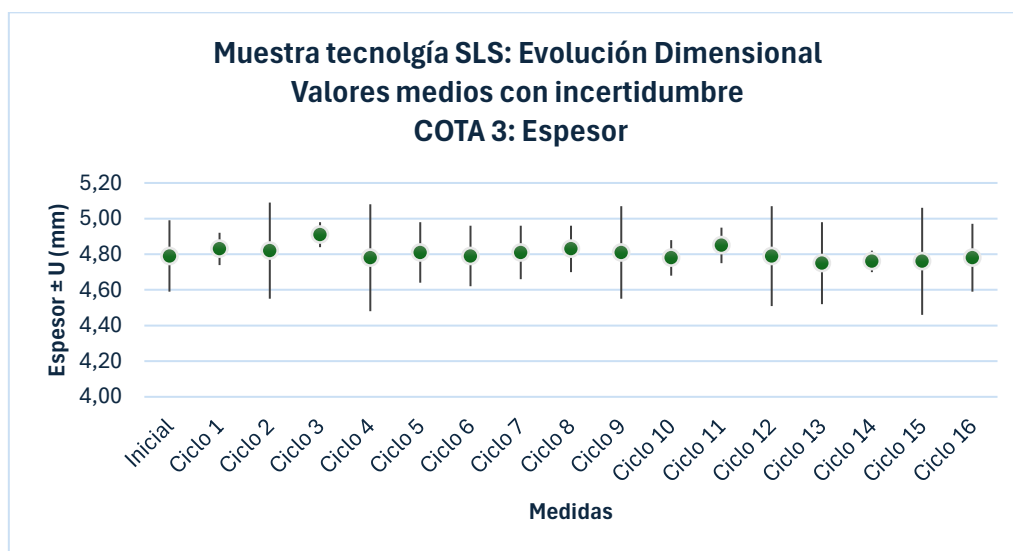


Ilustración 38. Evolución del espesor de la muestra en tecnología SLS.

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

Variación dimensional: Valores medios de COTA 1 Anchura

Tabla 18. Valores medios de Cota 1 Anchura, tecnología LCD.

Medidas	N° ciclos envejecimiento	U (k=2) en mm	Anchura media (mm)
1	Inicial	0,28	77,73
2	Ciclo 1	0,42	78,16
3	Ciclo 2	0,23	78,20
4	Ciclo 3	0,29	78,06
5	Ciclo 4	0,57	78,13
6	Ciclo 5	0,40	78,28
7	Ciclo 6	0,50	78,31
8	Ciclo 7	0,35	78,21
9	Ciclo 8	0,34	78,28
10	Ciclo 9	0,81	78,21
11	Ciclo 10	0,60	78,27
12	Ciclo 11	0,44	78,37
13	Ciclo 12	0,56	78,34
14	Ciclo 13	0,41	78,63
15	Ciclo 14	0,59	78,58
16	Ciclo 15	0,11	78,36
17	Ciclo 16	0,35	78,15

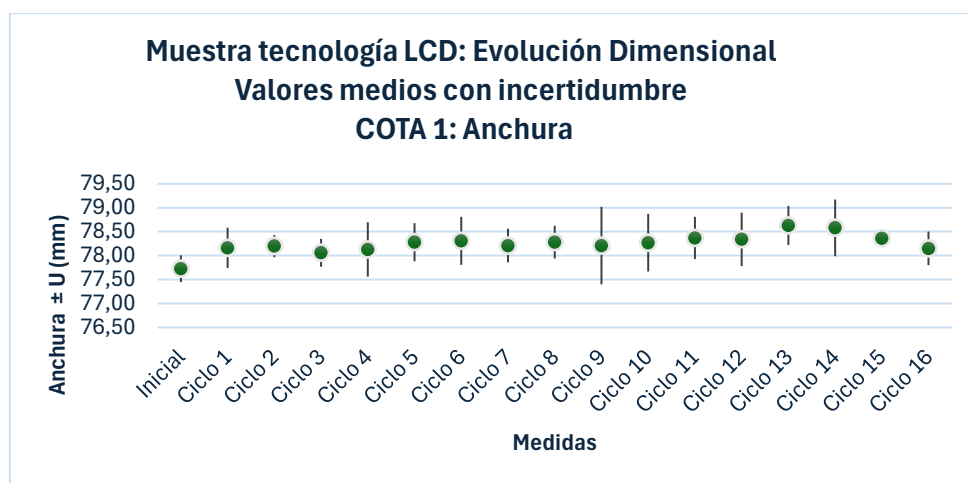


Ilustración 39. Evolución de anchura de la muestra en tecnología LCD.

Variación dimensional: Valores medios de COTA 2 Altura

Tabla 19. Valores medios de Cota 2 Altura, tecnología LCD.

Medidas	Nº ciclos envejecimiento	U (k=2) en mm	Altura media (mm)
1	Inicial	0,16	120,76
2	Ciclo 1	0,24	121,49
3	Ciclo 2	0,51	121,54
4	Ciclo 3	0,07	121,45
5	Ciclo 4	0,36	121,52
6	Ciclo 5	0,36	121,66
7	Ciclo 6	0,28	121,65
8	Ciclo 7	0,27	121,67
9	Ciclo 8	0,54	121,73
10	Ciclo 9	0,57	121,44
11	Ciclo 10	0,76	121,61
12	Ciclo 11	0,60	121,76
13	Ciclo 12	0,06	121,70
14	Ciclo 13	0,95	121,88
15	Ciclo 14	0,36	121,86
16	Ciclo 15	0,21	121,91
17	Ciclo 16	0,62	121,27

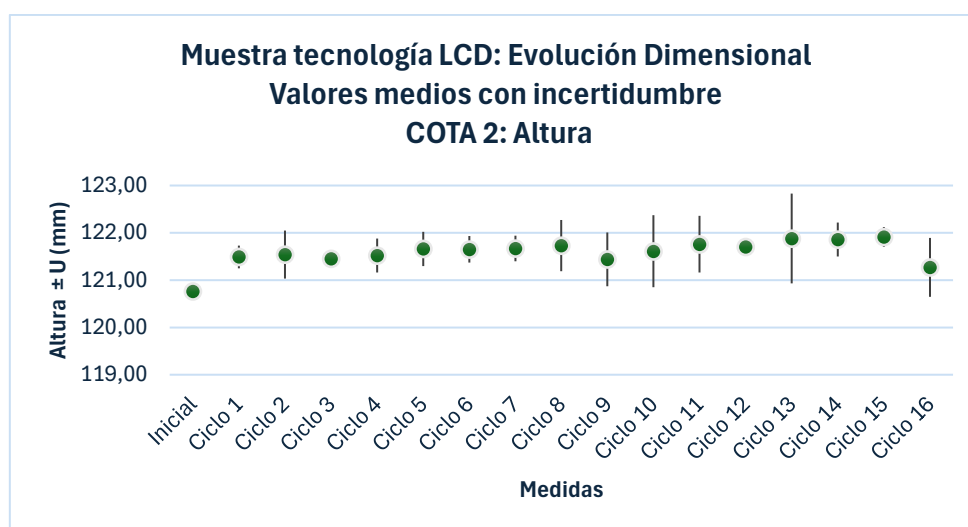


Ilustración 40. Evolución de altura de la muestra en tecnología LCD.

Variación dimensional: Valores medios de COTA 3 Espesor

Tabla 20. Valores medios de Cota 3 Espesor, muestras LCD.

Medidas	N° ciclos envejecimiento	U (k=2) en mm	Espesor medio (mm)
1	Inicial	0,02	4,10
2	Ciclo 1	0,01	4,10
3	Ciclo 2	0,07	4,11
4	Ciclo 3	0,03	4,11
5	Ciclo 4	0,02	4,10
6	Ciclo 5	0,05	4,10
7	Ciclo 6	0,04	4,10
8	Ciclo 7	0,10	4,11
9	Ciclo 8	0,04	4,10
10	Ciclo 9	0,04	4,10
11	Ciclo 10	0,02	4,10
12	Ciclo 11	0,02	4,11
13	Ciclo 12	0,02	4,09
14	Ciclo 13	0,03	4,12
15	Ciclo 14	0,02	4,12
16	Ciclo 15	0,06	4,11
17	Ciclo 16	0,04	4,10

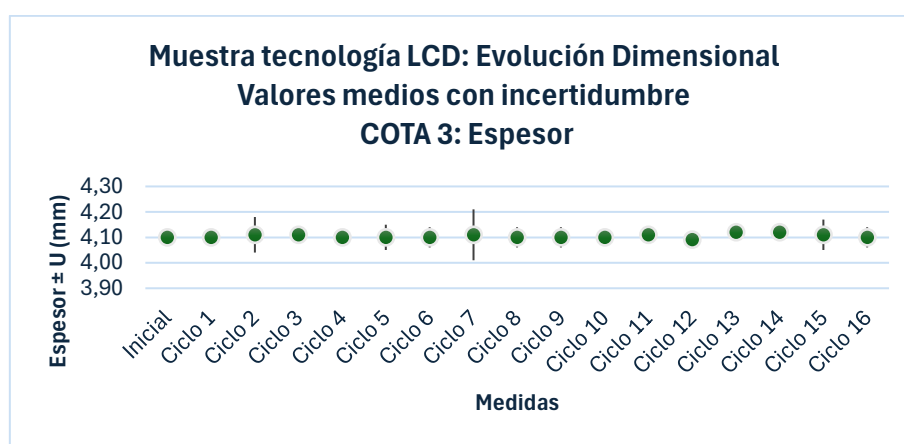


Ilustración 41. Evolución del espesor de la muestra en tecnología LCD.

Conclusiones de estabilidad dimensional:

Conclusiones Muestra tecnología SLS:

- En las dimensiones no se observa una tendencia a cambios significativa conforme se van sucediendo los ciclos de envejecimiento.

Conclusiones Muestra tecnología LCD:

- En las dimensiones de anchura y altura existe una ligera tendencia a aumentar conforme se van sucediendo los ciclos de envejecimiento, mientras que el espesor se mantiene prácticamente constante.

2.2.3.4 Determinación de propiedades mecánicas:**Muestras de la tecnología SLS:**

Las probetas de tracción se han ensayado según la norma UNE ISO 37¹⁰, 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 la tabla y figura 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.

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

¹⁰ UNE-ISO 37:2013: Elastómeros. Caucho, vulcanizados o termoplásticos. Determinación de las propiedades de esfuerzo-deformación en tracción.

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, ...). 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.

Tabla 21. Propiedades mecánicas determinadas en probetas fabricadas en Z, material Flexa Performance.

Condición	Resistencia Máxima		Máx. Deformación	
	(N/mm ²)	Desv. St.	%	Desv. St.
Fabricante				
Sinterit	7,99	-	182,63 ¹¹	-
Inicial	6,27	0,72	70,10	21,40
Ciclo 1	5,50	0,69	45,39	5,22
Ciclo 2	5,44	0,92	48,66	8,11
Ciclo 3	5,56	0,87	52,42	15,04
Ciclo 4	5,46	0,66	46,28	12,64
Ciclo 5	5,74	0,98	49,02	12,37
Ciclo 6	4,57	0,53	30,17	4,33
Ciclo 7	4,17	0,88	31,95	8,09
Ciclo 8	4,84	0,74	44,95	16,30
Ciclo 9	4,45	0,65	31,53	8,32
Ciclo 10	4,87	0,88	32,44	11,47
Ciclo 11	3,90	0,56	26,41	5,62
Ciclo 12	3,61	0,50	25,73	3,14
Ciclo 13	3,92	0,72	28,83	6,98
Ciclo 14	4,46	0,56	33,97	6,88
Ciclo 15	4,33	0,85	26,47	5,98
Ciclo 16	5,07	0,39	36,33	4,86

¹¹ <https://sinterit.com/materials/flexa-performance/>

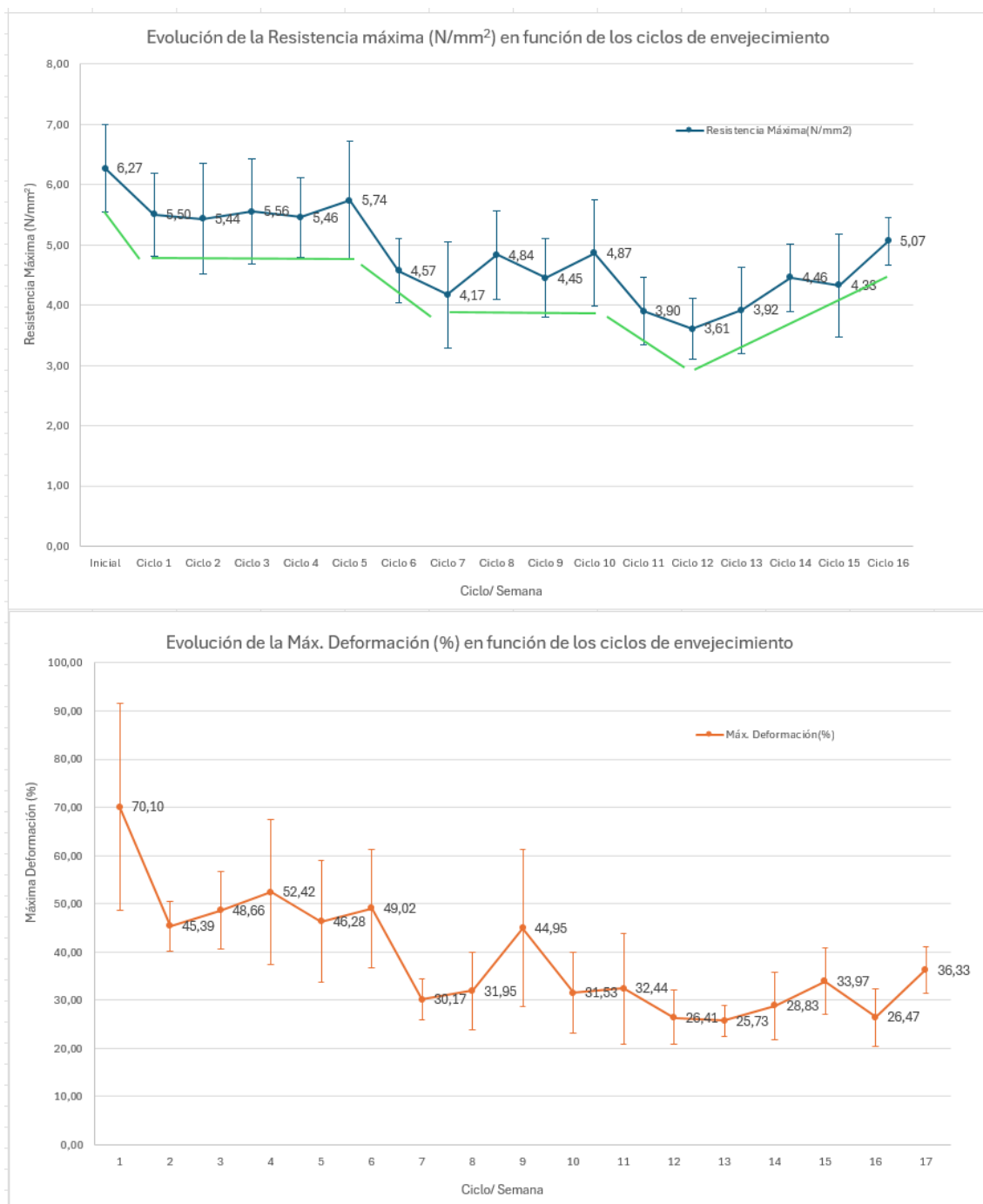


Ilustración 42. Propiedades mecánicas del material Flexa Performance tecnología SLS tras ciclos de envejecimiento

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 43, 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.

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. (Figura 43)

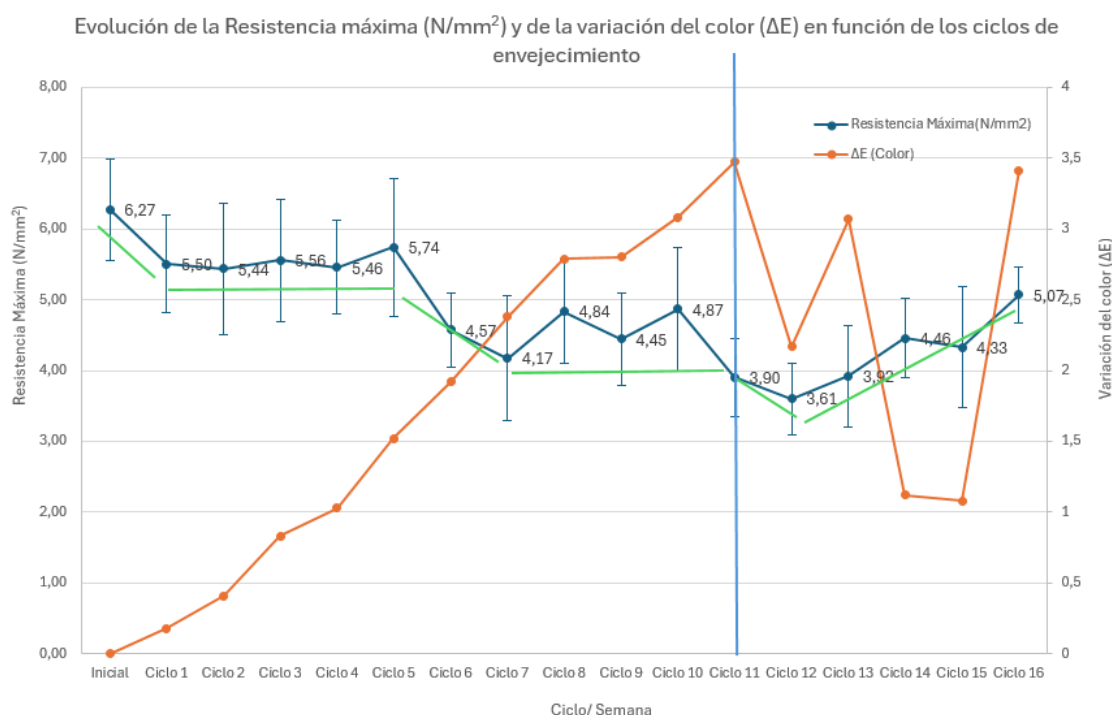


Ilustración 43. Relación entre la variación del color ΔE y la resistencia máxima

Muestras de la tecnología LCD:

Las probetas de tracción se han ensayado según la norma UNE ISO 527-2¹², norma para determinar propiedades mecánicas en polímeros rígidos y semirrígidos; los resultados se muestran en la tabla 22:

Tabla 22. Propiedades mecánicas determinadas en Z, resina DL110HB

Condición	Resistencia máxima		Máx. Deformación	
	(N/mm ²)	Desv. St.	%	Desv. St.
Fabricante				
Photocentric ¹³	60	-	14	-
Inicial	44,30	0,45	5,69	0,23
Ciclo 1	44,05	2,61	5,21	0,58
Ciclo 2	46,78	2,74	5,29	0,53
Ciclo 3	44,20	0,52	6,26	0,23
Ciclo 4	34,78	2,04	6,28	0,84
Ciclo 5	34,11	4,44	6,76	1,33
Ciclo 6	33,86	0,63	7,41	0,13
Ciclo 7	39,20	0,46	7,48	0,13
Ciclo 8	29,49	0,61	8,71	0,90
Ciclo 9	-	-	-	-
Ciclo 10	41,26	0,71	7,31	0,15
Ciclo 11	33,64	4,57	7,00	1,22
Ciclo 12	37,05	3,92	7,73	0,22
Ciclo 13	31,63	0,98	7,36	0,32
Ciclo 14	31,39	1,40	7,87	0,62
Ciclo 15	48,50	1,63	6,57	0,39
Ciclo 16	45,49	5,05	6,33	1,48

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.

Con respecto a la resistencia mecánica se observa que se mantiene constante en los

¹² UNE-ISO 527-2:2012: Plásticos. Determinación de las propiedades en tracción. Parte 2: Condiciones de ensayo de plásticos para moldeo y extrusión

¹³ <https://photocentricgroup.com/wp-content/uploads/2024/02/TDS-DL110H-2023-v3.pdf>

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, figura 44

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 propiedades 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 figura 45, 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.

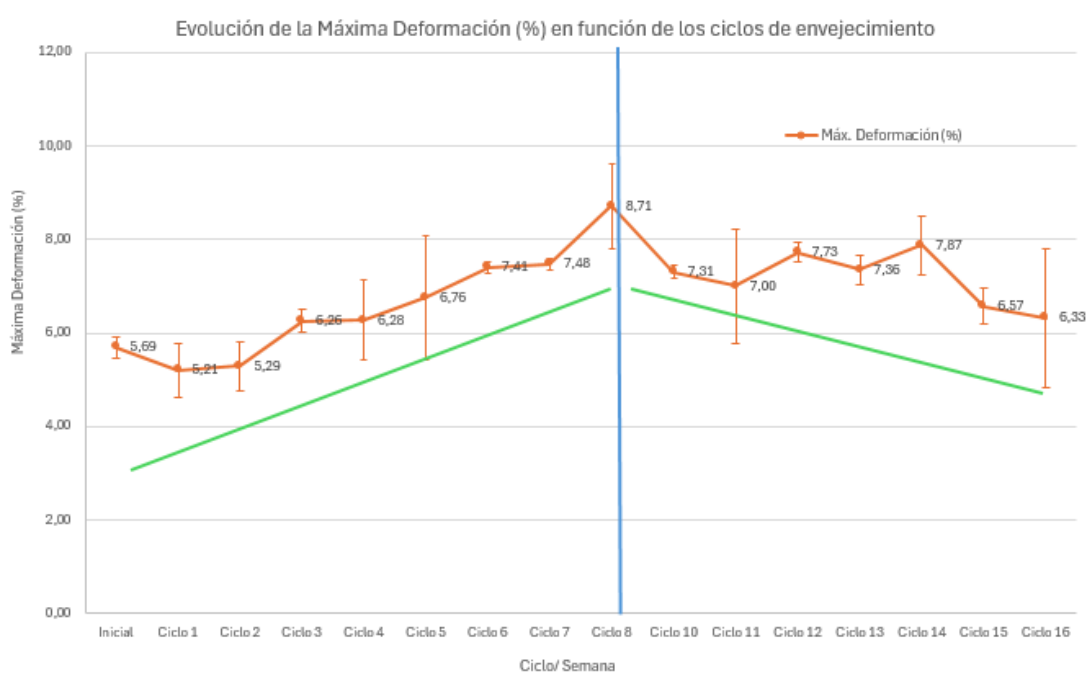
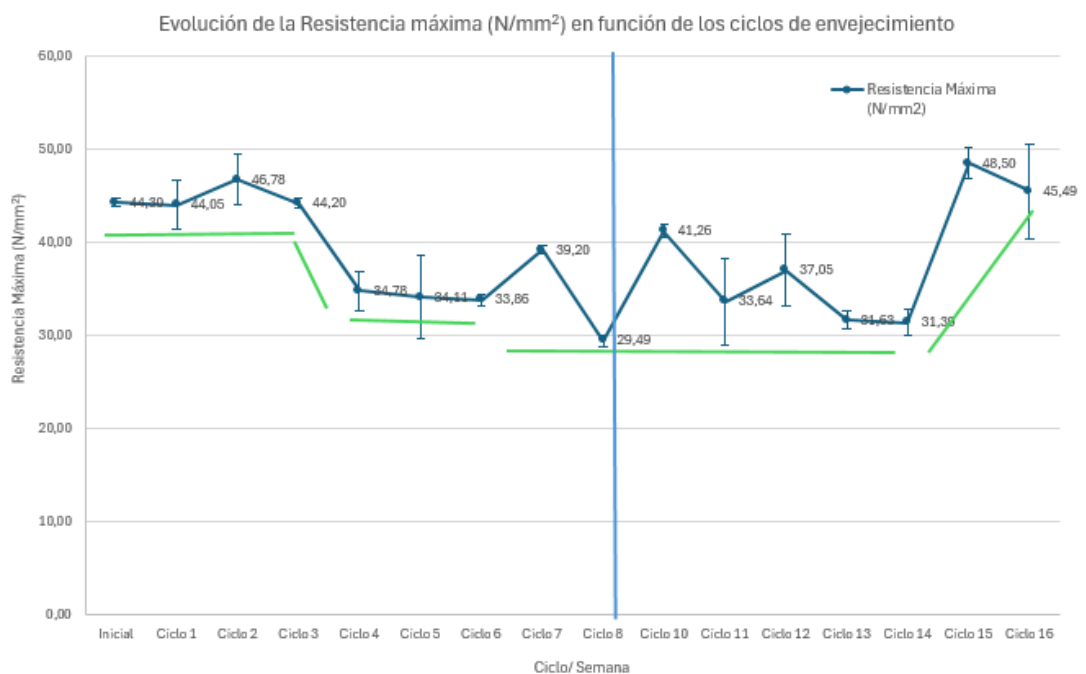


Ilustración 44. Propiedades mecánicas del material DL110HB tecnología LCD tras ciclos de envejecimiento

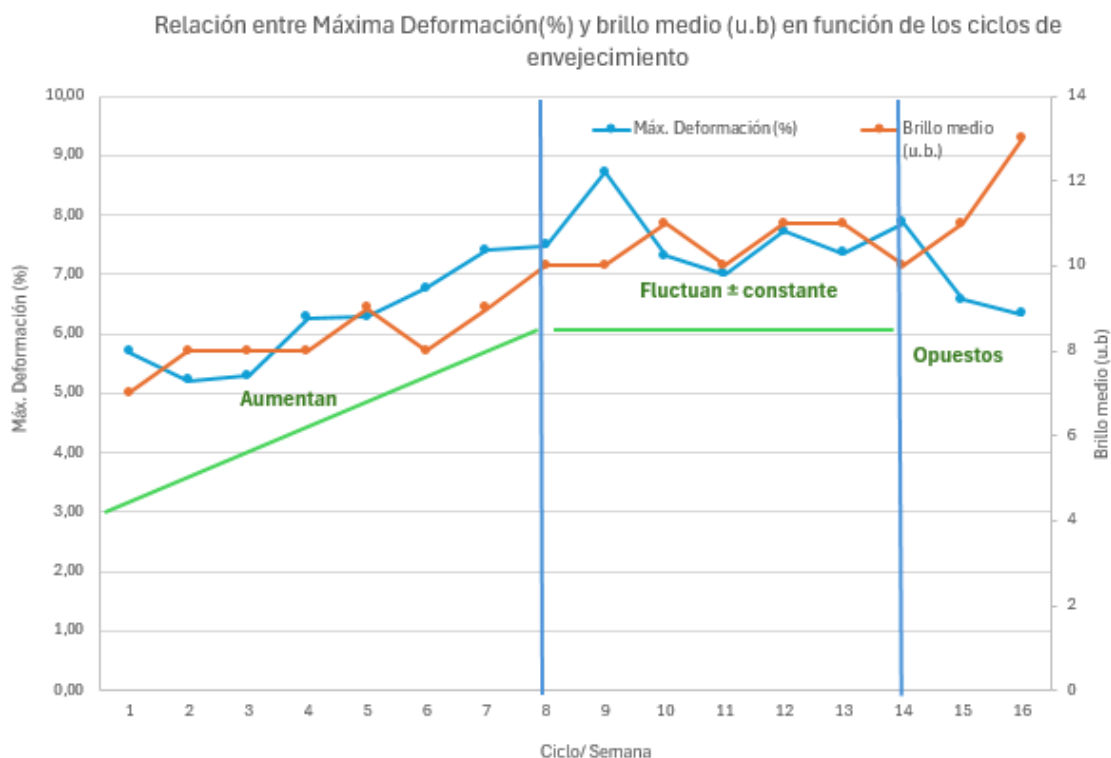


Ilustración 45.. Relación entre propiedades mecánicas y el brillo especular, muestras obtenidas por LCD.

Conclusiones de las propiedades mecánicas:

Conclusiones de la muestra obtenida con la tecnología SLS:

- 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 entra este valor dentro de la desviación estándar de la resistencia máxima inicial, es en el ciclo 5 donde se observa el valor de resistencia más bajo que podría ser asumible dentro de la propia desviación del material, lo cual dependiendo de la aplicación podría ser aceptable, por otro lado, 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. Luego se observa un aumento, pero podría atribuirse a un endurecimiento / fragilización del material.
- Se pudo obtener una relación entre la variación de color y la resistencia máxima; 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.

Conclusiones de la muestra obtenida con la tecnología LCD:

- Se puede concluir que este material a partir del 4to ciclo pierde un 21.43% de su resistencia máxima, lo cual podría ser un problema si se requiere que la pieza cumpla con esas propiedades mecánicas.
- Se observa una relación entre la máxima deformación y el brillo medio medido, hasta el ciclo 8 aumentan, luego fluctúan y llegan a tener un comportamiento opuesto a partir del ciclo 14.

2.3 Evaluación de los resultados obtenidos para su aplicación en casos industriales (T5.3)

El objetivo de este estudio era poder 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, como indicábamos en el apartado 2.2.

En la norma UNE-EN ISO 12944-6:2018¹⁴, 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:

- 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.

¹⁴ Norma UNE-EN ISO 12944-6:2018: Pinturas y barnices. Protección de estructuras de acero frente a la corrosión mediante sistemas de pintura protectores.

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 una 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.

3 Conclusiones

Conclusiones de la muestra obtenida con la tecnología SLS:

Se han fabricado probetas para ensayos de tracción, cuyo resultado al escanearlas ha sido que las probetas son más gruesas que la probeta de referencia, teniendo una desviación positiva de 0.3 mm en general en la zona calibrada de la probeta.

Con respecto a la evolución del brillo, el brillo obtenido se mantiene prácticamente constante a lo largo de todos los ciclos de envejecimiento. La muestra es totalmente mate, ya que su brillo es prácticamente cero.

Con respecto a 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.

Con respecto a la estabilidad dimensional, en las dimensiones no se observa una tendencia significativa a cambios, conforme se van sucediendo los ciclos de envejecimiento

A partir del ciclo 5 la resistencia máxima obtenida sale del rango de la desviación estándar inicial de la resistencia máxima del material, por lo que su resistencia no se considerara aceptable para algunas aplicaciones que no sean solo decorativas.

Se pudo obtener una relación entre la variación de color y la resistencia máxima; 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.

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.

Conclusiones de la muestra obtenida con la tecnología LCD:

Se han fabricado probetas para ensayos de tracción, cuyo resultado al escanearlas ha sido que las probetas están 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.

En las mediciones de brillo individuales se observa que existe una diferencia importante entre el brillo que se obtiene en una dirección de medida y la otra, planos XY y XZ. El brillo aumenta ligeramente a medida que aumenta la exposición al envejecimiento.

Con respecto a la variación de color total ΔE^* , se observa un ligero aumento progresivo con la exposición al envejecimiento. No obstante, el valor mayor obtenido de 1,01 es pequeño y supone una ligera percepción sensorial de cambio de color.

En las dimensiones de anchura y altura existe una ligera tendencia a aumentar conforme se van sucediendo los ciclos de envejecimiento, mientras que el espesor se mantiene prácticamente constante, pero no se considera importante.

Se puede concluir que este material a partir del 4to ciclo pierde un 21.43% de su resistencia máxima, lo cual podría ser un problema si se requiere que la pieza cumpla con esas propiedades mecánicas.

Se observa una relación entre la máxima deformación y el brillo medio medido, teniendo comportamiento opuesto a partir del ciclo 14.

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. Tras 10 ciclos el aumento de brillo observado es menor, con lo que en ambientes exteriores menos agresivos (C4) podría tener una mejor respuesta solo para usos decorativos.

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