

PROGRAMA ASTURIAS 2018-2020

RESULTADOS DEL PROYECTO:

Funcionalización de piezas fabricadas por impresión 3D: electrónica estructural personalizada (PAR3D)

REFERENCIA Nº: IDI/2018/000068

Entidad Beneficiaria:

Fundación IDONIAL (CIF G33914557)



ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN.....	3
2	OBJETIVOS.....	3
3	ACTIVIDADES DESARROLLADAS	4
3.1	HITO 1. DEFINICIÓN DE REQUISITOS, TECNOLOGÍAS Y MATERIALES.....	5
3.1.1	T1.1. ANÁLISIS DE REQUISITOS Y EVALUACIÓN DE TECNOLOGÍAS DE IMPRESIÓN ELECTRÓNICA 3D.....	5
3.1.2	T1.2. SELECCIÓN DE MATERIALES	18
3.1.3	T1.3. ESTUDIO DE COMPATIBILIDAD SUSTRATO-TINTA.....	27
3.1.4	T1.4 SELECCIÓN DE DEMOSTRADORES TECNOLÓGICOS.....	40
3.1.5	T1.5. ESTRATEGIAS DE DISEÑO	44
3.2	HITO 2. DESARROLLO DE PROCESOS PARA ELECTRÓNICA ESTRUCTURAL SUPERFICIAL .	47
3.2.1	T2.1 PLANIFICACIÓN DE EXPERIMENTOS Y DISEÑO DE PIEZAS.....	47
3.2.2	T2.2 INGENIERÍA DE FABRICACIÓN EN 5 EJES	53
3.2.3	T2.3 FABRICACIÓN DE PIEZAS Y UTILLAJES	57
3.2.4	T2.4 INVESTIGACIÓN DE PROCESOS DE DEPOSICIÓN INK-JET	60
3.2.5	T2.5 INVESTIGACIÓN DE PROCESOS DE DEPOSICIÓN AEROSOL-JETTING.....	93
3.2.6	T2.6 INVESTIGACIÓN DE PROCESOS DE INTEGRACIÓN DE COMPONENTES ELECTRÓNICOS	111
3.3	HITO 3. DESARROLLO DE PROCESOS PARA ELECTRÓNICA ESTRUCTURAL EMBEBIDA ..	118
3.3.1	T3.1 PLANIFICACIÓN DE EXPERIMENTOS.....	118
3.3.2	T3.2 DISEÑO Y FABRICACIÓN DE PIEZAS CON CANALES INTERNOS PRECONFORMADOS.....	120
3.3.3	T3.3 INVESTIGACIÓN DEL PROCESO DE INYECCIÓN DE PIEZAS CON CANALES PRECONFORMADOS.....	123
3.3.4	T3.4 INVESTIGACIÓN DE LA INTEGRACIÓN DE ELECTRÓNICA IMPRESA DURANTE LA FABRICACIÓN ADITIVA DE PIEZAS	132
3.4	HITO 4. DEMOSTRADORES TECNOLÓGICOS.....	136
3.4.1	T4.1 DISEÑO DE DETALLE DE LOS DEMOSTRADORES	136
3.4.2	T4.2 FABRICACIÓN DE DEMOSTRADORES.....	140
3.4.3	T4.3 VALIDACIÓN DE DEMOSTRADORES.....	142
3.5	CONCLUSIONES	149

1 INTRODUCCIÓN

En la era del Internet de las cosas (IoT) y la industria 4.0, así como de una sociedad tecnificada que busca la personalización y demanda la integración de los productos de uso diario, el auge de los productos inteligentes y conectados es una tendencia a nivel global.

Los productos inteligentes se caracterizan por su capacidad para aportar información al usuario, autogestionarse o conectarse con otros dispositivos. Estas funcionalidades surgen de la integración de las habituales características mecánicas (hardware) con componentes electrónicos, software embebido y conectividad. Por ello, para el desarrollo de nuevos productos inteligentes no sólo es clave la innovación en los componentes electrónicos, los protocolos de comunicación o el software que los componen, sino también la combinación de los mismos con el hardware dando lugar a dispositivos cada vez más pequeños y ligeros, así como a una mayor integración en objetos, vehículos o edificios inteligentes. En este sentido, la integración de la electrónica en la propia estructura (paredes/carcasa) del dispositivo abre un nuevo abanico de posibilidades. Así, surge la opción de que la electrónica forme parte de la propia arquitectura del objeto y de que los componentes/circuitos electrónicos actúen como estructuras protectoras o de soporte de carga reemplazando las tradicionales carrocerías y carcasas no funcionales. En la bibliografía este tipo de integración de tecnología en materiales se conocen como **electrónica estructural**.

El presente proyecto está orientado al desarrollo de soluciones de electrónica estructural que den respuesta a la creciente demanda por parte del tejido empresarial de dispositivos electrónicos cada vez más complejos e integrados en productos inteligentes. Para ello, se investigarán diferentes procesos de fabricación para la integración de circuitos y componentes electrónicos en estructuras tridimensionales. En concreto, el proyecto PAR3D busca la funcionalización de piezas producidas por fabricación aditiva mediante distintos métodos de deposición de tintas en 3D (electrónica impresa en 3D).

El proyecto PAR3D surge de la confluencia de dos líneas de investigación ya consolidadas en PRODINTEC: la electrónica impresa (empleada para la fabricación de dispositivos electrónicos sobre sustrato flexible mediante diferentes técnicas de deposición de tintas en 2D) y la fabricación aditiva. Gracias al desarrollo del proyecto PAR3D, el centro pretende adquirir el conocimiento necesario para dar el salto de la electrónica impresa en 2D a la electrónica impresa en 3D, a la vez que se consigue dar un valor añadido a los productos fabricados por impresión 3D a través de la funcionalización electrónica de los mismos.

2 OBJETIVOS

El objetivo general del proyecto PAR3D es el desarrollo de procesos de fabricación que permitan la funcionalización electrónica de piezas producidas mediante impresión 3D. Para ello, se investigará la combinación de tecnologías de deposición de tintas funcionales con tecnologías de impresión 3D.

Los **objetivos técnicos específicos** del proyecto son los siguientes:

- OT1. Seleccionar tecnologías y materiales para la deposición de pistas conductoras y/o componentes electrónicos en objetos fabricados por impresión 3D.
- OT2. Estudiar y determinar los post-tratamientos necesarios para garantizar el acabado superficial requerido en piezas de fabricación aditiva para la correcta adhesión de tintas funcionales de electrónica impresa.
- OT3. Definir reglas de diseño para la integración de pistas y/o componentes electrónicos en piezas producidas por fabricación aditiva.
- OT4. Desarrollar y optimizar procesos de electrónica impresa 3D para la funcionalización superficial de piezas de fabricación aditiva.
- OT5. Desarrollar y optimizar procesos de fabricación para la integración de electrónica embebida en piezas producidas por impresión 3D.
- OT6. Diseñar y fabricar al menos 2 demostradores funcionales de electrónica estructural que validen los nuevos procesos de fabricación.

3 ACTIVIDADES DESARROLLADAS

El presente proyecto de investigación, se ha estructurado según los hitos y tareas enumerados a continuación:

- HITO 1. DEFINICIÓN DE REQUISITOS, TECNOLOGÍAS Y MATERIALES.
 - T1.1. ANÁLISIS DE REQUISITOS Y EVALUACIÓN DE TECNOLOGÍAS DE IMPRESIÓN ELECTRÓNICA 3D.
 - T1.2. SELECCIÓN DE MATERIALES.
 - T1.3. ESTUDIO DE COMPATIBILIDAD SUSTRATO-TINTA.
 - T1.4 SELECCIÓN DE DEMOSTRADORES TECNOLÓGICOS.
 - T1.5. ESTRATEGIAS DE DISEÑO.
- HITO 2. DESARROLLO DE PROCESOS PARA ELECTRÓNICA ESTRUCTURAL SUPERFICIAL.
 - T2.1 PLANIFICACIÓN DE EXPERIMENTOS Y DISEÑO DE PIEZAS.
 - T2.2 INGENIERÍA DE FABRICACIÓN EN 5 EJES.
 - T2.3 FABRICACIÓN DE PIEZAS Y UTILLAJES.
 - T2.4 INVESTIGACIÓN DE PROCESOS DE DEPOSICIÓN INK-JET.
 - T2.5 INVESTIGACIÓN DE PROCESOS DE DEPOSICIÓN AEROSOL-JETTING.
 - T2.6 INVESTIGACIÓN DE PROCESOS DE INTEGRACIÓN DE COMPONENTES ELECTRÓNICOS.
- HITO 3. DESARROLLO DE PROCESOS PARA ELECTRÓNICA ESTRUCTURAL EMBEBIDA.
 - T3.1 PLANIFICACIÓN DE EXPERIMENTOS.
 - T3.2 DISEÑO Y FABRICACIÓN DE PIEZAS CON CANALES INTERNOS PRECONFORMADOS.
 - T3.3 INVESTIGACIÓN DEL PROCESO DE INYECCIÓN DE PIEZAS CON CANALES PRECONFORMADOS.

- T3.4 INVESTIGACIÓN DE LA INTEGRACIÓN DE ELECTRÓNICA IMPRESA DURANTE LA FABRICACIÓN ADITIVA DE PIEZAS.
- HITO 4. DEMOSTRADORES TECNOLÓGICOS.
 - T4.1 DISEÑO DE DETALLE DE LOS DEMOSTRADORES.
 - T4.2 FABRICACIÓN DE DEMOSTRADORES.
 - T4.3 VALIDACIÓN DE DEMOSTRADORES.
 - REQUISITOS Y EVALUACIÓN DE TECNOLOGÍAS DE IMPRESIÓN ELECTRÓNICA 3D.

A continuación, se describen los resultados más relevantes obtenidos durante la presente investigación, en cada uno de las tareas de los hitos enumerados previamente.

3.1 HITO 1. DEFINICIÓN DE REQUISITOS, TECNOLOGÍAS Y MATERIALES

3.1.1 T1.1. ANÁLISIS DE REQUISITOS Y EVALUACIÓN DE TECNOLOGÍAS DE IMPRESIÓN ELECTRÓNICA 3D

Los resultados de la presente tarea se han dividido en tres apartados bien diferenciados. En primer lugar, se estudiaron los requisitos tecnológicos a tener en cuenta durante el desarrollo del proyecto para garantizar que los nuevos procesos satisfagan las demandas tecnológicas de las aplicaciones de electrónica estructural. El segundo apartado, estrechamente relacionado con el primero, define las pruebas y ensayos definidos para corroborar que los nuevos desarrollos cumplen con los requisitos técnicos marcados. Por último, los puntos anteriores convergen en la selección del equipamiento óptimo para el desempeño de las tareas planteadas, mediante un análisis exhaustivo de las tecnologías actualmente presentes en el mercado.

3.1.1.1 Definición de requisitos tecnológicos

De manera general, las características de los productos de electrónica impresa están condicionadas fundamentalmente por:

- a) la naturaleza de la tinta funcional empleada.
- b) la naturaleza del sustrato.
- c) los procesos de impresión empleados para la deposición de la tinta.

A continuación, se describe el análisis llevado a cabo sobre cada uno de estos factores, previo al comienzo de las tareas experimentales del proyecto, teniendo en cuenta las especiales peculiaridades derivadas de los sustratos objeto de estudio en PAR3D (piezas tridimensionales fabricadas por impresión 3D).

Requisitos asociados a la naturaleza de las tintas funcionales y los sustratos

En general, todas las tintas funcionales están compuestas por un material activo (pigmento, partícula conductora, etc.) y un “vehículo” para transportar el material activo, que suele estar

compuesto por una mezcla de resinas, disolventes y aditivos. Aunque a lo largo del presente documento se empleará el término “tinta funcional”, cabe señalar que, dado que lo que se buscan son aplicaciones electrónicas, las tintas a utilizar serán básicamente tintas cuyo material activo son partículas conductoras que, en función del patrón de impresión y en combinación con otros componentes electrónicos pueden dar lugar a funcionalidades diversas.

De manera general, con electrónica impresa pueden conseguirse los siguientes tipos de funcionalidades: sensores, actuadores y elementos de comunicación. El desarrollo de cada una de estas funcionalidades requiere la impresión de tintas con diferente comportamiento eléctrico. Así, en el caso de los sensores y a diferencia de los actuadores y los elementos de comunicación, no es necesario que las pistas conductoras transmitan potencia, tan sólo señal. A su vez, la electrónica de comunicación requiere corriente de menor valor nominal que el accionamiento de elementos externos. Por ello, con la finalidad de abarcar el mayor número posible de aplicaciones en el proyecto PAR3D se decidió estudiar tres tipos de tintas funcionales:

- Tintas conductoras. Se trata de tintas con buena conductividad eléctrica (resistividad menor de $100 \text{ m}\Omega/\text{sq}$), que permiten transmitir señal y potencia sustituyendo el comportamiento de los cables de cobre en la electrónica convencional.
- Tintas resistivas. Se denominan tintas resistivas a aquellas tintas que, aun siendo conductoras, presentan valores de resistividad superiores a $50 \text{ }\Omega/\text{sq}$, y pueden ser utilizadas, por ejemplo, para imprimir resistencias eléctricas o transmitir señal en algunas aplicaciones sensóricas.
- Tintas dieléctricas, que no presentan ningún tipo de conductividad, pero son empleadas en electrónica impresa para aislar componentes o como recubrimiento en sustratos conductores previo a la impresión de pistas conductoras.

Además de la naturaleza conductora/resistiva/dieléctrica de las tintas, para cumplir con las especificaciones de cualquier aplicación de electrónica estructural es necesario asegurar una buena interacción con el sustrato. Dicha interacción está condicionada por los siguientes factores:

- Energía superficial. La energía superficial es el grado de atracción o repulsión que ejerce la superficie de un material frente a otro. Cuanto mayor es la fuerza de atracción entre los materiales, mayor es la adhesión. Del mismo modo, la adhesión se favorece cuanto menor sea la tensión superficial de la tinta. En definitiva, cuando el sustrato dispone de una alta energía superficial, es decir, que tiene capacidad para atraer, y la tinta dispone de una baja tensión superficial, o lo que es lo mismo, poca resistencia a deformarse o romperse, es cuando se produce un correcto mojado de la tinta sobre el sustrato.

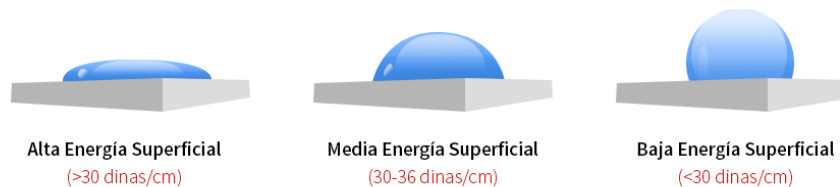


Figura 1. Variación de la interacción sustrato tinta en función de la energía superficial

- Porosidad. La porosidad del material afecta negativamente al proceso de impresión, ya que la tinta penetra más fácilmente en el material dando lugar a peores resoluciones.
- Rugosidad, definida como las variaciones micrométricas en la superficie de las piezas manufacturadas que le confieren cierto grado de aspereza. Dichas irregularidades pueden producir discontinuidades en las pistas impresas dando lugar a problemas de conductividad.

Todas estas propiedades superficiales dependen no sólo de la propia naturaleza del material, sino también del proceso de fabricación del sustrato. En este sentido, a diferencia de los sustratos habitualmente empleados en electrónica impresa 2D (obtenidos por laminación) en los que la rugosidad superficial es prácticamente despreciable (por ejemplo, en el film de poliéster Dupont Mylar PET los valores de rugosidad media, Ra, rondan los 38 nm), las piezas obtenidas mediante fabricación aditiva presentan rugosidades superficiales del orden de las décimas de micra. A su vez, los rangos de rugosidad dependen de la tecnología de impresión 3D utilizada. Así, por ejemplo, la rugosidad media en los procesos SLS se encuentra en el rango Ra 10-15 μm , mientras que con las tecnologías DMS y PolyJet suelen obtenerse acabados algo menos rugosos (8-12 μm). Además, algunas de las tecnologías de fabricación aditiva, como es el caso de la tecnología SLS, conducen a materiales con capas superficiales especialmente porosas.

Por ello, uno de los requisitos principales para la impresión de tintas funcionales sobre sustratos de fabricación aditiva es el tratamiento superficial del sustrato previo a la deposición de la tinta. En concreto en el proyecto PAR3D se optó por evaluar el tratamiento de plasma para mejorar la energía superficial y distintos procesos mecánicos para reducir la rugosidad superficial, todos ellos compatibles con la naturaleza tridimensional del sustrato.

Procesos de deposición de las tintas

La naturaleza tridimensional de los sustratos objeto de estudio en el proyecto limita los métodos de impresión a utilizar a aquellos que no requieran contacto entre el cabezal de impresión y la pieza. Se han analizado dos tecnologías de deposición bien diferenciadas: ink-jet y aerosol jet. Estas constituyen las alternativas actuales más versátiles y que mayor compatibilidad ofrecen con las tintas funcionales comerciales disponibles en el mercado. A continuación, se describen brevemente los requisitos de proceso asociados a cada una de ellas:

- El sistema de impresión mediante ink-jet se basa en la eyección controlada de gotitas de tinta sobre el sustrato para obtener el diseño deseado. Este sistema de impresión se ha desarrollado en los años 50 y desde entonces ha sufrido un gran desarrollo, siendo cada vez más popular. Inicialmente su desarrollo estaba orientado a la industria gráfica, pero actualmente se ha convertido en un método utilizado en la fabricación digital de dispositivos electrónicos y mecánicos ya que se puede utilizar para dispensar fluidos, tintas conductoras, estaño líquido, resinas para fabricación aditiva... En función de la configuración se pueden eyectar desde tintas con muy baja viscosidad hasta pastas, siendo un rango muy utilizado una viscosidad cercana a 14 mPas. También es necesario tener en cuenta el tamaño de partícula de las tintas, ya que un tamaño demasiado grande podría taponar los inyectores dejando el cabezal inservible. Por esta razón los sistemas ink-jet industriales cuentan con una zona de filtrado para las tintas en la que las partículas de más de 5µm quedan atrapadas (en ocasiones se filtra la tinta a 0.45µm por esta misma razón). Dentro de la tecnología ink-jet, las impresoras pueden clasificarse, en función del sistema de eyección de tinta, en ink-jet térmicas e ink-jet piezoeléctricas.
- El sistema de aerosol jet es una tecnología de impresión sin contacto para líneas finas desarrollado para su uso en electrónica impresa, pudiendo llegar a imprimir líneas de menos de 20µm de espesor. Es una técnica relativamente nueva que permite el uso de numerosos tipos de tintas ya que permite un rango elevado de viscosidades aceptadas (1 – 1000mPas) siempre que se pueda formar un aerosol para la impresión. Por esto es una tecnología de impresión muy utilizada para la validación de tintas en desarrollo.

El proceso de impresión por aerosol jet consta de un proceso de cuatro pasos: 1) atomización de la tinta, 2) densificación del aerosol generado, 3) focalización del chorro de aerosol, 4) deposición de las gotitas de tinta sobre el sustrato. En primer lugar, se forma un aerosol a partir de una tinta o dispersión mediante un atomizador neumático. Como gas portador puede utilizarse nitrógeno o aire comprimido seco y es necesario tener en cuenta el tamaño de partícula de la tinta para evitar la obstrucción de la boquilla atomizadora. Es necesario aumentar la densidad de la tinta atomizada ya que la tinta atomizada está muy diluida, por lo que en el impactor virtual se elimina parte del gas aumentando la concentración de tinta atomizada. El tamaño de gota que sale de la boquilla de impresión tiene normalmente un diámetro menor de 5µm y la focalización del aerosol tiene lugar en el cabezal de impresión. En el canal central se inyecta el flujo de aerosol, mientras que en el canal exterior concéntrico se inyecta otro gas cuyo flujo guía y orienta el aerosol, que sufre una fuerte aceleración debido a la reducción de sección y es eyectado del cabezal de impresión, que puede tener una abertura menor de 50µm. Gracias al flujo de gas guía se evita también que las partículas de tinta tengan un contacto directo con el cabezal, evitando que se contamine y deteriore por la propia tinta. Es muy importante que ambos flujos tengan comportamiento laminar para evitar defectos en la impresión por una mala focalización y arrastre de las partículas de tinta. El sustrato se coloca a una distancia de entre 2mm y 5mm de la boquilla normalmente para una correcta impresión.

Por tanto, a modo de conclusión, podemos decir que el método de impresión condiciona tanto la naturaleza de la tinta que se puede procesar como la resolución de la pista impresa. En este sentido, las principales diferencias entre las tecnologías de impresión a estudiar en el proyecto es que las tintas procesables mediante ink-jet son más viscosas que las de aerosol y la precisión/resolución de la impresión es menor para aerosol que para ink-jet. Ambas tecnologías son, por tanto, perfectamente complementarias y contar con ambos sistemas es la solución más adecuada para garantizar que se puede procesar una gran variedad de tintas y obtener un espectro muy amplio de aplicaciones de electrónica estructural.

3.1.1.2 Definición de pruebas de caracterización

Como se ha mencionado, una vez estudiados los requisitos tecnológicos asociados a las tintas, los sustratos y los procesos de deposición, se han definido los experimentos necesarios para valorar tanto las propiedades funcionales de la pista impresa (que atienden a las propiedades intrínsecas de la tinta y la morfología de la pista impresa) como la adhesión sustrato-tinta:

- **Medida de resistencia eléctrica.** Como se ha comentado anteriormente, existen tintas conductivas y resistivas. En ambos casos, la funcionalidad puede cuantificarse a través de la medida de la resistencia eléctrica que presentan. Esto se lleva a cabo con un multímetro, que, con sus dos sondas posicionadas en puntos distantes de una pista conductora, permite obtener el valor de resistencia eléctrica entre ambos.

De este modo, se podrá obtener información valiosa sobre varios parámetros:

- Qué rango de valores de resistencia distinguen a las pistas resistivas y conductivas.
 - Qué variabilidad se tiene para una misma tinta en función de la geometría de la deposición.
 - Qué variabilidad que se tiene para una misma tinta en función del sustrato de deposición.
- **Medida de adhesión sustrato/tinta.** Una prueba muy utilizada para comprobar la adhesión de las tintas sobre el sustrato es la prueba de la cinta adhesiva (ASTM International, 2003). Esta prueba consiste en fijar sobre las pistas impresas un trozo de cinta adhesiva ejerciendo cierta presión sobre ella y asegurando que está correctamente fijada sin ninguna arruga. En función del material puede ser necesario realizar un rayado sobre la superficie o no, siendo la metodología similar en ambos casos. Una vez fijada la cinta, debe despegarse tirando a una velocidad uniforme con un ángulo de 180º hasta despegar completamente la cinta de la zona a estudiar. Si las pistas impresas se levantan del sustrato, ya sea total o parcialmente, se considera que la adhesión no es adecuada y puede ser necesario el uso de otra tinta o la realización de un tratamiento superficial sobre el sustrato.

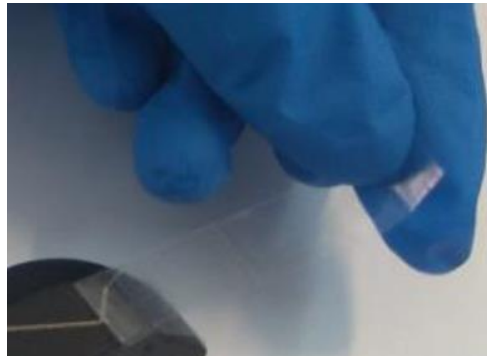


Figura 2. Medida de adhesión con cinta adhesiva.

- **Caracterización morfológica de la deposición.** Existen dos propósitos principales tras esta caracterización. La primera es detectar posibles fallos durante la deposición, siendo el más típico la pista cortada (ver imagen inferior). En segundo lugar, se trata de verificar que la forma de las pistas se mantiene estable durante su deposición. La distorsión puede venir dada por múltiples factores, algunos reveladores de deficiencias en el proceso y otros de la afinidad sustrato-tinta. Por ejemplo, si el sustrato es muy poroso puede ser que la tinta se absorba, distorsionando el patrón impreso. Estos son efectos que se delatan tras una inspección visual aumentada de la pista depositada. En función del grado de detalle que se quiera alcanzar, se pueden recurrir a sistemas de inspección visual de varios aumentos: lupas, microscopía, etc.



Figura 3. Ejemplo de pista conductora con defecto de deposición.

Otra aproximación a esta validación morfológica es el análisis mediante microscopía confocal. Esta tecnología sirve para, mediante técnicas ópticas, captar mediciones muy precisas en rangos dimensionales muy pequeños. Es especialmente adecuada para escanear relieves, texturas o patrones geométricos, con la contraprestación de tener su rango dimensional muy limitado al plano focal en el que el dispositivo esté actuando. Esta tecnología resulta especialmente útil para detectar el relieve de la pista depositada. Así, se puede captar su espesor, topología superficial, etc. aspectos que también contribuyen a caracterizar la calidad de la deposición de tinta sobre el sustrato.

3.1.1.3 Selección de equipamiento

Para la impresión de tintas conductoras sobre piezas tridimensionales se han desarrollado diferentes sistemas a nivel comercial. Muchos de estos sistemas son simplemente un robot cartesiano o polar unido a un sistema de impresión, lo que permite un posicionado y movimientos con los que se trazarían las pistas. Los sistemas de impresión utilizados normalmente están desarrollados para su uso en dirección vertical ya que, si se gira el cabezal se puede perder precisión de dispensado y puede entrar aire en el sistema, con lo que se perdería la purga e incluso podría solidificarse la tinta en el interior del cabezal con el consiguiente deterioro que esto acarrearía.

Los primeros sistemas de impresión sobre piezas tridimensionales tenían la limitación de que, al no poder girar el cabezal, era necesario trazar las pistas impresas sobre la cara superior de las piezas pudiendo realizar movimientos en los ejes X, Y, Z. En la actualidad existen equipos de impresión sobre piezas tridimensionales dotados de cinco ejes de movimiento, con lo que pueden girar la pieza y así pueden trazar pistas en caras de la pieza que anteriormente no era posible. Esto es una gran ventaja ya que, exceptuando la superficie de sujeción, puede imprimirse en prácticamente toda la superficie de la pieza si su geometría lo permite.

En el marco de esta tarea se ha hecho una búsqueda localizada y análisis de las principales opciones disponibles en el mercado. Estas se recogen a continuación:

OPTOMECH

OPTOMECH es una gran empresa enfocada en la fabricación aditiva y en la impresión sobre piezas 3D. Además, también ha desarrollado procesos de fabricación como el LENS® y está involucrada en numerosos proyectos de I+D. Tiene patentado el sistema de *aerosol jet printing* para productos electrónicos impresos, que permite un amplio espectro de materiales funcionales, desde tintas conductoras a materiales biológicos.

Optomech dispone de 5 equipos de impresión diferentes:

- Aerosol Jet 200. Es un sistema de impresión de sobremesa desarrollado para la impresión de tintas conductoras, aunque también puede utilizar otras tintas («New benchtop version of Optomech aerosol jet system», 2014). Dispone de 3 ejes de movimiento, X, Y, Z, y puede imprimir diseños con un tamaño desde 10µm a varios milímetros, trayendo de serie un cabezal de impresión por aerosol jet, atomizador ultrasónico y placa de fijación por vacío calefactada de 175mm x200m. Tiene una repetitividad en posicionado de ±5µm y una velocidad máxima de impresión de 100 mm/seg.
- Aerosol Jet 300. Es un sistema de impresión mediante aerosol jet printing para I+D y fabricación de pequeñas series de piezas o prototipos. Es similar al Aerosol Jet 200 pero con mayor velocidad (200mm/seg), atomizador neumático y una mesa de impresión con unas dimensiones de 300mm x 300mm ampliable a 370mm x 470mm. Cuenta también con

control de temperatura hasta 120°C, una precisión de posicionado de $\pm 5\mu\text{m}$ y una repetibilidad de $\pm 2\mu\text{m}$. Este equipo tiene unas dimensiones de 1020mm x 1375mm x 2240mm y un peso de 795kg.

- Aerosol Jet 5X. Tiene la particularidad de disponer de cinco ejes de movimiento, lo que hace que sea ideal para aplicaciones de electrónica impresa 3D. Con este equipo se pueden realizar impresiones sobre piezas tridimensionales con gran calidad utilizando su módulo de impresión Optomec Sprint. Dispone de atomizador neumático y por ultrasonidos y permite el uso de más de un cabezal de impresión de forma simultánea. El volumen de trabajo que permite el Aerosol Jet 5X es de 200mm x 300mm x 200mm y tiene una precisión de posicionado de $\pm 10\mu\text{m}$ y repetibilidad de $\pm 2\mu\text{m}$ en los ejes X, Y, Z. Las dimensiones de este equipo son 1020mm x 1375mm x 2240mm y tiene un peso de 835kg.
- Aerosol Jet HD. El equipo Aerosol Jet HD permite un dispensado digital de tintas en línea con lo que hace posible el escalado de la fabricación a líneas de fabricación. Utiliza el método de impresión aerosol jet que permite imprimir líneas de 20 μm , 50 μm y 100 μm en función de la configuración seleccionada. Se puede complementar con módulos de curado UV o laser.
- Aerosol Jet Print Engine. El sistema Aerosol Jet Print Engine no es un equipo de impresión completo. Es un sistema de impresión que permite el control de hasta cuatro cabezales y puede implantarse en equipos de fabricación industriales. Los cuatro cabezales pueden utilizarse simultáneamente o independientemente, permitiendo dispensar diferentes fluidos utilizándolos de forma independiente.



Figura 4. Gama de equipos de OPTOMECH; de izquierda a derecha y de arriba a abajo: Aerosol Jet 200, 300, 5X, HD y Print Engine

NEOTECH AMT

Neotech AMT GmbH es una de las empresas líderes en el desarrollo de sistemas para electrónica impresa 3D. La compañía comenzó a desarrollar esta tecnología en 2006 e instaló el primer sistema de electrónica impresa 3D de 5 ejes en el mundo. Este sistema combina elementos de software y hardware en equipos capaces de producir circuitos complejos sobre casi cualquier superficie 3D. Colabora activamente con OPTOMECH e incluso desarrolla nuevas aplicaciones conjuntamente con ellos. Disponen de dos equipos de impresión sobre piezas tridimensionales (PJ 15X y AJ 45X). A continuación, se repasan las características operativas más relevantes de cada uno de ellos:

- El equipo PJ 15X es un sistema de prototipado que combina diferentes tecnologías de impresión como piezo jet y aerosol jet (opcionalmente) y cuenta además con un sistema de posicionado de cinco ejes con lo que permite imprimir sobre piezas tridimensionales con formas complejas. Está orientado a aplicaciones de I+D y prototipado y permite imprimir con numerosos materiales, en función de su reología.

Este pequeño equipo de sobremesa con unas dimensiones de 769mm x 834mm x 1370mm y un peso de 350kg dispone opcionalmente de diferentes cabezales intercambiables. Estos cabezales permiten ampliar el rango de uso de esta máquina utilizando diferentes métodos de impresión, sinterizado laser, curado UV de tintas, mecanizado, pick & place 3D e incluso de impresión 3D mediante FDM. La velocidad de impresión máxima es de 100mm/seg, tiene un rango de movimiento en los ejes X, Y, Z de 400mm x 300mm x 140mm respectivamente, con una repetibilidad de $\pm 10\mu\text{m}$.

- Por su parte, el equipo NEOTECH AJ 45X es un equipo que permite producción en masa de circuitos impresos sobre piezas tridimensionales. Está pensado para producción continua 24/7, dispone de cuatro cabezales de impresión por aerosol jet printing y cinco ejes de movimiento simultáneo con lo que se puede imprimir con diferentes materiales de forma simultánea o el mismo material sobre cuatro piezas a la vez. Esta máquina dispone de motores lineales y encoders que garantizan una precisión de $\pm 5\mu\text{m}$ incluso a velocidades elevadas de proceso de hasta 1000mm/seg y una repetibilidad de $\pm 2\mu\text{m}$ en los ejes X, Y, Z. El volumen de trabajo es de 600mm x 500mm x 250mm, tiene unas dimensiones exteriores de 1400 mm x 1055mm x 2165mm y un peso de 1250kg.

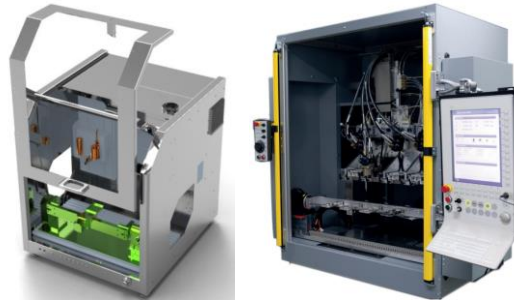


Figura 5. Gama de equipos de Neotech: PJ15x y Neotech 45X

nSrypt

nSrypt es una empresa de fabricación de sistemas de impresión 3D y de micro dispensado que, en colaboración con Novacentrix, han desarrollado equipos de impresión y curado de tintas sobre piezas tridimensionales. Novacentrix es una empresa centrada en el desarrollo de sistemas de sinterizado fotónico para tintas, por lo que de esta colaboración han surgido varios equipos que permiten imprimir y sinterizar tintas conductoras.

Estos equipos son muy similares entre sí, ofreciendo diferentes tamaños, volúmenes de trabajo y velocidades en función de las aplicaciones que se deseen realizar. Además, el cabezal de impresión puede sustituirse por un cabezal de fabricación aditiva FDM, un cabezal de mecanizado, un cabezal de dispensado para pastas de alta viscosidad y un sistema pick & place, lo que permite aumentar la funcionalidad de estos equipos. Sin embargo, ninguno de estos equipos dispone de 5 ejes de movimiento, lo que limita la geometría de las piezas sobre las que se puede imprimir.

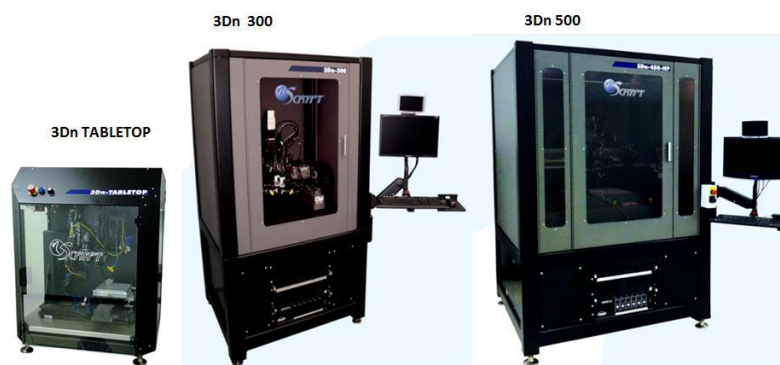


Figura 6. Gama de equipos del fabricante nSrypt

Voxel8

Voxel8 es una impresora 3D FDM que permite integrar en el interior de las piezas pistas conductoras durante su fabricación. Para ello se detiene la fabricación de la pieza por FDM en una capa intermedia, y sobre esa capa se dispensa automáticamente una pasta conductora de plata trazando el diseño prefijado, permitiendo a continuación continuar con la impresión mediante FDM de la

pieza. El extrusor FDM es estándar para filamento de 1,75mm de PLA y la boquilla de dispensado de pasta conductora tiene un nozzle de 250 μ m.



Figura 7. Voxel 8

El volumen de trabajo de esta máquina es de 150mm x 150mm x 100mm, con una resolución de 200 μ m por capa impresa mediante FDM y un ancho de impresión con pasta de plata de 250 μ m.

LPKF

Aunque no es un proceso de impresión al uso, la empresa LPKF ha desarrollado tres máquinas para generar pistas conductoras sobre la superficie de piezas tridimensionales (U.S. Patent 5,593,739. Jan. 14, 1997).



Figura 8. Piezas con pistas conductoras mediante tecnología LPKF

El método a seguir para la obtención de piezas con pistas conductoras dista mucho de un proceso de impresión (Angel, Tsang, Bedair, Smith, & Lazarus, 2018). En primer lugar, se recubre la pieza en su totalidad con una pintura especial que puede aplicarse mediante sprayado o con pistola. Es recomendable dar varias capas hasta obtener una cobertura uniforme y realizar un secado en horno a posteriori para garantizar que la pintura esté totalmente seca antes del siguiente proceso.

Una vez seca la pieza se introduce en el equipo de estructuración láser y sobre la capa de pintura con la que se ha cubierto la pieza se realizan las pistas con el diseño que se haya programado. Esta pintura al activarse con el paso del láser permite que en la siguiente etapa se adhieran a ella partículas de cobre. Para recubrir estas pistas de cobre y obtener conductividad eléctrica se someten a un proceso de metalizado electrolítico mediante el cual se adhieren partículas de cobre

y se obtienen las pistas conductoras en la superficie de la pieza (Chtioui, Bossuyt, Vanfleteren, & Bedoui, 2018).

Existen tres equipos que pueden realizar este proceso:



Figura 9. Equipos LPKF para activación por láser

Pulse Electronics

La empresa Pulse Electronics comercializa el equipo “FluidAnt” como alternativa a los sistemas LDS, tales como los integrados por LPKF. Se trata de un sistema de deposición directa de tintas, publicitado por la propia compañía como una alternativa más versátil en cuanto a materiales admitidos como sustratos.

Entre las características operativas más relevantes, encontramos: espesor mínimo de pista 0,4 mm con tolerancia de +/- 0,1 mm; tolerancia dentro del patrón impreso de +/-0,1 mm; espesor de pista depositada de entre 0,03 y 0,04 mm con tolerancia de +/-0,01 mm, siendo posible imprimir hasta las 80 micras; mínimo espaciado entre pistas colindantes de 0,4 mm.

En la siguiente tabla se muestran los equipos actualmente disponibles y sus características operativas más relevantes. Las diferencias constructivas más relevantes giran en torno al número de ejes coordinados de movimiento y sus grados de libertad:

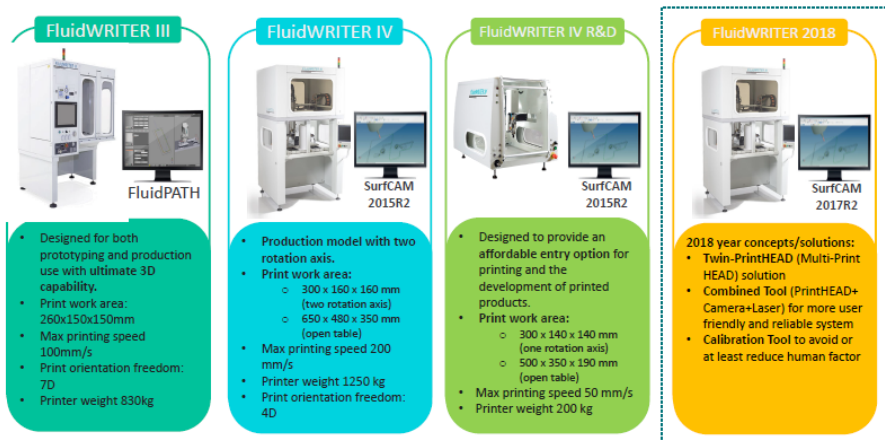


Figura 10. Rango de equipos de la empresa PULSE ELECTRONICS y sus características operativas

3.1.1.4 Conclusiones.

El estudio de proveedores anteriormente realizado tiene como objetivo último la adquisición de un equipo para integrar a las capacidades internas del centro. De entre los mismos, se considera que son cuatro los que están un compromiso aceptable entre madurez de la tecnología, estabilidad de la empresa y cumplimiento de los requisitos tecnológicos establecidos. Estos son OPTOMECH, NEOTECH, PULSE ELECTRONICS y NSCRYPT. Por el contrario, las alternativas de LPKF y VOXEL 8 se descartan por presentar muy poca versatilidad en cuanto a proceso/materiales y no tener su implementación comercial del todo clara (respectivamente cada una de ellas).

Es a estos primero cuatro proveedores a los que se introduce en el proceso de petición de ofertas para valoración presupuestaria. Una vez recibidas las mismas destaca el equipo NEOTECH PJ 15X por ser un equipo con unas características muy interesantes y un precio que, en comparación con equipos de mayores dimensiones, es bastante adecuado.

Un requisito muy importante para la selección de este equipo es que cuenta con un sistema de movimiento de cinco ejes, con lo que permite imprimir sobre geometrías con mayor complejidad que los equipos con tres ejes de movimiento.

El segundo requisito es la flexibilidad de la máquina, ya que va a utilizarse para proyectos de investigación y cuanto mayor sea el número de funcionalidades más desarrollos se podrán realizar. Por ello se ha valorado que permita el uso de diferentes cabezales de impresión y las posibilidades de ampliación. En esto el equipo de OPTOMECH presenta el inconveniente de que solamente permite su uso con el sistema de impresión aerosol jet printing que ellos mismos han desarrollado, quedando el uso de tintas limitado a las compatibles con este sistema. Por el contrario, los equipos de NEOTECH permiten su uso con diferentes cabezales piezo jet para tintas de diferentes viscosidades, con el sistema de impresión aerosol jet printing e incluso disponen de un cabezal de impresión FDM, sistemas de curado de tintas UV y LBS, cabezales de dispensado de pastas, cámara de alta velocidad para control de eyección e incluso un sistema Pick & Place 3D que está todavía en

desarrollo. Por todo esto se decide que el equipo más idóneo para su adquisición es el NEOTECH PJ 15X.

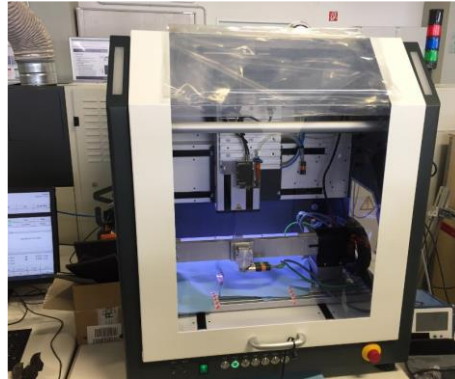


Figura 11. Equipo NEOTECH PJ15X, fotografía tomada por personal de IDONIAL durante la visita a las instalaciones del fabricante

3.1.2 T1.2. SELECCIÓN DE MATERIALES

Dentro de esta tarea se llevó a cabo la selección de los materiales a utilizar en el proyecto (sustratos, tintas funcionales, componentes electrónicos y adhesivos). Para abordar dicha selección se siguieron los siguientes pasos:

- 1) Definición de criterios de selección, teniendo en cuenta los requisitos establecidos en la tarea 1.1 y aspectos de compatibilidad entre los distintos materiales (especialmente del par sustrato-tinta).
- 2) Análisis exhaustivo de la bibliografía y del catálogo de materiales comerciales existentes.

A continuación, se describen los criterios de selección definidos y la búsqueda realizada para cada uno de los materiales objeto de estudio.

3.1.2.1 Selección de tintas

Para la selección de las tintas funcionales se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones:

- Reología. Tal y como se ha definido en la tarea 1.1, para que las tintas sean aptas para los procesos de impresión a estudiar en el proyecto (ink-jet y aerosol jet), deben de cumplir con las siguientes propiedades reológicas:

	Tamaño de partícula	Viscosidad
Ink-jet	Nano – micropartículas	50-200.000 mPas
Aerosol	Nanopartículas	0-20 mPas

- Conductividad eléctrica. Todos los dispositivos electrónicos requieren múltiples elementos interconectados. Por ello, se decidió que la mayor parte de los esfuerzos del proyecto se centrasen en el desarrollo de procesos de impresión de pistas conductoras. No obstante, tal y como se ha definido en la tarea 1.1., para abarcar la mayor variedad posible de aplicaciones, dentro del proyecto también se estudian tintas resistivas (útiles por ejemplo para la impresión de elementos calefactores o resistencias) y tintas dieléctricas, necesarias como recubrimiento previo a la funcionalización de los sustratos metálicos o para la impresión de circuitos complejos en los que las pistas han de cruzarse, actuando la capa dieléctrica como aislante en los puntos de cruce.
- Condiciones de curado o sinterizado. La deposición de tintas funcionales requiere en general de un paso posterior de curado o sinterizado para lograr alcanzar sus propiedades activas. Por ello, uno de los factores clave a la hora de seleccionar una tinta funcional es que su proceso de curado sea compatible con el sustrato sobre el que se deposita. Existen diversas técnicas de curado o sinterizado, basadas en el aporte de energía en distintas formas:
 - *Curado ultravioleta*, que presenta numerosas ventajas como su bajo coste y fácil integración en líneas de procesado en continuo *roll-to-roll*. Como desventaja, está el hecho de que las tintas de curado ultravioleta requieren la presencia de monómeros, aglutinantes, fotoiniciadores y otros aditivos que reducen significativamente la conductividad de las pistas hasta valores en torno a los $260 \mu\Omega\cdot\text{cm}$ (unas 160 veces el valor de la plata sólida).
 - *Curado térmico*. Una alternativa al curado ultravioleta es el curado térmico, a través del cual se pueden mejorar significativamente los valores de resistividad de las pistas impresas, hasta en un orden de magnitud, alcanzando los $25 \mu\Omega\cdot\text{cm}$. Sin embargo, muchos sustratos poliméricos no pueden soportar las altas temperaturas requeridas para el sinterizado de tintas conductoras.
 - *Curado fotónico*. La tecnología de curado fotónico se basa en aplicar pulsos de luz de alta intensidad y baja duración de modo que se logran alcanzar temperaturas elevadas de forma local en las pistas impresas sin elevar la temperatura del sustrato. Existen varias tecnologías disponibles hoy en día para llevar a cabo el curado fotónico, que permiten optimizar la frecuencia en intensidad de los pulsos de luz para lograr un sinterizado óptimo y maximizar así la conductividad a obtener con las tintas conductoras impresas.

El curado fotónico se descartó por la complejidad de focalizar el haz luminoso sobre la superficie tridimensional de los sustratos objeto de estudio, ya que en este tipo de proceso la uniformidad del curado es directamente dependiente de la distancia entre la fuente luminosa y el sustrato. En el caso de las tintas conductoras se optó por el curado térmico para minimizar la resistividad de las pistas resultantes. Sin embargo, se seleccionaron tintas resistivas aptas tanto para curado térmico como ultravioleta.

- Coste. El coste es un factor clave a la hora de elegir una tinta funcional, ya que la mayoría de ellas tienen precios bastante elevados (entre 1000 - 1500 €/kg para tintas de mayor viscosidad y 1000 – 2500 €/100g en el caso de tintas para aerosol jet) y caducidades reducidas (una vez abiertas las tintas suelen tener una vida útil inferior a 6 meses). Además, muchos proveedores son extranjeros, lo que encarece significativamente el producto debido a los costes de transporte y aduanas. No obstante, a la hora de seleccionar los materiales es importante tener una visión global y no centrarse sólo en el precio. Por ejemplo, un material puede ser más caro que otro, pero debido a que tienen una conductividad más baja requiere emplear más cantidad de tinta, con lo que el cose se equilibra.

Una vez establecidos los criterios anteriormente mencionados, se procedió al análisis de los materiales comerciales existentes y a la selección de aquellos que serán objeto de estudio en el proyecto PAR3D:

- En cuanto a las tintas conductoras, de acuerdo a los requisitos electrónicos definidos en la tarea 1.1, la selección se limitó a aquellos materiales capaces de proporcionar resistividades inferiores a 50 Ω /sq. Dentro de las tintas comerciales, tan sólo las basadas en partículas metálicas (las más habituales son oro, plata o cobre) cumplen con dicho requisito. Entre ellas, la selección de materiales se centró en tintas de nanopartículas de plata de curado térmico. Las tintas base oro son las que ofrecen mejores conductividades, pero son muy caras (aproximadamente 90 €/g). Sin embargo, la conductividad de las tintas de plata, que son más baratas, también es suficiente para las aplicaciones objeto de estudio. El cobre es la opción más económica, pero se oxida rápidamente y, además, la mayoría de las tintas de cobre requieren curado fotónico o a muy alta temperatura. Cabe señalar que también se comercializan tintas conductoras basadas copos o nanofibras de plata, pero su reología no es compatible con las tecnologías de impresión *ink-jet* o aerosol *jet*. Asimismo, en la bibliografía existen referencias relativas a tintas basadas en precursores orgánicos de plata, pero este tipo de tintas no se encontraron a nivel comercial.
- Por otra parte, se llevó a cabo la selección de tintas resistivas, entendiendo como tal aquellas tintas que, aun no siendo dieléctricas, ofrecen un cierto grado de resistividad alejado de la elevada conductividad de las tintas metálicas. Aunque se han encontrado algunas tintas resistivas basadas en polímeros conductores como el PEDOT:PSS para serigrafía, la mayoría de las tintas resistivas comerciales para impresión *ink-jet* o aerosol son tintas de carbono o grafito.
- Finalmente, a diferencia de las tintas conductoras, en el mercado se encontró una amplia variedad de tintas dieléctricas basadas en distintos tipos de resinas, por ejemplo, epoxi, acrilato y uretano. En este caso, el principal criterio de selección ha sido la reología adecuada para su dispensado mediante *ink-jet* y aerosol *jet* y, a su vez, las condiciones de curado, priorizando curados ultravioleta o a baja temperatura para favorecer la compatibilidad con los sustratos.

Las principales propiedades de las tintas seleccionadas se resumen en la *Tabla 1*.

Tabla 1. Tintas funcionales seleccionadas

Material/Referencia	Tipo de tinta	Proceso de impresión	Propiedades
Dycotec DM-SIP-3100S	Conductora	Ink-Jet	Tinta de base solvente que contiene nanopartículas de Ag (contenido en sólidos 56-62%). Presenta una viscosidad entre 2 – 4 Pas @20°C y una tensión superficial 27 - 31 dynes/cm. Se recomienda un sinterizado de 20 minutos en el rango de temperaturas 130-1400°C y tiene una resistividad eléctrica menor de 15 uΩ.cm.
Henkel Wik 20487	Conductora	Ink-Jet	Tinta conductora base solvente de alta conductividad con partículas de plata y un contenido en sólidos del 75%, libre de halógenos, con buena flexibilidad y adecuada para aplicaciones de dispensado. Se recomienda un curado de 10 minutos a 140°C. Tienen una viscosidad de 26 Pa.s.
Clariant Prelects TPS	Conductora	Nano-Jet	Tinta conductora de base agua y alta conductividad. Cuenta con alta estabilidad sin que se produzca la sedimentación de las nanopartículas de plata que contiene.
Gwent Carbon C2030519P4	Resistiva	Ink-Jet	Pasta conductora de carbón con un contenido en sólidos de entre el 39% y 43% presentando una resistividad menor de 75ohms/sq para un espesor de 25µm.
Novacentrix JR-700 Carbon Ink	Resistiva	Nano-Jet	Tinta resistiva con contenido en carbón con un tamaño de partícula de entre 127nm y 132nm, con una viscosidad de entre 3.6cp y 8.3cp en el rango 19.7°C- 20.7°C.
J+S UV Supraflex 390119	Dieléctrica	Ink-Jet	Tinta dieléctrica de curado UV y buena resistencia química y a la fricción y una viscosidad dinámica de 200 - 5000 mPa * s
UTDots Inc. Nano-silica epoxy ink	Dieléctrica	Nano-Jet	Tinta dieléctrica que contiene nanopartículas de sílice dispersas en una matriz epoxi y diluidas en solvente (contenido en sólidos 20-60%). Presenta una viscosidad entre 1-10 cP y una constante dieléctrica de 2.6. Se

<i>Material/Referencia</i>	<i>Tipo de tinta</i>	<i>Proceso de impresión</i>	<i>Propiedades</i>
			recomienda un sinterizado de 20 minutos a 120°C.

3.1.2.2 Selección de sustratos

La selección de los sustratos sobre los que se imprime la tinta es tan importante como la elección de la tinta a aplicar. Sin embargo, aunque en los últimos años el número de materiales procesables mediante fabricación aditiva han aumentado considerablemente, la elección de los sustratos en el proyecto ha estado muy condicionada por los materiales compatibles con las tecnologías de fabricación aditiva disponibles en el centro que, a su vez, fueron escogidas tratando de abarcar el mayor abanico posible en cuanto a la naturaleza de los sustratos. Así, empleando las siguientes tecnologías para la fabricación de los sustratos, dentro del proyecto se da cabida tanto a sustratos plásticos como metálicos y cerámicos:

- *Selective laser sintering (SLS)*. En el proceso SLM, en primer lugar, un rodillo aplica una capa de polvo. A continuación, el láser sinteriza el polvo siguiendo los datos del archivo 3D y, por último, la plataforma desciende para aplicar una nueva capa de polvo. El proceso se repite hasta terminar el objeto. Las tecnologías de impresión 3D por sinterizado láser (SLS) trabajan con diversos materiales que aportan diferentes acabados, principalmente compuestos de polvo de poliamida.
- *Direct Metal Laser Deposition (DMLS)*. Con un principio de funcionamiento similar al SLM, el proceso DMLS crea piezas de forma aditiva sinterizando finas partículas de polvo metálico. A diferencia del proceso SLM, el DMLS solo sinteriza el material, sin fundirlo por completo. La tecnología DMLS permite imprimir en 3D diversos tipos de aleaciones metálicas: acero inoxidable, Titanio TiAl64V, cromo-cobalto, Aleación Inconel 718, Hastelloy X.
- *Lithography based Ceramic Manufacturing (LCM)*. Esta tecnología se basa en el curado capa a capa con luz LED de una suspensión de material cerámico en un fotopolímero. Una vez finalizado el proceso, las piezas resultantes se limpian para eliminar el material no curado y luego se someten a un tratamiento térmico para eliminar las sustancias poliméricas y sinterizar la cerámica. Las suspensiones cerámicas disponibles en el mercado están basadas en alúmina de alta pureza (Al_2O_3), zirconia (ZrO_2) estabilizada con ytria y una resina bioreabsorbible (tricalciofosfato).
- *Poly-jet*. Todos los materiales de impresión Polyjet 3D son fotopolímeros, que es una clase distinta de los termoplásticos o elastómeros que se utilizan en otras tecnologías, pero parecidos a éstos visual, térmica y mecánicamente. Las propiedades de los materiales van

desde elástico a rígido, transparente a opaco, neutro a colores vivos y estándar a biocompatible.

- Fused Deposition Modelling (FDM). El FDM es una tecnología basada en filamentos en la que un cabezal controlado mediante temperatura extruye de forma precisa un material termoplástico capa a capa sobre una plataforma de construcción. Alguno de los materiales disponibles para FDM son ABS (acrilonitrilo butadiene estireno), ultem o nylon.

La selección de materiales sustrato (*Tabla 2*) se llevó a cabo entre los materiales comercialmente disponibles para cada una de estas tecnologías de fabricación aditiva teniendo en cuenta las siguientes consideraciones basadas en las propiedades físicas de los materiales:

- Porosidad. La porosidad del material afecta negativamente al proceso de impresión, ya que la tinta penetra más fácilmente en el material dando lugar a peores resoluciones.
- Estabilidad térmica, que debe ser lo suficientemente alta como para que los procesos de curado de las tintas no afecten al sustrato.
- Estabilidad estructural. La mayoría de las aplicaciones de electrónica estructural requieren sustratos duros y robustos. Por ello, se ha priorizado la selección de sustratos rígidos.
- Color, transparencia y otros factores estéticos que condicionan el aspecto de las aplicaciones finales. En este sentido se ha intentado que los materiales seleccionados cubran el mayor abanico posible de posibilidades.

Así, dentro de los materiales plásticos se escogió la poliamida 12,12. La poliamida (conocida comúnmente como nylon) está entre los termoplásticos técnicos más importantes y útiles debido a su excelente resistencia al desgaste, magníficas características de baja fricción, elevada tenacidad y muy buenas propiedades de resistencia a la temperatura y a los impactos. Además, la poliamida nylon tiene muy buena resistencia química, y es un material biocompatible y food-safe bajo ciertas condiciones. Este excelente equilibrio de propiedades hace del polímero poliamida un material ideal para fabricar prototipos funcionales y como sustituto del metal en ciertas aplicaciones. Las propiedades de la poliamida varían con la estructura molecular del polímero nylon y también con el método de conformado. Precisamente para evaluar dichas diferencias, dentro del proyecto, se estudiaron tanto sustratos de nylon producidos por SLS como por FDM.

Asimismo, dentro de los materiales plásticos, también se seleccionó como sustrato el alumide, resultante de la fusión de partículas de poliamida con partículas de polvo de aluminio. Este material procesable mediante SLS se escogió porque la unión de poliamida y aluminio da un acabado único, de aspecto metálico, y una dureza mayor que la de cualquier otro material procesable por SLS. Por ello, el alumide es un material ideal para aplicaciones donde el sustrato necesite rigidez y aspecto metálico. Además, es un material resistente al agua. Sin embargo, la superficie de las piezas SLS de alumide son especialmente porosas, rugosas y ligeramente áspero, lo que constituye un reto especial a la hora de ser utilizado como sustrato para la impresión de tintas funcionales.

Dentro de los materiales PolyJet, se descartaron aquellos que conducen a sustratos flexibles. Posteriormente, entre las resinas rígidas se escogió la resina VeroWhite, por ser una resina tipo ABS que ofrece la mejor relación coste/propiedades físicas. Además, es una resina opaca de color blanco que ofrece interesantes posibilidades estéticas de cara al desarrollo de las aplicaciones de electrónica estructural.

Dentro de los materiales metálicos procesables por DMLS, los más comunes son el aluminio, el acero y las aleaciones de titanio. Entre ellos se optó por el acero inoxidable 15-5 PH1, ya que presenta un mejor acabado superficial que el aluminio y el titanio y, además, para el sinterizado del polvo requiere una menor potencia de laser (200W) que el titanio y el aluminio (400 W). Este factor es especialmente relevante pensando en los procesos de intercalado de la deposición de componentes electrónicos y pistas conductoras en el proceso de fabricación aditiva de la pieza.

Finalmente, dentro de los materiales cerámicos, se escogió inicialmente la alúmina, u óxido de aluminio (Al_2O_3), como sustrato objeto de estudio. La alúmina se encuentra de forma natural en el corindón y el esmeril, y es uno de los materiales principales en la construcción de arcillas y esmaltes. Su elevado punto de fusión de 2072 °C, frente a los 660 °C del aluminio, dureza y otras cualidades mecánicas lo convierten en un aislante térmico y eléctrico ideal para trabajar en condiciones de altas temperaturas.

Tabla 2. Sustratos seleccionados

Material	Proceso de fabricación	Propiedades
Nylon 12,12	SLS	Termoplástico técnico con buenas propiedades mecánicas y térmicas.
Nylon 12,12	FDM	Termoplástico técnico con buenas propiedades mecánicas y térmicas. Difiere de la entrada anterior en las propiedades superficiales derivadas del proceso de fabricación aditiva.
Alumide	SLS	Poliamida reforzada con partículas de aluminio. Más duro que cualquier otro material plástico procesable por SLS y acabado de aspecto metálico.
VeroWhite	PolyJet	Resina fotosensible rígida, opaca, de color blanco, tipo ABS.
Acero inoxidable 15-5	DMLS	Aleación metálica de alta dureza y elevada resistencia a la corrosión.
Alúmina	LCM	Material cerámico que destaca, entre otras propiedades, por su alta dureza, bajo coeficiente de dilatación, excelente resistencia a la corrosión, bajo coeficiente de fricción, resistencia a altas temperaturas, aislante eléctrico, alta conductividad térmica y alta resistencia mecánica.

Selección de tratamientos superficiales

A la hora de seleccionar los tratamientos superficiales previos a la deposición de las tintas funcionales, se tuvieron en cuenta dos criterios principales:

- Que el tratamiento superficial pueda ser aplicado de manera homogénea sobre piezas tridimensionales.
- Que en conjunto el abanico de tratamientos escogido permita abarcar todos los tipos de sustrato (metálico, plástico, cerámico) y un amplio rango de rugosidades superficiales.

Teniendo esto en cuenta se optó por los siguientes procesos:

- Tratamiento con plasma. El plasma está considerado el cuarto estado de la materia, consistiendo en la ionización (parcial o total) de un gas o mezcla de gases, gracias a la aplicación de un campo eléctrico entre dos electrodos. Las especies activas generadas (electrones, iones, radicales libres,...) interaccionan con las capas más exteriores del sólido modificándolo a nivel superficial. Existen diversos tipos de tratamientos de plasma en función de la forma empleada para inducir la ionización de los gases. En el proyecto se escogió el uso de plasma atmosférico. A pesar de que el área a tratar con este tipo de plasmas se centra en la zona sobre la que se focaliza la boquilla y, por tanto, para el tratamiento de objetos 3D se requiere del uso de brazos robóticos y el acceso a surcos profundos es limitado, se seleccionó esta tecnología porque, a diferencia de otros procesos, simplifica significativamente las condiciones de operación al no requerir el uso de cámaras de baja presión.
- Granallado. El proceso de granallado es una técnica de tratamiento superficial por impacto con la cual se puede lograr un excelente grado de limpieza y simultáneamente una correcta terminación superficial en una amplia gama de piezas metálicas y no metálicas. De manera general, podemos decir que el granallado es el bombardeo de partículas abrasivas a alta velocidad (65-110 m/seg.). Con este proceso pueden obtenerse rugosidades superficiales promedio entre los 0.8 y los 0.4 μm dependiendo del tipo de partícula. El granallado con partículas de vidrio produce un decapado superficial, un texturizado suave, limpieza, shoot-peening en metales sin remoción del metal base, teniendo una abrasión reducida, a diferencia de las partículas de corindón, que tienen una mayor dureza con aristas agudas y una mayor capacidad de penetración en la pieza por lo que el texturizado obtenido es más marcado que mediante el uso de vidrio. Por esta razón se ha decidido utilizar ambos materiales en los equipos disponibles en nuestras instalaciones para la realización del proceso sobre las probetas y así obtener diferentes rugosidades mediante métodos similares.
- Mecanizado. El mecanizado es un proceso ampliamente utilizado para la obtención de piezas con buenos acabados dimensionales en diversos materiales. Existen diferentes

equipos de mecanizado, centrándonos en este proyecto en centros que permitan el mecanizado superficial de piezas tridimensionales con alta precisión. Para realizar el mecanizado se utilizan herramientas con una gran dureza que cuentan con aristas de corte para la eliminación del material sufriendo un desgaste muy bajo (este desgaste se reduce todavía más si se utilizan fluidos de corte tales como taladrina) por lo que se obtienen tolerancias dimensionales muy precisas. En nuestras instalaciones se dispone de dos centros de mecanizado de 5 ejes, que podrán utilizarse para este proyecto, siendo preferible el uso del centro de mecanizado Kern Evo al ser un centro de micro mecanizado con el que se obtienen mejores tolerancias. El mecanizado se realizará dando prioridad al acabado por encima de la velocidad de proceso, por lo que se darán múltiples pasadas de reducido espesor en vez de pasadas con mayor arranque de viruta para así obtener rugosidades bajas y superficies uniformes.

3.1.2.3 Selección de componentes electrónicos y adhesivos

Para la realización de los prototipos con componentes electrónicos convencionales combinados con pistas impresas se van a utilizar componentes SMD de montaje superficial. Se ha barajado el uso de componentes de inserción dejando los agujeros para su colocación en las piezas pero debido a su tamaño y a que sobresaldrían bastante se ha descartado su uso optando por componentes de montaje superficial de reducido tamaño y espesor que no sobresalen mucho al colocarse sobre la superficie de las piezas, quedando un sistema similar a una PCB estándar.

Para los elementos tridimensionales planteados en este proyecto se ha planteado el uso de un LED smd que permita que la pieza ilumine. Se ha optado por esta aplicación por ser muy visual ya que el montaje de un condensador, una resistencia, u otro tipo de componente SMD no permitiría validar el funcionamiento de forma tan visual.

Para el conexionado eléctrico entre componente electrónico y las pistas impresas, así como la fijación del componente mecánicamente a la pieza se utilizan adhesivos conductores eléctricos ya que sobre las pistas impresas no es posible el uso de uniones mediante estaño, además que las temperaturas necesarias para el estañado de los componentes deteriorarían los materiales poliméricos de la pieza.

De entre los adhesivos conductores disponibles se ha barajado el uso de adhesivos isotrópicos y anisotrópicos. La principal diferencia entre ellos es que mientras que los adhesivos isotrópicos conducen la electricidad en todas direcciones, los adhesivos anisotrópicos solamente conducen la electricidad en el eje Z, es decir, en vertical en la zona de contacto entre el componente y las pistas conductoras con lo que se evita el riesgo de que el adhesivo conecte los pads del componente electrónico provocando un corto. El mayor inconveniente del uso de adhesivos anisotrópicos y la razón de que dentro de este proyecto se plantee el uso de adhesivos isotrópicos es que para su correcto curado es necesario el uso de un thermode, ya que se necesita ejercer una presión controlada y calentar hasta una temperatura fijada de forma rápida manteniendo esta presión y temperatura un tiempo determinado. Sobre sustratos 2D es posible el uso del thermode al ser la

superficie perpendicular al plano de trabajo del thermode, mientras que en piezas 3D con curvatura y geometrías de mayor complejidad no es posible ejercer presión con el thermode de forma adecuada para conseguir un correcto curado del adhesivo.

A continuación, pueden verse esquemáticamente las diferencias entre el uso de adhesivos isotrópicos y anisotrópicos.

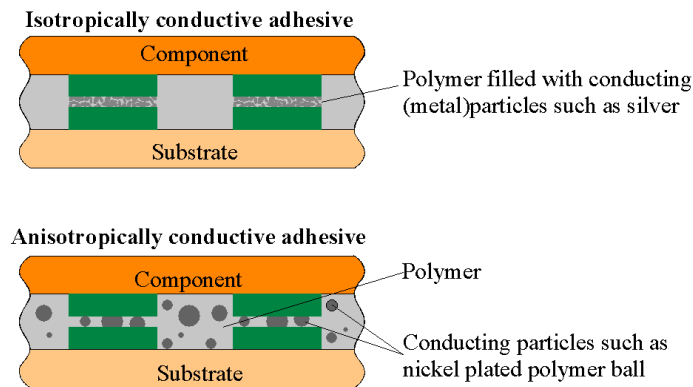


Figura 12. Esquema adhesivo conductor isotrópico y anisotrópico

Por todo ello y para que el uso del adhesivo no sea un limitante a la hora de posicionar el componente electrónico sobre la pieza 3D se ha decidido el uso de *adhesivos conductores anisotrópicos*.

Dentro de los adhesivos conductores anisotrópicos pueden diferenciarse dos tipos de curado, térmico y UV. A priori ambos sistemas de curado son adecuados ya que el componente va a estar en la superficie de la pieza tridimensional por lo que es afectado tanto térmicamente como por luz UV pro lo que para el presente proyecto se van a utilizar este tipo de adhesivos, preferiblemente de curado térmico a baja temperatura para no afectar térmicamente a los materiales de las piezas ya que en los adhesivos de curado UV existe el riesgo de que el componente haga de pantalla a la luz UV no permitiendo que esta cure adecuadamente el adhesivo en los pads bajo el componente.

Como el rango de temperaturas de curado de estos adhesivos va desde los 100°C a los 140°C la afectación térmica es muy baja y se plantean como adecuados para la fijación y conexión de componentes SMD sobre las piezas tridimensionales desarrolladas mediante fabricación aditiva.

3.1.3 T1.3. ESTUDIO DE COMPATIBILIDAD SUSTRATO-TINTA

3.1.3.1 Fabricación de probetas

Partiendo de los materiales seleccionados en la tarea anterior se han diseñado y fabricado probetas con unas dimensiones de 50mm x 30mm x 2mm mediante diferentes tecnologías de fabricación aditiva. Se han fabricado 60 probetas en Poliamida, 60 en Alumide, 60 en Vero White, 36 en Acero Inoxidable PH1, 60 en Nylon FDM, y 10 en Alúmina a las que se les han realizado diferentes tratamientos superficiales adecuados al material de la probeta para posteriormente evaluar la

deposición de diferentes tintas conductoras, resistivas y dieléctricas sobre ellas. Los tratamientos superficiales realizados han sido:

- Sin tratamiento superficial.
- Plasma atmosférico (1 pasada).
- Plasma atmosférico (2 pasadas).
- Mecanizado.
- Granallado con Vidrio.
- Granallado con Corindón.

En la siguiente tabla se muestran las probetas fabricadas con indicación de los tratamientos superficiales a los que fueron sometidas.

Tabla 3. Probetas y tratamientos superficiales

Material	Sin Tratamiento	Granallado Vidrio	Granallado Corindón	Mecanizado	Plasma 1 pasada	Plasma 2 pasadas
ACERO INOX.	9	9	9	9	x	x
POLIAMIDA	10	10	10	10	10	10
ALUMIDE	10	10	10	10	10	10
VERO WHITE	10	10	10	10	10	10
NYLON FDM	10	10	10	10	10	10
ALÚMINA	10	x	x	x	x	x

Sin tratamiento superficial (SA):

Se han dejado las probetas tal cual salen de los equipos de fabricación aditiva, realizando solamente la limpieza necesaria para eliminar restos de polvo, *binder* o material soporte empleado en el proceso de impresión 3D con la finalidad de evaluar la deposición de las tintas sobre el material tal cual, y utilizándolo como base para observar posibles mejoras en la interacción tinta-sustrato al realizar tratamientos superficiales sobre las mismas.

Plasma atmosférico (P):

Este post-tratamiento se ha realizado únicamente sobre los materiales poliméricos, ya que sobre metales y cerámica no es un tratamiento efectivo, realizando la deposición de las tintas en un tiempo inferior a 30 minutos tras el tratamiento para así evitar que la disminución del tratamiento con el tiempo afectase negativamente a las posibles mejoras obtenidas en la interacción tinta-sustrato por este tratamiento.

El tratamiento mediante plasma se ha realizado de forma controlada realizando el movimiento del cabezal plasma mediante un robot SCARA EPSON SPYDER RS3 al que se le ha diseñado y fabricado un adaptador a medida mediante fabricación aditiva en nylon para poder sujetar el cabezal del tratamiento Plasma de forma adecuada y se han programado trayectorias a velocidad uniforme de tal forma que el tratamiento sobre cada pieza tenga una gran uniformidad.

Se han realizado tratamientos con 1 y 2 pasadas para así tener probetas tratadas con el doble de tiempo de tratamiento y comprobar posibles diferencias ya que, aunque con 1 pasada con los parámetros recomendados por la empresa propietaria debería ser suficiente, se quiso realizar la prueba realizando el tratamiento dos veces de forma continua para así duplicar el tiempo de tratamiento de la superficie de las probetas.

El equipo utilizado para realizar el tratamiento plasma ha sido un PlasmaTEC-X utilizando los parámetros recomendados para tratar superficialmente las probetas.

Mecanizado (M):

Se ha realizado un mecanizado superficial sobre todas las probetas excepto las cerámicas ya que no permiten su mecanizado. El proceso de mecanizado realizado sobre las probetas ha sido un planeado superficial para así uniformizar la superficie y obtener una rugosidad menor a la del material según sale de la máquina. Para ello se ha utilizado una fresa STD de diámetro 5mm en pasadas de 50um para evitar que se deformen las probetas debido a los esfuerzos de corte. Para la sujeción de las probetas se ha utilizado un sistema de vacío ya que debido a su bajo espesor no es operativa la sujeción con una mordaza estándar. Para el mecanizado de estas probetas se ha utilizado la máquina KERN Evo disponible en Fundación IDONIAL.

Granallado con Vidrio (GV):

Este tratamiento superficial se ha realizado sobre todas las probetas exceptuando las de cerámica debido a su dureza y fragilidad. Con este tratamiento se modifica la rugosidad superficial de las probetas al proyectar esferas de vidrio a alta velocidad mediante aire con una presión de 4 bares.

Granallado con Corindón (GC):

Este tratamiento es similar al granallado con vidrio pero utiliza esferas de corindón, que tiene una mayor dureza y, por lo tanto, es más abrasivo con las superficies de las probetas. En este caso tampoco se han tratado las probetas realizadas en material cerámico. Para evaluar las diferencias con el tratamiento de granallado con esferas de vidrio se ha decidido igualar la presión de aire con el que se proyectan las esferas, por lo que se ha utilizado una presión de 4 bares.

3.1.3.2 Deposición de tintas

Una vez obtenidas las probetas con los diferentes acabados superficiales se ha procedido a depositar las diferentes tintas sobre ellas trazando 5 líneas por probeta de forma manual utilizando un dispensador neumático para controlar el caudal depositado. El equipo utilizado para ello ha sido el FISNAR SL101N disponible en nuestras instalaciones.

En función de las diferentes viscosidades de las tintas depositadas se ha ajustado la presión de deposición con la finalidad de obtener cantidades lo más similares posibles de deposición, regulando también el caudal de vacío que evita que continúe saliendo tinta una vez detenido el accionamiento para la deposición. Una vez depositada cada tinta sobre las probetas se ha realizado el curado de la misma siguiendo las indicaciones del fabricante, realizando por tanto curados térmicos a diferentes temperaturas y tiempos y curados UV en función de la tinta con la finalidad de obtener un curado adecuado de las tintas con los mismos parámetros por cada tinta y poder así evaluar la interacción tinta-sustrato partiendo de la base de que el curado específico de cada tinta ha sido bajo los mismos parámetros.

Tabla 4. Parámetros de curado utilizados para cada tinta

TINTA	CURADO
HENKEL WIK 20487	120°C 10 minutos
DYCOTEC DM-SIP-31000S	130°C 20 minutos
J+S UV Supraflex - 390119	UV 365nm
GWENT CARBON (C2030519P4)	130°C 10 minutos
CLARIANT Prelects TPS	150°C 60 minutos
UTDots Inc. Nano-silica Epoxy Ink	120°C 15 minutos
NOVACENTRIX JR-700 Carbon inkjet ink	120°C 30 minutos

A continuación pueden verse diferentes probetas sobre las que se han depositado y curado las tintas. En el caso de la siguiente imagen la tinta depositada ha sido la desarrollada por DYCOTEC habiendo seguido una metodología de deposición igual con el resto de tintas y adecuando los procesos de curado a cada una de ellas siguiendo las indicaciones del fabricante.

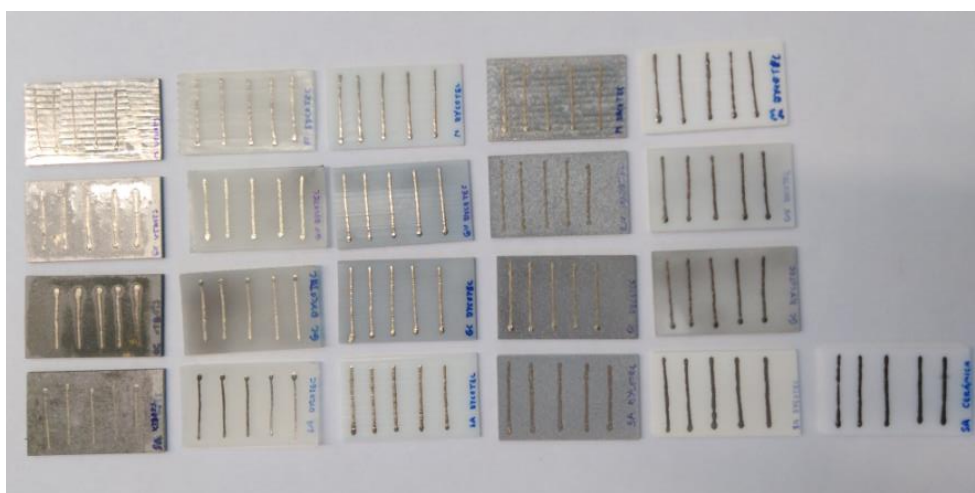


Figura 13. Tinta DYCOTEC depositada sobre las probetas y curada térmicamente

Sobre las probetas metálicas se han depositado tintas dieléctricas en una primera etapa, depositando posteriormente las tintas conductoras para así poder evaluar tanto el aislamiento eléctrico obtenido con estas tintas dieléctricas como la deposición de tintas conductoras sobre estas tintas dieléctricas ya curadas y el curado posterior de estas tintas.

3.1.3.3 Caracterización de la interacción sustrato-tinta

Inspección visual

Se han tomado imágenes de todas las probetas con cada acabado superficial y tinta depositada para tener archivadas las diferentes interacciones entre tinta y sustrato. Esto en algunas tintas se puede apreciar con gran facilidad, mientras que otras visualmente son más similares entre sí, en parte debido a la porosidad de las muestras y a la viscosidad de las tintas ya que las tintas poco viscosas al ser depositadas sobre probetas fabricadas con materiales con una porosidad más alta como la Poliamida o el Alumide se han extendido más, como puede apreciarse en las siguientes imágenes.

- Tinta HENKEL WIK 20487. La tinta se ha difuminado un poco al ser parcialmente absorbida por el sustrato poroso de poliamida sin acabado superficial. Aun así, esta tinta ha mantenido la forma de la pista de forma adecuada sobre todos los materiales sobre los que ha sido depositada, ya que tiene una viscosidad alta.
- Tinta DYCOTEC DM-SIP-3100S. El color de la tinta es gris oscuro una vez curada cuando el sustrato es poliamida, a diferencia del resto que tienen un color más plateado.. sta tinta aun así se considera adecuada ya que las pistas depositadas apenas han sufrido distorsión a mayores de un pequeño engrosamiento al ser absorbida parcialmente por los materiales de mayor porosidad.
- Tinta J+S UV Supraflex-390119. Esta tinta dieléctrica se ha depositado sobre diferentes materiales para comprobar la calidad de deposición obtenida, siendo absorbida por sustratos porosos, y produciendo un engrosamiento importante de las pistas depositadas. Sobre acero inoxidable, que es el material más interesante sobre el que depositar tinta dieléctrica el acabado es bueno, obteniéndose una capa uniforme adecuada.
- Tinta GWENT CARBON (C2030519P4). La tinta resistiva GWENT CARBON se ha depositado de forma adecuada sobre todas las muestras ya que incluso en las probetas realizadas con materiales de mayor porosidad las pistas depositadas han mantenido su forma, presentando un acabado uniforme. Sobre alguna probeta metálica (acero inoxidable PH1 + tinta dieléctrica) se han observado grietas que se han formado durante el proceso de curado térmico. Esto puede ser debido a la diferente dilatación y contracción de las tintas y es importante tenerlo en cuenta ya que en esas zonas se pueden producir cortes en las pistas.

- Tinta CLARIANT Prelects TPS. Esta tinta se ha depositado de forma adecuada sobre casi todos los materiales, observándose que en los materiales de mayor porosidad las pistas depositadas se ensanchan al ser parcialmente absorbidas, pero siendo este ensanchamiento contenido por lo que se considera una deposición adecuada. La deposición de esta tinta sobre poliamida y alumide con tratamiento superficial mediante plasma no ha sido adecuada ya que debido a la mejora de la mojabilidad la tinta se ha extendido demasiado y las pistas trazadas se han difuminado excesivamente.
- Tinta UTDots Inc. Nano-silica Epoxy ink. Debido a su baja viscosidad, esta tinta se difumina sobre los materiales más porosos, no permitiendo una deposición precisa de las pistas. Como el uso prioritario de esta tinta es el aislamiento eléctrico sobre materiales metálicos esto no es un requisito imprescindible, pero si se deseara trazar pistas con una anchura controlada sobre materiales porosos o con superficie irregular el acabado obtenido no sería adecuado.
- Novacentrix JR-700 Carbon inkjet ink. Debido a su baja viscosidad esta tinta se difumina con gran facilidad en sustratos cuya superficie presenta irregularidades ya sea por porosidad como por marcas del proceso de mecanizado. Esto hace que sea importante elegir el material de la probeta sobre el que se va a depositar para evitar problemas de ensanchamiento de las pistas depositadas. Sobre acero inoxidable PH1 + Dieléctrico su comportamiento es adecuado.

Medidas de Conductividad

Para verificar que las pistas depositadas sobre las probetas realizadas mediante fabricación aditiva conducen la electricidad una vez curadas se han realizado medidas de resistencia eléctrica con un multímetro en cada pista depositada, obteniéndose las siguientes conclusiones:

- Los valores obtenidos con la tinta HENKEL WIK son buenos y bastante uniformes, no teniendo una gran influencia el material sobre el que se ha depositado la tinta por lo que se acepta como tinta adecuada para su deposición sobre las probetas realizadas por fabricación aditiva.
- La tinta DYCOTEC presenta, al igual que la DUPONT WIK, valores buenos y uniformes de resistencia eléctrica sin una gran dependencia del material sobre el que se ha depositado por lo que se considera adecuada para su deposición sobre las probetas elaboradas por fabricación aditiva en este proyecto.
- La tinta GWENT presenta valores más altos de resistencia eléctrica ya que es una tinta resistiva, que presenta valores de resistencia más elevados debido a su composición basada en carbono en vez de plata. En este caso se aprecian variaciones significantes en los valores

de resistencia eléctrica de las pistas, pero al ser una tinta cuya resistencia ya de por sí es elevada, estas variaciones pueden deberse a pequeñas variaciones en la cantidad de tinta depositada, aunque también se aprecia que el material sobre el que se deposita puede tener cierta influencia, algo que a efectos prácticos no significa que no sea válida para su deposición sobre alguno de los materiales ensayados, sino que será necesario controlar la cantidad de tinta depositada y el material sobre el que se deposita y ajustar esto adecuadamente para obtener valores repetibles.

- La tinta desarrollada por CLARIANT presenta grandes variaciones en cuanto a la resistencia eléctrica en función del material de la probeta sobre la que se ha depositado así como de los diferentes acabados superficiales. Esto puede ser debido a su baja viscosidad ya que al depositarse sobre probetas con una superficie irregular no se obtiene una deposición uniforme. Los valores de resistencia son muy altos en la mayoría de los casos, obteniéndose valores más bajos sobre determinados materiales pero sin tener estos valores la uniformidad suficiente para considerar que estas variaciones puedan deberse a variaciones en la cantidad depositada de tinta. Sobre otros materiales esta tinta no conduce al presentar cortes o incluso sin presentar cortes en la inspección visual.
- La tinta resistiva desarrollada por NOVACENTRIX presenta valores de resistencia eléctrica elevados, en parte debido a su composición ya que es una tinta de carbono cuya conductividad eléctrica es reducida. Los valores medidos indican variaciones grandes de resistencia puntualmente, mientras que sobre algunos de los materiales estas variaciones podría asumirse que tengan relación con pequeñas variaciones en la tinta depositada al trazar las pistas.

Existe un número de muestras que no presentan continuidad eléctrica sin ser esto totalmente dependiente del material o acabado superficial ya que dentro de los mismos materiales y acabados hay pistas que conducen y pistas que no, por lo que no se considera una tinta con la que se puedan obtener valores repetibles de forma adecuada controlando la cantidad depositada.

- La tinta dieléctrica desarrollada por UTDOTS no ha funcionado adecuadamente como aislante eléctrico entre las probetas de acero inoxidable PH1 y las tintas conductoras depositadas sobre el dieléctrico por lo que a priori se descarta su uso, seleccionando la tinta dieléctrica J+S Supraflex como dieléctrico debido a su buen funcionamiento.

Perfilometría

A continuación, se describen los resultados de la caracterización de la rugosidad, mediante perfilometría mecánica, de los sustratos fabricados a partir de impresión 3D. La siguiente tabla recoge la codificación de las muestras analizadas.

Tabla 5: Materiales y sus acabados; Granallado vidrio (GV), granallado corindón (GC), mecanizado (M), sin acabado superficial (SA)

Material	Acabados			
Alumide	GV	GC	M	SA
Inox				
Vero white				
Poliamida				
Cerámica				
Nylon FDM				

Las medidas de rugosidad han sido realizadas empleando un perfilometro mecánico (Ambios Technology, modelo XP-1). El equipo se ha verificado, antes de cada nueva serie de muestras, mediante uso de un patrón de rugosidad media de $3,18\mu\text{m}$ (Handysurf). Las condiciones de medidas han sido:

- Escala de medida: $100\mu\text{m}$
- Velocidad de medida: $0,1\text{mm/s}$
- Fuerza del estilete: de 2mg o 5mg según el nivel de rugosidad
- Longitud del escaneo: de 2mm o 3mm en función de si existe o no cierta periodicidad en la rugosidad (3mm en caso de periodicidad)

Los ensayos se han realizado en el centro de las muestras, de forma transversal a la rugosidad (cuando se aprecia/existe) y se ha determinado tanto la rugosidad media (Ra) como la rugosidad pico-valle (Rt).

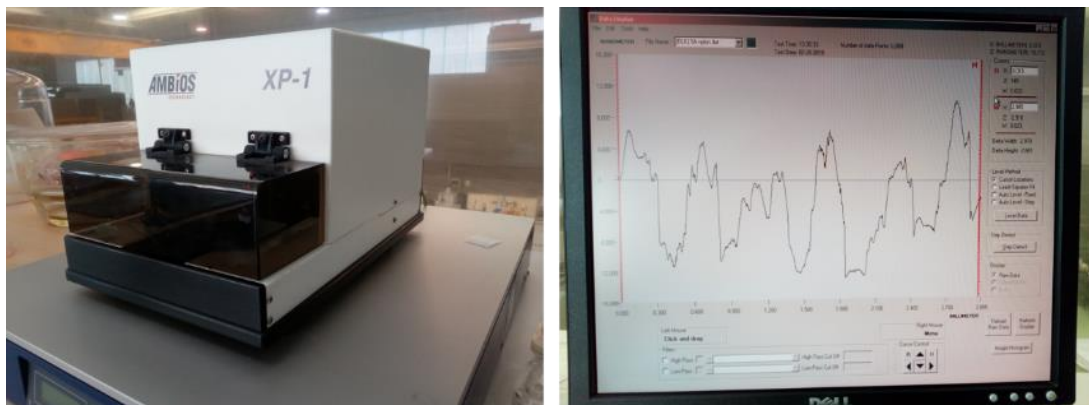


Figura 14. Perfilómetro mecánico y ejemplo de un perfil de rugosidad

Estos son los valores obtenidos:

Tabla 6: tabla de resultados de rugosidad para los materiales testados

Material	Acabado	GV		GC		M		SA	
		Ra	Rt	Ra	Rt	Ra	Rt	Ra	Rt
Alumide	Rugosidad (µm)	17,3	90,0	12,0	72,5	4,9	41,5	26,1	171,1
	Acabado	GV		GC		M		SA	
Acero Inoxidable	Rugosidad (µm)	4,1	23,2	3,5	23,1	0,3	1,5	11,5	68,4
	Acabado	GV		GC		M		SA	
Vero White	Rugosidad (µm)	8,9	41,7	4,1	27,5	0,9	8,4	5,0	31,7
	Acabado	GV		GC		M		SA	
Poliamida	Rugosidad (µm)	13,1	75,5	10,5	79,7	1,6*	22,5	14,3	83,9
	Acabado	GV		GC		M		SA	
Cerámica	Rugosidad (µm)	---	---	---	---	---	---	1,0	8,9
	Acabado	GV		GC		M		SA	
Nylon FDM	Rugosidad (µm)	10,2	72,5	6,3	41,9	6,3	45,4	4,9	23,7
	Acabado	GV		GC		M		SA	

*Con bulto, **Sin bulto

Comentarios a estos resultados:

- En las medidas de rugosidad sobre probetas de Alumide se aprecia la mayor rugosidad de todos los materiales y tratamientos analizados. No obstante puede apreciarse una disminución tanto en la rugosidad media como en la rugosidad pico-valle en las muestras tratadas superficialmente, presentando una rugosidad más reducida en las probetas mecanizadas siendo ésta bastante elevada en comparación con el resto de materiales, mientras que en las probetas con tratamiento de granallado ya sea con vidrio o corindón se obtienen rugosidades menores que sin tratamiento superficial pero bastante elevadas en comparación con el resto de materiales ya sea tratados o sin tratar superficialmente.
- En las probetas de acero inoxidable se observa una rugosidad bastante reducida. En las probetas mecanizadas se obtienen los valores de rugosidad menores de todas las muestras estudiadas produciéndose una disminución importante de la rugosidad con los tratamientos superficiales de granallado, no existiendo grandes diferencias entre el granallado realizado con vidrio y el realizado con corindón.

- Las probetas realizadas en Vero White presentan valores de rugosidad cercanos a las fabricadas en Nylon por FDM. Estos valores de rugosidad son bastante reducidos en las probetas sin tratamiento superficial, mejorando ampliamente en las probetas mecanizadas. En las probetas granalladas se observa una ligera mejora con el tratamiento mediante granallado con corindón respecto a las probetas sin tratamiento superficial y se produce un pequeño empeoramiento en la rugosidad superficial en las probetas tratadas mediante granallado con vidrio respecto a las probetas sin tratamiento superficial. Esto ocurre debido a que al salir las probetas de la máquina con un buen acabado y ser un material de baja dureza, la proyección de esferas de vidrio y corindón afecta a la superficie modificando su rugosidad sin que se produzca prácticamente mejora alguna o incluso empeorándola.
- Las probetas realizadas en Poliamida presentan una rugosidad bastante elevada, solo superada por el Alumide. Tras el mecanizado superficial esta rugosidad disminuye mucho pero continúa siendo relativamente alta en comparación con el resto de probetas mecanizadas superficialmente. Con los tratamientos de granallado la rugosidad mejora un poco, manteniéndose elevada y solo siendo superada por el Alumide.
- En el caso de la cerámica no ha sido posible realizar tratamientos superficiales debido a su dureza, por lo que se solamente se ha medido tal cual sale de la máquina, sin realizar ningún tipo de acabado superficial. Aun así, se observan valores de rugosidad muy bajos, solo mejorados por el Acero Inoxidable y el Vero White mecanizados superficialmente.
- Las probetas realizadas por Nylon mediante FDM presentan valores de rugosidad superficial más muy bajos sin tratamiento superficial, solo mejorados por las probetas cerámicas. En el caso de mecanizado superficial o granallado con vidrio o corindón se aprecia un empeoramiento de la rugosidad superficial, siendo el único material que empeora su rugosidad con cualquiera de los tratamientos superficiales objeto de estudio. Esto puede ser debido a que internamente no presenta una estructura tan uniforme como el resto de probetas debido a la fabricación FDM, dejando el proceso de fabricación una superficie mejor que la conseguida mediante tratamientos superficiales.

Pruebas de adhesión

Se han realizado pruebas de adhesión sobre todas las probetas con los diferentes tratamientos superficiales para cada tinta una vez depositada y curada siguiendo las recomendaciones del fabricante.

Para ello se ha utilizado cinta adhesiva 3M 600 realizando el siguiente procedimiento:

- Adherir la cinta sobre las pistas de tinta presionando firmemente con el dedo.
- Despegar la cinta tirando con una velocidad uniforme con un ángulo de 180º
- Comprobar si hay restos de tinta en la cinta adhesiva.

Con este procedimiento se valida la adhesión de la tinta a cada material de las probetas para así comprobar qué interacción material-tinta es más robusta. Estos son los resultados:

- HENKEL WIK 20487. Esta tinta presenta una muy buena adhesión sobre todos los materiales y tratamientos superficiales, no se ha apreciado que se levantara total o parcialmente la tinta realizando la prueba de adhesión.
- DYCOTEC DM-SIP-3100S. La tinta desarrollada por DYCOTEC presenta una buena adhesión en general, aunque sobre cerámica y sobre poliamida con un mecanizado superficial se aprecia que una pequeña parte de la tinta de alguna de las pistas se ha quedado adherida a la cinta adhesiva. Esto pudo ser debido a un dispensado de mayor cantidad de tinta en esas zonas ya que las partes que se han quedado adheridas a la cinta estaban situadas en zonas con una mayor cantidad de tinta, y este levantamiento de la tinta ha sido parcial, quedando tinta en la probeta con buena adhesión y no despegándose incluso repitiendo la prueba de adhesión sobre ellas.
- J+S UV Supraflex. Esta tinta dieléctrica es transparente por lo que a la hora de realizar esta prueba ha sido necesario prestar mucha atención a cambios de tono en la cinta adhesiva que indicasen que la tinta se había despegado total o parcialmente. Una vez comprobadas todas las probetas se ha visto que la adhesión es correcta ya que no se ha producido deterioro en la tinta.
- GWENT CARBON. La tinta resistiva de GWENT GROUP presenta una adhesión bastante mala en general, levantándose la tinta total o parcialmente en numerosas probetas sin una gran influencia del material sobre el que se haya depositado. Sobre Nylon FDM la adhesión ha sido buena, al igual que sobre acero inoxidable con una capa de dieléctrico J+S Supraflex y la Poliamida y Alumide granallados con vidrio o la Poliamida mecanizada. Sobre el resto de sustratos parte de la tinta se ha adherido a la cinta adhesiva por lo que para aplicaciones en las que esta tinta esté en la superficie y pueda existir contacto o rozamiento con objetos no sería adecuada. Cabe destacar que en la inspección visual se han encontrado grietas en esta tinta depositada sobre dieléctrico en probetas de acero inoxidable, sin embargo la adhesión de estas pistas en esas probetas ha sido adecuada.
- CLARIANT Prelects TPS. Al realizar las pruebas de adhesión de la tinta desarrollada por CLARIANT sobre poliamida sin tratamiento superficial y con mecanizado superficial se ha comprobado que parte de la tinta se quedaba adherida a la cinta adhesiva (puede apreciarse en las dos imágenes de la izquierda), mientras que sobre el resto de materiales las pruebas de adhesión fueron adecuadas, sin ningún desprendimiento de tinta.
- UTDots Inc. Nano-silica Epoxy ink. La tinta UTDOTS es transparente por lo que las pruebas de adhesión se han realizado poniendo especial atención a los posibles restos de tinta que pudiesen quedar en la cinta adhesiva. Una vez realizada la prueba sobre todas las probetas se ha comprobado que la adhesión es adecuada sobre todos los materiales.

- NOVACENTRIX JR-700 Carbon inkjet ink. La tinta de carbono NOVACENTRIX ha presentado problemas de adhesión sobre prácticamente todos los materiales y tratamientos superficiales, despegándose tanto parcial como totalmente en función del material de la probeta. Solamente ha tenido una adhesión adecuada sobre la tinta UTDOTS depositada como dieléctrico en las probetas de acero inoxidable, sobre el Vero White mecanizado, en Nylon FDM granallado con vidrio y en las probetas de Poliamida tratadas por plasma ya sea con 1 o 2 pasadas. Esta tinta, por lo tanto, no se considera adecuada para aplicaciones en las que se deposite sobre la superficie de las piezas ya que su nivel de adhesión es bajo, mientras que para otras aplicaciones podría considerarse adecuada.

A modo esquemático pueden verse los resultados de validación de tintas sobre los diferentes sustratos en las siguientes tablas:

Tabla 7: Resultados de validación de pruebas de adhesión de tintas sobre probetas sin tratamiento superficial

SIN TRATAMIENTO SUPERFICIAL							
	HENKEL WIK	CLARIANT	DYCOTEC	GWENT	NOVACENTRIX	J+S	UTDOTS
ACERO INOX.	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
POLIAMIDA	SI	NO	SI	NO	NO	SI	SI
ALUMIDE	SI	SI	SI	NO	NO	SI	SI
VERO WHITE	SI	SI	SI	NO	NO	SI	SI
NYLON FDM	SI	SI	SI	SI	NO	SI	SI
ALÚMINA	SI	SI	SI/NO	NO	NO	SI	SI

Tabla 8: Resultados de validación de pruebas de adhesión de tintas sobre probetas con granallado con corindón

GRANALLADO CORINDÓN							
	HENKEL WIK	CLARIANT	DYCOTEC	GWENT	NOVACENTRIX	J+S	UTDOTS
ACERO INOX.	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
POLIAMIDA	SI	SI	SI	NO	NO	SI	SI
ALUMIDE	SI	SI	SI	SI/NO	NO	SI	SI
VERO WHITE	SI	SI	SI	NO	NO	SI	SI
NYLON FDM	SI	SI	SI	SI	NO	SI	SI

Tabla 9: Resultados de validación de pruebas de adhesión de tintas sobre probetas con granallado con vidrio

GRANALLADO VIDRIO

	HENKEL WIK	CLARIANT	DYCOTEC	GWENT	NOVACENTRIX	J+S	UTDOTS
ACERO INOX.	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
POLIAMIDA	SI	SI	SI	SI	NO	SI	SI
ALUMIDE	SI	SI	SI	SI	NO	SI	SI
VERO WHITE	SI	SI	SI	NO	NO	SI	SI
NYLON FDM	SI	SI	SI	SI	NO	SI	SI

Tabla 10: Resultados de validación de pruebas de adhesión de tintas sobre probetas mecanizadas

MECANIZADO

	HENKEL WIK	CLARIANT	DYCOTEC	GWENT	NOVACENTRIX	J+S	UTDOTS
ACERO INOX.	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
POLIAMIDA	SI	NO	SI/NO	SI	NO	SI	SI
ALUMIDE	SI	SI	SI	NO	NO	SI	SI
VERO WHITE	SI	SI	SI	NO	NO	SI	SI
NYLON FDM	SI	SI	SI	NO	NO	SI	SI

Tabla 11: Resultados de validación de pruebas de adhesión de tintas sobre probetas tratadas por plasma 1 pasada

PLASMA 1 PASADA

	HENKEL WIK	CLARIANT	DYCOTEC	GWENT	NOVACENTRIX	J+S	UTDOTS
POLIAMIDA	SI	SI	SI	NO	SI	SI	SI
ALUMIDE	SI	SI	SI	NO	NO	SI	SI
VERO WHITE	SI	SI	SI	NO	NO	SI	SI
NYLON FDM	SI	SI	SI	SI	NO	SI	SI

Tabla 12: Resultados de validación de pruebas de adhesión de tintas sobre probetas tratadas por plasma 2 pasadas

PLASMA 2 PASADAS

	HENKEL WIK	CLARIANT	DYCOTEC	GWENT	NOVACENTRIX	J+S	UTDOTS
POLIAMIDA	SI	SI	SI	NO	SI	SI	SI
ALUMIDE	SI	SI	SI	NO	NO	SI	SI
VERO WHITE	SI	SI	SI	NO	NO	SI	SI
NYLON FDM	SI	SI	SI	SI	NO	SI	SI

3.1.4 T1.4 SELECCIÓN DE DEMOSTRADORES TECNOLÓGICOS

En base a las tendencias tecnológicas advertidas en informes estratégicos y de mercado sobre la tecnología (por ejemplo, “IDTechEX Report. Smart Materials as Structural Electronics and Electrics 2019-2029”, “Global Structural Electronics Market Insights, Forecast to 2025”, “Structural Electronics: Global Technology Assessment, Market Analysis and Future Growth Trends. Research and Markets Report”, “Global Structural Electronics Market Report 2018: Technology Overview, Landscape, Literature, Applications and Conference Updates”, “Structural Electronics Market Growth, Analysis and Advancement Outlook 2018 to 2023”) y otras publicaciones, se identifican los siguientes conceptos como de potencial interés para la realización future de demostradores:

- Aplicación de impresión electrónica superficial. Esta línea de actuación se centra en una aplicación muy clara y de gran interés: la impresión de galgas extensiométricas en la superficie de piezas que provengan de fabricación aditiva, y estén sometidas a condiciones de servicio que puedan provocar su deterioro. Las galgas extensiométricas son, de forma general, elementos sensores que basándose en el efecto piezo-resistivo, alteran el valor nominal de su resistencia cuando se les somete a ciertos esfuerzos. Dicho esfuerzo generaría una variación en la resistencia eléctrica a causa del cambio de longitud, de espesor o de resistividad del elemento. A su vez, esta podría ser traducida al parámetro que se desee controlar. De este modo, se tienen sensores de deformaciones, cargas, pares, posiciones, etc.

El caso identificado de máximo interés para esta aplicación es el sector aeronáutico. En este sector, uno de los aspectos clave es la reducción del peso en cada uno de los componentes, lo que ha dado lugar a una fuerte irrupción de las tecnologías de fabricación aditiva. En aplicaciones/piezas de alto requerimiento suele haber una necesidad de monitorización de estos elementos para tener un registro continuo de su “salud estructural” y es ahí donde se relaciona con la aplicación del presente proyecto para deposición de electrónica impresa con el objetivo de generar galgas.

La aproximación a buscar por el proyecto sería la de disponer galgas extensiométricas impresas sobre superficies complejas; la variación geométrica de la pista ante esfuerzos externos generará cambios resistivos en las pistas, que podrán ser recogidos e interpretados en términos eléctricos, y convertidos de nuevo a datos mecánicos que aporten valiosa información.

En cuanto al tipo de componentes sobre los que aplicar este procedimiento, se han detectado unos de especial relevancia, los elementos laminares con perfil aerodinámico, que implican una elevada complejidad geométrica. Estas geometrías características pueden encontrarse en piezas tales como álabes o palas de turbinas o “flaps” de alas. I.

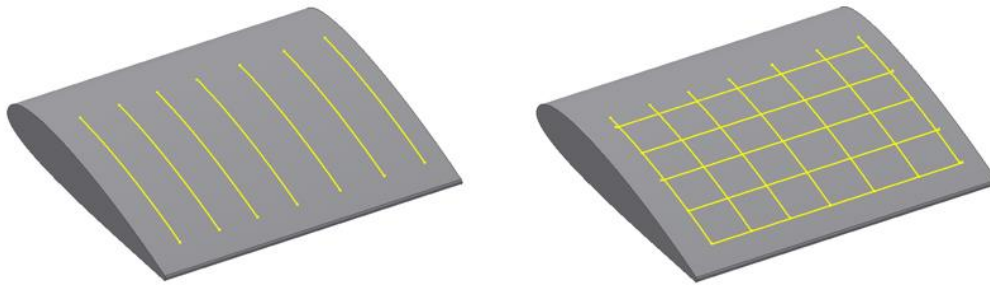


Figura 15. Ejemplos de implementación de las galgas sobre la superficie de componente-tipo. Patrón rectilíneo (izquierda) y matriz rectangular (derecha)

- Aplicación de impresión electrónica embebida. Los sensores embebidos dentro de piezas son de gran utilidad ya que permiten monitorizar diferentes parámetros en función del uso al que estén destinados estos elementos. Al estar en el interior de la pieza y no en su superficie permiten analizar parámetros internos del material tales como variaciones de temperatura, tiempos de calentamiento y enfriamiento bajo el efecto de una carga térmica externa, disipación de la presión localizada a través del material, analizar vibraciones internas en piezas, etc. El inconveniente de la utilización de este tipo de sensores es la dificultad de su integración en el interior de piezas sin que esto afecte estructuralmente a la propia pieza ya que para introducir los sensores mediante técnicas convencionales es necesario perforar las piezas o incluso realizar un corte en ellas por lo que a nivel estructural perderían propiedades mecánicas. Con el planteamiento de integrar los sensores dentro de las piezas generadas por fabricación aditiva durante el proceso de fabricación se evita la integración posterior de los sensores y la realización de agujeros o cortes, y al ser sensores de pequeño tamaño embebidos en la propia pieza utilizando pistas impresas para su conexión con un espesor muy reducido la modificación estructural en la pieza fabricada es mínima.

Para la aplicación de impresión electrónica embebida se ha planteado la integración de uno o varios sensores de temperatura y/o de presión dentro de un molde realizado en material polimérico para su uso en la máquina de micro inyección disponible en Fundación IDONIAL, para así poder evaluar las variaciones térmicas producidas durante el proceso de inyección así como la velocidad de enfriamiento y la presión a la que se somete el molde en cada inyección. Estos datos son de gran importancia ya que al ser un molde polimérico los incrementos de temperatura que ocurren durante el proceso influyen en el deterioro del mismo, por lo que un control de la temperatura interna del molde permitiría prolongar su vida útil. De forma similar un adecuado control de la presión que soporta la zona del molde donde se produce la inyección del material ayuda a controlar la adecuación de la geometría y material del molde a la presión a soportar.



Figura 16. Sensores de presión de bajo espesor

Para la integración de estos componentes en las piezas será necesario detener la fabricación de las mismas en una capa determinada, depositar la tinta conductora con la que se realizará el conexionado de los sensores, posicionar los sensores y realizar el curado de la tinta. En función del espesor y geometría de cada sensor será necesario adaptar el diseño de la pieza para que quede colocado adecuadamente sin que esta sobresalga superiormente en la capa para que al continuar con la fabricación de la pieza no se produzcan choques con los sensores.

- Aplicación de impresión electrónica sobre canales pre conformados. La aplicación de deposición de tintas conductoras en canales previamente realizados en la pieza es una aplicación que presenta un gran interés al permitir generar una pieza que dispone de canales internos de cierta geometría que no es posible realizar mediante otras tecnologías de fabricación que no sean ciertas tecnologías de fabricación aditiva. Estos canales se deben planificar y diseñar con precisión en el diseño de la pieza y permiten el conexionado eléctrico entre diferentes partes de la pieza de una forma robusta y fiable ya que la tinta conductora está contenida en los canales y a su vez protegida por los mismos al no disponer de elementos móviles o removibles, siendo pieza y tinta un mismo bloque.

La elaboración mediante fabricación aditiva de la pieza permite una gran flexibilidad en la geometría y trazado de los canales, pudiendo tener curvaturas internas, variaciones de altura, de sección... teniendo en cuenta para ello la posibilidad de realizar estos canales con cada tecnología de fabricación disponible y seleccionando la más adecuada para esta aplicación.

Para la aplicación de impresión con tintas conductoras en canales pre-conformados se ha planteado un demostrador que permita comprobar la adecuada interconexión entre diferentes partes de la pieza mediante el uso de tinta conductora rellenando los canales de la pieza. Para ello se ha planteado como demostrador una pieza cúbica con canales internos que permitan la conexión de varios elementos como un led, un sensor táctil que permita el encendido y apagado del led y la alimentación eléctrica. Se plantea el uso de un LED SMD de montaje superficial sobre una de las caras de la pieza y la generación del pulsador táctil mediante la deposición de tintas conductoras sobre la superficie que se desee que se

comporte como pulsador, conectando directamente con la deposición de tinta esta zona activa con los canales conductores a los que estará conectada. Este pulsador táctil podrá ser resistivo o capacitivo en función del controlador que se utilice para su gestión.

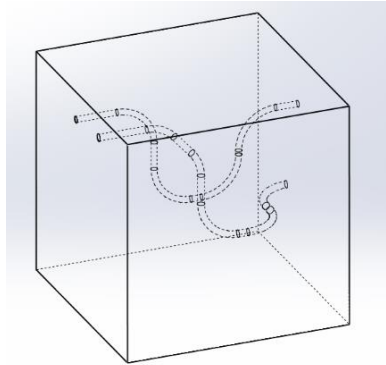


Figura 17. Concepto de cubo con canales internos

- Aplicación de impresión electrónica híbrida (embebida + superficial). Se plantea un último caso híbrido, que combina dos de las aproximaciones anteriormente descritas. En este caso, se ha seleccionado como caso de estudio las galgas extensiométricas para elementos de alto valor añadido y responsabilidad en sector aeronáutico, fabricados mediante impresión 3D pero combinando las técnicas embebida y superficial. El factor híbrido de esta línea de trabajo se justifica porque, para diagnosticar la salud estructural de un elemento, no es suficiente con tener un registro del estado superficial (menos relevante), si no que se debe monitorizar lo que esté sucediendo en el interior del elemento.

Por otro lado, se debe señalar que el concepto “híbrido” surge de la combinación de las dos estrategias (superficial y embebida) de forma independiente y diferenciada, siendo la información de ambas procesada en conjunto de forma posterior. Es decir, se tendrían dos circuitos impresos distintos sobre la misma pieza.

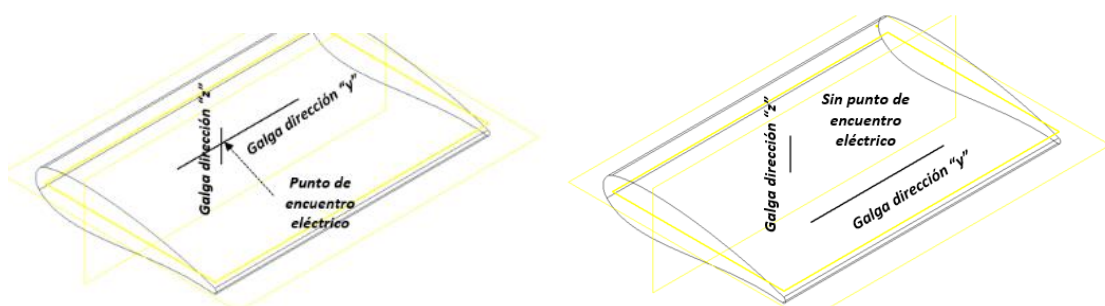


Figura 18. Diferentes aproximaciones dentro del enfoque híbrido: con interconexión de las pistas (izquierda) y sin interconexión entre ellas (derecha)

3.1.5 T1.5. ESTRATEGIAS DE DISEÑO

En esta tarea se han desarrollado unas guías de diseño generales para la integración de electrónica estructural en componentes desarrollados mediante fabricación aditiva. Para ello, se han tenido en cuenta tanto criterios propios del diseño para fabricación aditiva que aseguren la integridad mecánica de los sustratos como los relativos a la deposición de las pistas conductoras sobre objetos tridimensionales.

3.1.5.1 Criterios de diseño para piezas 3D

En lo referente a la fabricación de piezas tridimensionales mediante impresión 3D existen ciertas directrices para poder obtener piezas con una calidad elevada evitando los defectos que pueden surgir a raíz de un diseño inadecuado. Por ello es importante tener en cuenta las limitaciones de fabricación y adaptar el diseño en la medida de lo posible para minimizarlas y obtener una pieza impresa con buena calidad y buenas propiedades mecánicas y superficiales.

Existen unas directrices generales que es necesario tener en cuenta, como:

- Evitar voladizos en la medida de lo posible sin material soporte o, en caras desplomadas, evitar ángulos menores de 45º sin utilizar soporte, ya que el material se puede descolgar y quedar una mala superficie.
- El espesor de pared depende de la tecnología de fabricación aditiva utilizada, siendo una recomendación general el diseño de paredes con espesores mayores de 0,8 mm (espesor base que puede imprimirse mediante todos los procesos de fabricación aditiva).
- El espesor de capa aportada de material tiene una gran influencia en el nivel de detalle que se puede conseguir y en el tiempo de fabricación. Para obtener piezas con un nivel de detalle alto es necesario reducir el espesor de capa tanto como sea posible, aunque esto hace que sea necesario aportar un mayor número de capas para generar la pieza, incrementándose así el tiempo de proceso.
- También es necesario orientar adecuadamente la pieza para su fabricación de tal forma que se minimicen los soportes necesarios, se ahorre material, se obtengan mejores tolerancias, los acabados sean mejores y se minimicen las deformaciones geométricas.
- Otros casos más específicos son, por ejemplo, cuando se trata de realizar piezas con agujeros circulares evitando utilizar soporte. Este tipo de geometrías podrían ser necesarias para fabricar piezas con canales internos para deposición de tintas (electrónica embebida).
- Otra geometría que podría ser necesaria para las aplicaciones analizadas en este proyecto son las roscas. Estos elementos presentan ciertas particularidades respecto a su fabricación por impresión 3D: las limitaciones actuales de la tecnología impiden imprimir roscas de alta

precisión, siendo necesario orientar la pieza de tal forma que las roscas estén siempre en la dirección de fabricación para obtener una mayor calidad de impresión.

- En el caso de querer fabricar por impresión 3D una pieza con alojamientos para la colocación de componentes electrónicos es importante que ese alojamiento tenga un tamaño y una profundidad adecuada, permitiendo la colocación del componente sin ejercer presión, por lo que hay que valorar la sobremedida del alojamiento en función de cada tecnología de fabricación para cada componente si se desea crear el alojamiento directamente durante la fabricación de la pieza y no en un proceso de mecanizado posterior.
- En el caso de procesos en los que pueda pausarse la fabricación para introducir el componente electrónico y dispensar tinta en capas intermedias de la pieza para posteriormente reanudar la fabricación quedando tanto componente como pistas embebidas, es necesario ajustar el alojamiento a la geometría del componente con mucho detalle para evitar que la tinta se cuele entre componente y alojamiento, ya que se produciría una discontinuidad que haría que la conductividad eléctrica fallase quedando la pieza inservible. Si se considera adecuado se puede fijar el componente mediante adhesivo rellenando con éste los posibles espacios entre componente y el material de la pieza. Si el espesor de tinta aportado es alto, también es importante el uso de estos surcos para evitar que la tinta sobresalga de los límites geométricos de la pieza.

3.1.5.2 Criterios de diseño para impresión de pistas conductoras

Podemos enumerar los siguientes criterios:

- El primer criterio a tener en cuenta para conseguir una buena funcionalización electrónica es buscar la simplificación de la geometría de la pieza sustrato. Si se puede simplificar la geometría sobre la que posteriormente se va a depositar la tinta se obtendrá una mejor calidad y se facilitará el proceso de impresión.
- En piezas cuya geometría es compleja, con aristas pronunciadas, agujeros, escalones, etc., que puedan complicar los procesos de deposición, se considera necesario realizar una evaluación individualizada para desarrollar la mejor estrategia de impresión para la pieza. Por ejemplo, en el caso de aristas vivas en primer lugar se debe analizar la posibilidad de redondear la zona siempre que no tenga relevancia en la geometría de la pieza. De no ser posible evitar aristas vivas, será importante reducir la velocidad de pasada (o incrementar la frecuencia de eyección) en esa zona para aportar una mayor cantidad de tinta, asegurando que la tinta se deposita sobre la arista recubriéndola sin que se produzca un corte en el trazado.
- Normalmente en procesos de impresión 2D los cabezales deben imprimir en posición vertical y perpendicular al sustrato ya que si se girasen y perdiesen la posición vertical

podría entrar aire por los inyectores produciendo defectos en la eyección de tinta, pérdida de la purga del circuito e incluso deterioro de la tinta dentro del cabezal, con lo que sería necesario detener el proceso y realizar una limpieza en profundidad del sistema. Para imprimir sobre piezas tridimensionales se sigue esta misma norma, pero, aunque el cabezal esté en posición vertical, se permite cierto ángulo con la superficie que se va a imprimir. Este ángulo debe ser grande para permitir que el cabezal se acerque tanto como sea posible a la pieza y evitar aumentar la distancia pieza-cabezal y por consiguiente perder calidad de impresión. La gran ventaja de los equipos de cinco ejes de movimiento como el que se utiliza en este proyecto es que permiten orientar la pieza de forma adecuada para su impresión manteniendo el cabezal en posición vertical.

- Otro criterio a tener en cuenta para la impresión de pistas conductoras sobre elementos tridimensionales fabricados por impresión 3D es la selección de tecnología de impresión en función del acabado superficial de la pieza o la adecuación de ese acabado para poder imprimir sobre ella. Normalmente en piezas elaboradas mediante fabricación aditiva el acabado superficial no es muy bueno, presentan una rugosidad elevada y en ocasiones es necesario realizar un tratamiento superficial previo a la impresión, sobre todo en piezas realizadas por FDM ya que el salto entre capas es bastante elevado y esto puede producir cortes en las pistas con lo que no conducirían la electricidad. Acabados como el pulido, ya sea mecánico o químico, mejoran notablemente la calidad de impresión obtenida sobre la pieza.
- Parámetros como la viscosidad y otras características reológicas de la tinta influyen notablemente en la conductividad obtenida una vez depositada y curada, ya que si se utiliza una tinta muy fluida eyectada mediante Ink-Jet el espesor de tinta aportado puede variar entre $1\mu\text{m}$ y $3\mu\text{m}$, por lo que relieves o porosidades mayores pueden producir discontinuidades en la impresión haciendo que no se conduzca la electricidad con lo que la pieza quedaría inservible. En el caso de imprimir con Aerosol Jet, el espesor puede ser inferior a $1\mu\text{m}$ por lo que la calidad superficial y rugosidad tiene todavía mayor relevancia que para imprimir mediante Ink-Jet.
- Conviene tener en cuenta el ancho mínimo de pista que se puede imprimir obteniendo continuidad y la separación mínima entre pistas impresas que garantiza la ausencia de contacto entre ellas. Para esto influyen diferentes parámetros como la tinta, la tensión superficial del material sobre el que se va a imprimir, el acabado superficial y rugosidad, etc.
- Otro parámetro a tener en cuenta a la hora de diseñar un trazado de pistas sobre una pieza es la longitud de las pistas depositadas ya que, aunque las tintas a utilizar tienen partículas conductoras, la resistencia eléctrica obtenida en estas pistas es superior a la de un cable de material conductor, por lo que será un valor a tener en cuenta a la hora del trazado, tratando de utilizar la menor longitud de pista posible, aprovechando para ello la libertad que aporta el poder depositar tinta con un equipo de 5 ejes sobre las piezas

tridimensionales, eligiendo el trazado más adecuado para ello. Respecto a la resistencia eléctrica de las pistas y su relación con su longitud, tiene importancia el tipo de señal eléctrica que se quiere hacer pasar por estas pistas.

- Respecto a la utilización de componentes electrónicos de montaje superficial para su colocación en la pieza es importante evaluar en qué parte se pueden colocar, seleccionando para ello zonas lisas que permitan que tanto la base del componente como sus pads de conexión estén en contacto con la superficie de la pieza para así conseguir una fijación más robusta. El conexionado ha de realizarse utilizando adhesivo conductor ya que la mayoría de las tintas conductoras no se pueden estañar y el material de las piezas normalmente no soporta las temperaturas necesarias para ello.

3.2 HITO 2. DESARROLLO DE PROCESOS PARA ELECTRÓNICA ESTRUCTURAL SUPERFICIAL

3.2.1 T2.1 PLANIFICACIÓN DE EXPERIMENTOS Y DISEÑO DE PIEZAS

3.2.1.1 Metodología

A la hora de plantear el diseño de experimentos para la deposición INK-JET en 5 ejes sobre sustratos con geometrías complejas, se da la circunstancia de que los parámetros operativos estrictamente inherentes al proceso de deposición de la tinta podrían poseer una influencia cruzada con los asociados al movimiento del cabezal y seguimiento de las trayectorias predefinidas para las pistas en 5 ejes. El hecho de depositar pistas conductoras con tal libertad de movimiento ya constituye en sí mismo un campo de ensayos con sus variables asociadas (comportamiento de la tinta, variabilidad en las distintas zonas, seguimiento de trayectorias en zonas complejas, etc.) y no conviene confundir los efectos con los asociados a la expulsión de la tinta desde el cabezal.

Por tanto, para plantear el trabajo, se divide la aproximación experimental en dos líneas de actuación bien diferenciadas:

- a) Estudios relativos a la estrategia de deposición en 5 ejes, seguimiento de geometrías complejas, teniendo en cuenta el diseño de sustratos y la ingeniería en 5 ejes.

En lo que se refiere al diseño de sustratos, uno de los principales aspectos que se pretende investigar en el proyecto son las limitaciones de la impresión electrónica sobre superficies complejas (aristas, voladizos, cavidades, etc.). En este sentido, es fundamental diseñar una pieza modelo que contenga la mayor cantidad de posible de accidentes geométricos que permita simular una gran variedad de situaciones con potenciales problemas de trayectoria y deposición. Igualmente, se debe diseñar el trazado de las pistas a depositar. Los diseños realizados se muestran en los siguientes apartados.

En relación con la ingeniería 5 ejes, una vez diseñada la pieza modelo se debe definir una primera trayectoria que permita realizar la deposición del trazado de pistas diseñado

teniendo en consideración las características geométricas del soporte. En este sentido, es importante tanto la trayectoria de movimiento como el ajuste de la distancia entre el cabezal y la pieza (gap). Esta primera trayectoria teórica se debe ensayar en el equipo sobre las piezas sustrato para ir realizando todas las modificaciones de parámetros que permitan una deposición adecuada de las tintas. Estas actividades se detallan en los siguientes apartados.

- b) Estudios relativos a los parámetros operativos de influencia en la deposición de tintas conductoras. Se analizará la influencia de la modificación de los parámetros de proceso sobre la deposición superficial de tintas. El equipo PJ15X tiene integrado un cabezal que permite aplicar microdepósitos precisos, y se pueden controlar estos parámetros:
- Temperatura del calefactor.
 - Presión de inyección.
 - Ajustes de apertura de la válvula: tiempo apertura de válvula (milisegundos), tiempo entre depósitos (milisegundos), número de depósitos que la válvula efectúa por ciclo de activación, perfila subida y bajada de la señal de accionamiento (voltaje de cierre carrera, velocidad de apertura, velocidad de cierre)

Una vez optimizada la trayectoria de deposición sobre la pieza sustrato, se analizará la influencia de estos parámetros de proceso sobre la calidad de la deposición.

3.2.1.2 Diseño de sustratos

Se ha definido la geometría de las piezas para realizar las pruebas de validación, teniendo en cuenta las estrategias de diseño para piezas tridimensionales elaboradas mediante fabricación aditiva. Uno de los principales aspectos que se pretenden investigar en el proyecto son las limitaciones de la impresión electrónica sobre superficies complejas (aristas, curvaturas, ángulos, cavidades, etc.). Por este motivo, se ha optado por realizar el diseño de una pieza tridimensional con todo tipo de geometrías complejas al objeto de investigar la influencia de los parámetros de proceso en los resultados de deposición. El diseño de la pieza modelo se ha realizado con SOLIDWORKS, exportando el diseño a formato .STP para poder importarlo en el software MOTION 3D de NEOTECH. Para el diseño se han tenido en cuenta las diferentes geometrías que se quieren evaluar en este proceso de deposición de tinta y las limitaciones geométricas de fabricación aditiva de las piezas modelo.

Se han considerado los criterios de diseño de piezas para fabricación aditiva que permiten la fabricación de la pieza tridimensional sin la necesidad de utilizar material soporte. Así, la posible limitación del proceso será por limitaciones en la deposición de tinta y no por limitaciones en la fabricación de la propia pieza tridimensional mediante tecnologías de fabricación aditiva.

La pieza modelo tiene unas medidas de 35mm x 36.5mm x 42mm con la geometría que se muestra en las siguientes imágenes. Como puede apreciarse, la pieza modelo cuenta con diferentes aristas

para validar los posibles cortes en las pistas depositadas sobre su superficie, así como curvaturas cóncavas y convexas, bisel a 45º y diferentes geometrías particulares que servirán para la validación de la deposición de tintas sobre esta pieza. Una vez diseñada la geometría de la pieza modelo se ha realizado el diseño de las pistas a depositar, considerando que este diseño permita estudiar el proceso de deposición sobre todas las geometrías consideradas.

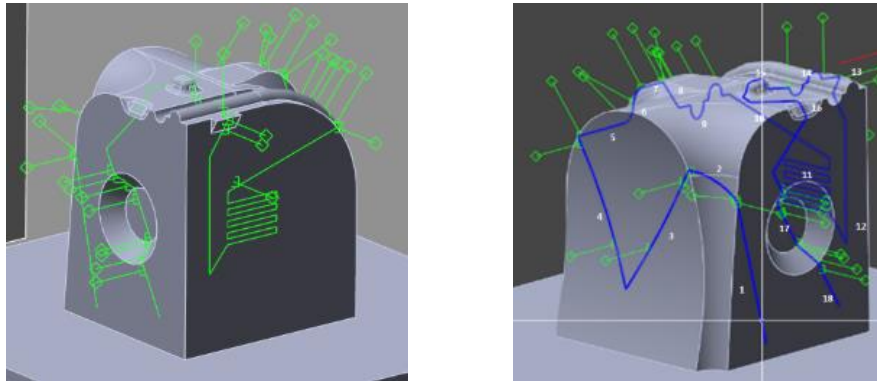


Figura 19. Vistas del diseño de las pistas sobre la pieza modelo

3.2.1.3 Diseño de utillajes

La fijación de las piezas diseñadas como sustrato para las pruebas de deposición (tareas 2.4 y 2.5) a la base del sistema de deposición requiere el diseño de utillaje a medida. Dicho utillaje consiste en una plataforma conectada con el equipo sobre la que se ubica la pieza sustrato. El sistema de sujeción de la pieza se ha diseñado también utilizando Solidworks y se ha fabricado por técnicas de fabricación aditiva.

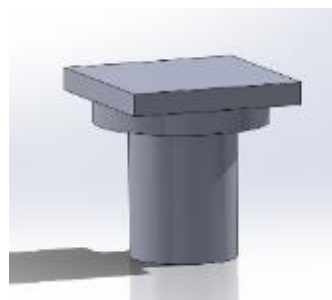


Figura 20. Versión inicial del soporte para las piezas.

La funcionalidad de este sistema de anclaje para las piezas se ha validado durante las primeras pruebas experimentales en máquina, comprobándose que era necesario un rediseño para mejorar las actividades de posicionado y referenciado. Así, se ha generado un segundo diseño de utillaje de soporte con un relieve que coincide con el contorno base de la pieza. Este segundo diseño ha mejorado las condiciones de referenciado y posicionamiento pero, de nuevo en las pruebas experimentales, se ha comprobado que presentaba algunas deficiencias en cuanto al correcto agarre de las piezas modelo. Por lo tanto, se ha generado un tercer diseño de utillaje de soporte

que permita mejorar este agarre y facilitar el movimiento y el acceso del cabezal de impresión a determinadas zonas. Para ello, se han incluido dos orificios para facilitar la inclusión de tornillos de sujeción, y se ha rebajado uno de los bordes externos.

3.2.1.4 Selección de tintas

En la Tabla 13 se indican las características de las tintas seleccionadas para estudio dentro del proyecto. Como se puede observar, hay 4 tintas aptas para la impresión ink-jet y 3 tintas específicas para impresión por aerosol. De las 4 tintas ink-jet, se han seleccionado dos conductoras (Dycotec DM-SIP-3100S y Henkel Wik 20487), una resistiva (Gwent Carbon C2030519P4) y una dieléctrica (J+S UV Supraflex 390119). En el caso de las tintas aerosol, hay una conductora (Clariant Prelects TPS), una resistiva (Novacentrix JR-700 Carbon Ink) y una dieléctrica (UTDots Inc. Nano-silica epoxy ink).

Tabla 13. Tintas funcionales

Material/Referencia	Tipo de tinta	Proceso
Dycotec DM-SIP-3100S	Conductora	Ink-Jet
Henkel Wik 20487	Conductora	Ink-Jet
Gwent Carbon C2030519P4	Resistiva	Ink-Jet
J+S UV Supraflex 390119	Dieléctrica	Ink-Jet
Clariant Prelects TPS	Conductora	Aerosol
Novacentrix JR-700 Carbon Ink	Resistiva	Aerosol
UTDots Inc. Nano-silica epoxy ink	Dieléctrica	Aerosol

Como ha sido descrito, anteriormente se habían realizado pruebas de deposición con estas tintas sobre probetas planas de distintos materiales y con varios tratamientos superficiales, llevando a cabo ciertos ensayos de validación para comprobar la calidad de la deposición. A continuación, se resumen las principales conclusiones obtenidas:

- Pruebas de adhesión.

En función de la tinta empleada:

- HENKEL WIK, J+S UV Supraflex y UTDots: buena adhesión sobre todos los sustratos.
- DYCOTEC: buena adhesión en general, aunque sobre cerámica y poliamida con mecanizado superficial se produce una ligera adhesión a la cinta en algunos puntos quizás por exceso de tinta.
- GWENT: adhesión bastante mala salvo en Nylon, acero inoxidable con una capa de dieléctrico J+S Supraflex, Poliamida y Alumide granallados con vidrio, y Poliamida mecanizada.
- CLARIANT: buen comportamiento salvo en el caso de poliamida sin tratamiento y con mecanizado superficial.
- NOVACENTRIX: problemas de adhesión sobre prácticamente todos los materiales y tratamientos superficiales.

En función del sustrato soporte:

- INOX: todas las tintas presentan buena adherencia, independientemente del tratamiento superficial. Por lo tanto, no se considera necesario aplicar tratamientos superficiales sobre este material.
 - Poliamida: el granallado con vidrio (tratamiento habitual para este tipo de material) parece una opción adecuada para la mayoría de las tintas. La deposición de la tinta NOVACENTRIX requeriría tratamiento por plasma.
 - Alumide: el granallado con vidrio parece una opción adecuada para la mayoría de las tintas. La tinta NOVACENTRIX no adhiere sobre este sustrato, independientemente del tipo de post-tratamiento empleado.
 - Vero White: el granallado con vidrio parece la opción más adecuada. Las tintas GWENT y NOVACENTRIX no adhieren sobre este sustrato.
 - Nylon: el granallado con vidrio parece una opción adecuada para la mayoría de las tintas. La tinta NOVACENTRIX no adhiere sobre este sustrato, independientemente del tipo de post-tratamiento empleado.
 - Alúmina: únicamente las tintas HENKEL WIK, CLARIANT, J+S y UTDOTS presentan adherencia sobre este sustrato.
- Pruebas de conductividad.
- HENKEL WIK y DYCOTEC: resultados buenos y bastante uniformes, no teniendo una gran influencia el material sobre el que se ha depositado la tinta.
 - GWENT: variaciones significativas en los valores de resistencia eléctrica de las pistas que pueden deberse a pequeñas variaciones en la cantidad de tinta depositada, observándose también una ligera dependencia del material sobre el que se produce la deposición.
 - CLARIANT: grandes variaciones en función del material y el tratamiento superficial; esto puede ser debido a su baja viscosidad ya que al depositarse sobre probetas con una superficie irregular no se obtiene una deposición uniforme.
 - NOVACENTRIX: comportamiento similar a la GWENT pero con menor índice de repetibilidad; no se considera una tinta con la que se puedan obtener valores repetibles de forma adecuada controlando la cantidad depositada.

Teniendo en cuenta estos aspectos:

- HENKEL WIK: parece la tinta más apropiada para esta aplicación, aplicando granallado con vidrio sobre los sustratos que lo requieran para mejorar la adherencia.
- DYCOTEC: buen comportamiento en general (ciertos problemas de adherencia sobre alúmina), aplicando granallado con vidrio sobre los sustratos que lo requieran para mejorar la adherencia.

- GWENT: las pruebas de adhesión y conductividad parecen limitar los sustratos a Nylon, Poliamida, Alumide y acero inoxidable granallados con vidrio.
- CLARIANT: a pesar de que las pruebas de adhesión son satisfactorias, se producen grandes variaciones en las medidas de conductividad.
- J+S UV Supraflex y UTDots: buena adhesión sobre todos los sustratos, independientemente del postratamiento.
- NOVACENTRIX: malos resultados tanto en adherencia como en conductividad. No se considera apropiada en las condiciones estudiadas.

Los experimentos de deposición en máquina sobre la pieza modelo se realizan con aquellas tintas que han presentado buenas condiciones en las pruebas realizadas sobre probetas.

INK-JET:

- Tintas conductoras HENKEL y DYCOTEC: ensayar sobre todos los materiales sustrato, aplicando en aquellos materiales que lo permiten post-tratamiento por granallado con vidrio.
- Tinta dieléctrica J+S: ensayar sobre material metálico (el único que necesita en principio la capa de material dieléctrico de manera previa a la deposición de la tinta conductora).
- Tinta resistiva GWENT: muy baja adhesión y conductividad sobre la mayoría de sustratos. Se ensayará para el llenado de los canales internos pero, de momento, se descarta para las aplicaciones de electrónica superficial.

AEROSOL:

- Tinta conductora CLARIANT: ensayar sobre todos los materiales sustrato, aplicando en los materiales que lo admiten post-tratamiento por granallado.
- Tinta NOVACENTRIX: los malos resultados obtenidos sobre probetas planas en cuanto a adherencia y conductividad desaconsejan su utilización sobre geometrías más complicadas.
- Tinta dieléctrica UTDots: ensayar sobre material metálico.

3.2.2 T2.2 INGENIERÍA DE FABRICACIÓN EN 5 EJES

3.2.2.1 Consideraciones generales y calibración del equipo

El equipo de deposición de tintas conductoras NEOTECH PJ15 X dispone de 5 ejes de movimiento, por lo que puede seguir trayectorias complejas que impliquen el giro de la pieza en los ejes A y C.

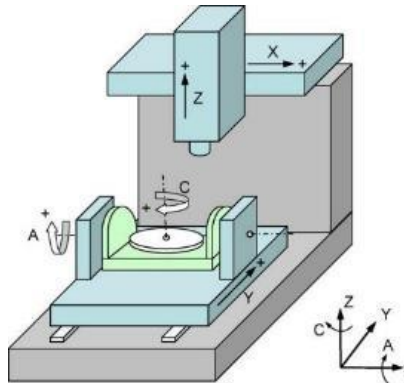


Figura 21. Esquema de trabajo en 5 ejes

Para poder enviar trayectorias a la máquina, normalmente desde un sistema CAD/CAM, se necesita que este sistema y la máquina trabajen desde el mismo sistema de coordenadas. De este modo, los cambios y ajustes que se realicen en dichas trayectorias se verán reflejados fielmente en la trayectoria que la máquina hace en realidad. En el caso particular del equipo de impresión NEOTECH, previamente a cualquier trabajo, los ejes realizan una calibración en la que llegan a cada final de carrera ajustando el cero máquina para comenzar el trabajo en posición adecuada. Para realizar la comprobación de que los ejes están ajustados con precisión se ha utilizado un reloj comparador y programas sencillos que permiten comprobar que la trayectoria real está tan cerca de la teórica como se necesita. Adicionalmente, es necesario ajustar en el software tanto el “cero” del programa como la posición de la pieza. La pieza se debe posicionar en el software en la misma posición en la que se va a montar en el equipo para así tenerla referenciada ya que, a diferencia de otros equipos de fabricación en 5 ejes, el equipo NEOTECH no cuenta con sistemas de ayuda al posicionamiento ya sea mediante palpación u óptico.

Una vez realizado este procedimiento, se realiza un ciclo de prueba en la máquina para corroborar que está todo posicionado de forma adecuada. Este ciclo se realiza a velocidad reducida para detectar posibles colisiones entre cabezal de deposición y pieza y reajustar el proceso y la trayectoria si esto ocurriese.

3.2.2.2 Directrices para trayectorias de deposición en equipos con movimiento en 5 ejes

Mediante el sistema de movimiento en 5 ejes se permite un seguimiento de trayectorias sobre superficies de geometría compleja, lo que amplía las capacidades de deposición en electrónica estructural. Para una deposición adecuada de tintas es necesario acercar el cabezal de deposición

a una distancia de entre 1mm y 3mm de la pieza y mantener la orientación de la pieza de tal forma que la superficie esté lo más perpendicular posible al cabezal de deposición.

En función del cabezal a utilizar será necesario modificar las partes de la trayectoria en las que, debido a la geometría de la pieza, no sea posible mantener la perpendicularidad entre pieza y cabezal por lo que habrá que aumentar la separación o variar el ángulo entre pieza y cabezal. Esto se debe valorar en cada variación geométrica de la pieza, teniendo en cuenta las dimensiones del cabezal para ajustar la trayectoria y mantener la distancia mínima posible, siempre del lado de la seguridad para evitar que pieza y cabezal contacten.

En el caso de cambios de altura importantes, ranuras o geometrías que no permitan que el cabezal mantenga un gap y orientación adecuados ya sea por sus dimensiones o porque, debido a la geometría de la pieza, no es posible acceder a su superficie, no se podrá realizar la deposición de tintas de forma adecuada para obtener continuidad en las líneas impresas. En el caso de pequeños resaltes o variaciones superficiales aumentando el gap y, de ser necesario, aumentando la cantidad de tinta eyectada sobre esa geometría, se puede conseguir continuidad en alguna zona concreta, teniendo que evaluar previamente cada geometría y realizar un diseño de trayectoria en concordancia.

El equipo Neotech PJ15X permite el uso de diferentes cabezales, tanto de deposición como de curado. Para cada uno de ellos y para cualquier nuevo cabezal que se pretenda añadir, será de gran importancia valorar las velocidades y distancias entre pieza y cabezal necesarias para así generar la trayectoria óptima para su utilización.

3.2.2.3 Definición de trayectoria para pieza modelo

Una vez determinadas las consideraciones generales, se ha definido la trayectoria que deberá realizar el sistema de deposición para poder eyectar tinta de forma controlada sobre la superficie de la pieza. Para el diseño de las trayectorias se utiliza el software Motion 3D desarrollado por Neotech-AMT. Se trata de un software CAD/CAM que permite el diseño y simulación de las trayectorias de deposición sobre la pieza en un sistema de movimiento de 5 ejes.

En la siguiente imagen puede apreciarse el diseño de pistas sobre la pieza tridimensional que se ha realizado para evaluar así la deposición de tintas sobre su superficie.

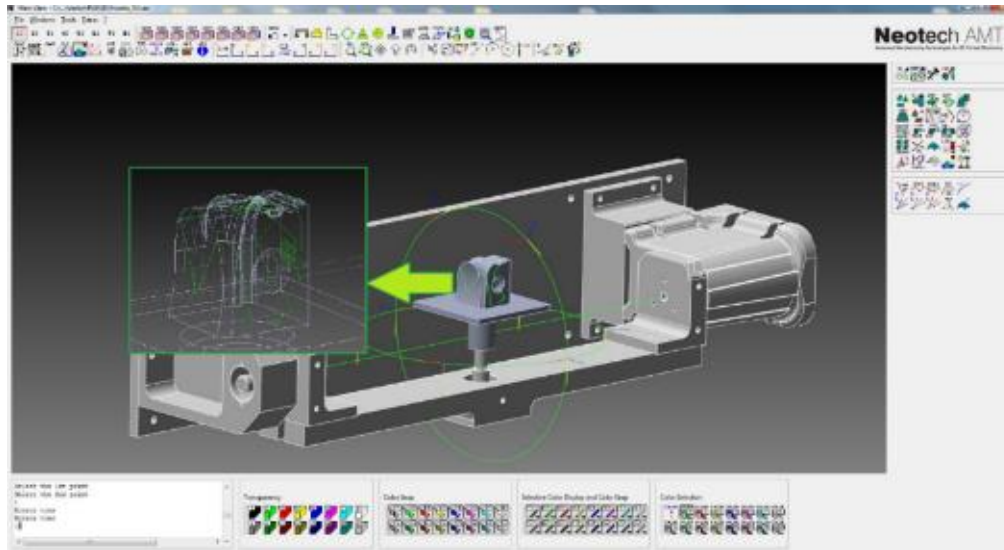


Figura 22. Diseño de pistas sobre pieza tridimensional.

La orientación del cabezal respecto a la pieza es un aspecto clave ya que, para una correcta deposición, idealmente tiene que estar perpendicular a la superficie donde se desea depositar la tinta. Esto no siempre es posible ya que, debido a la curvatura de la pieza y al tamaño del cabezal de deposición, hay zonas en las que no es posible conseguir esa perpendicularidad. En estas zonas problemáticas es necesario dotar al cabezal de un ángulo que permita el dispensado de tinta de forma adecuada. En este sentido, es necesario comunicar al software cuál es la dirección que se desea que tome la herramienta en cada cara a depositar, así se evitan problemas de interferencia con la pieza.

Para realizar estas actividades se emplean las líneas de orientación, que indican la orientación que ha de tener la herramienta en cada punto para así poder seguir la trayectoria de las pistas diseñadas sin colisionar con la pieza y depositando la tinta con un ángulo lo más cercano a 90º posible. Se han realizado numerosas iteraciones ajustando la trayectoria y el posicionado mediante líneas de orientación hasta observar que no existe contacto en ningún momento entre cabezal y pieza y que la distancia entre el cabezal y la superficie a depositar es adecuada. En la siguiente imagen puede verse la trayectoria de deposición deseada en color azul y las líneas de orientación partiendo de esa trayectoria con diferentes orientaciones en cada zona.

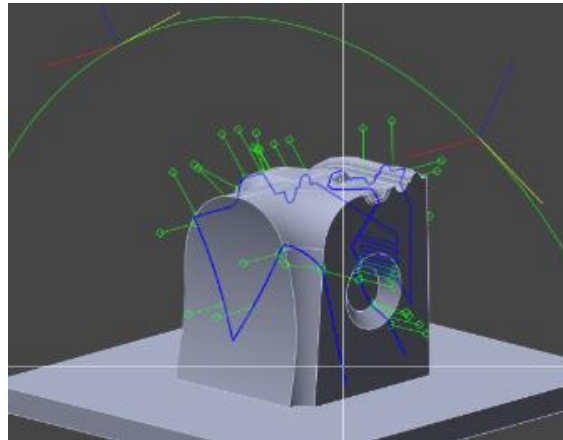


Figura 23. Trayectoria de deposición de tinta y líneas de orientación.

Una vez comprobado en la simulación que las trayectorias y orientaciones son adecuadas se han realizado varias pruebas sobre la máquina en vacío (sin deposición) utilizando el modelo de pieza sustrato. Con cada prueba se han observado pequeñas variaciones que podrían optimizar la trayectoria de la herramienta por lo que se han realizado diversas iteraciones y modificaciones en las líneas de orientación hasta obtener una trayectoria adecuada en la máquina, preparada para realizar pruebas reales de deposición.

3.2.2.4 Implementación de tecnología FDM en 5 ejes

La tecnología FDM en 5 ejes permite depositar material fundido sobre geometrías tridimensionales. En el caso del cabezal extrusor FDM, cuando se realicen trayectorias en 5 ejes para depositar material fundido sobre superficies no uniformes, es necesario mantener un gap de 0,1 mm entre la superficie sobre la que se va a depositar y cabezal de extrusión. Por ello, es muy importante un correcto posicionado de la pieza para minimizar errores y evitar cambios bruscos de altura, aristas o geometrías que impidan el seguimiento de la trayectoria que se desea depositar de material fundido sobre la pieza; si el gap supera 0,1mm no se puede depositar, lo que limita en parte las geometrías posibles mediante esta tecnología.

En el caso de esta tecnología, el ángulo de giro del cabezal respecto a la pieza es muy limitado, influyendo la pérdida de perpendicularidad que puede ser necesaria para seguir alguna geometría en un empeoramiento de la calidad de la deposición mediante FDM.

Para valorar las capacidades de esta tecnología junto con el movimiento en 5 ejes se han realizado varias pruebas de fabricación de la pieza modelo diseñada en la tarea T2.1 en el equipo Neotech PJ15X sobre una superficie. Como se ha indicado anteriormente, esta pieza dispone de diversos accidentes geométricos que permiten estudiar las capacidades de la tecnología 5 ejes para la fabricación de determinadas geometrías constructivas. Se han realizado varios ensayos variando parámetros de fabricación (temperaturas, velocidades y alturas de capa) hasta que se ha conseguido la reproducción completa de la geometría de la pieza modelo con un buen acabado. Como se puede observar, en las primeras fabricaciones no se conseguía obtener una reproducción

adecuada de la superficie superior de la pieza modelo, en la que se presentan la mayoría de los accidentes geométricos. Sin embargo, la modificación de parámetros de fabricación ha permitido mejorar considerablemente los resultados, reduciendo los defectos superficiales que se generaban en las primeras iteraciones.

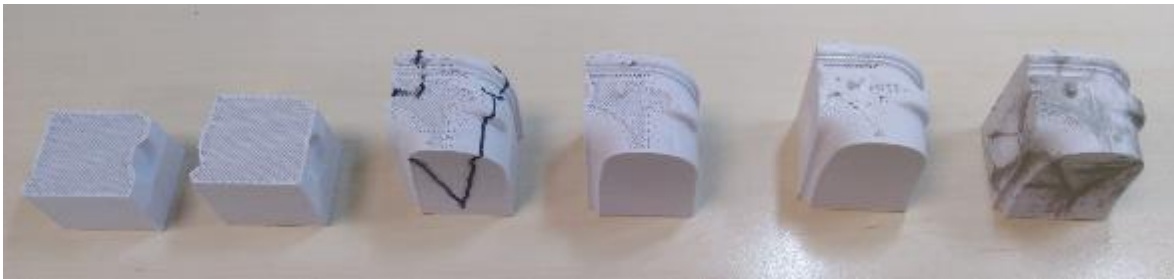


Figura 24. Ejemplos de piezas modelo fabricadas por FDM en 5 ejes

Una vez ajustados los parámetros de deposición para el material y validado el proceso en 3 ejes, se ha pasado a la fabricación de una estructura semi-cilíndrica para posteriormente depositar una geometría sobre su superficie curva, de tal forma que sea necesario un posicionado de precisión en 5 ejes con un GAP uniforme de 0,1mm. Se ha fabricado en primer lugar la pieza sobre el soporte plano y, posteriormente, sin mover la pieza, se ha realizado la deposición de la geometría tridimensional sobre su superficie. Ha sido necesario realizar varias iteraciones y ajustar la velocidad del proceso y la temperatura del cabezal para obtener resultados adecuados ya que, aunque la deposición FDM sobre 3 ejes está muy extendida, sobre 5 ejes es muy novedosa, teniendo casi nulas referencias para su enfoque inicial.

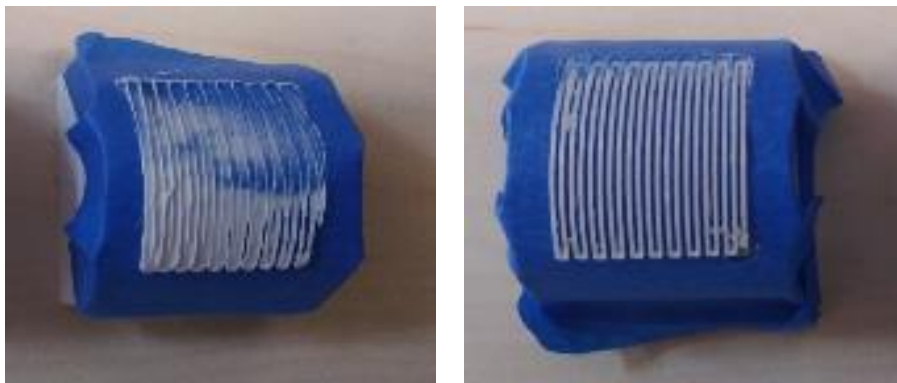


Figura 25. Pruebas de deposición de pistas sobre superficie curva con cabezal FDM. Primeras pruebas (izquierda); resultado mejorado (derecha).

3.2.3 T2.3 FABRICACIÓN DE PIEZAS Y UTILLAJES

Utilizando los equipos de fabricación aditiva disponibles en Fundación IDONIAL se han fabricado múltiples unidades de pieza modelo para realizar la investigación del proceso de deposición ink-jet sobre distintos materiales con distintas propiedades superficiales derivadas del proceso empleado para su fabricación. Las combinaciones material-proceso de fabricación han sido las siguientes:

- Tecnología Polyjet – material VeroWhite



Figura 26. Ejemplos de piezas soporte fabricadas en VeroWhite – Polyjet

- Tecnología SLM – acero inoxidable



Figura 27. Ejemplos de piezas soporte fabricadas en acero inoxidable por SLM

- Tecnología SLS –Alumide



Figura 28. Ejemplos de piezas soporte fabricadas en alumide por SLS

- Tecnología LCM – material alúmina (Lithalox). En este caso ha debido modificarse la estrategia de fabricación. La tecnología LCM está especialmente indicada para piezas de

reducidas dimensiones, con pocas concentraciones de material y sin muchas superficies en voladizo. Se realizaron varias pruebas para tratar de replicar la pieza demo con resultados insatisfactorios. Por lo tanto, se buscó una solución intermedia basada en la implementación mediante la fabricación del componente en tres segmentos diferentes, y su unión posterior mediante adhesivo. Para ello, se planteó una segunda geometría que, si bien por tamaño y forma se ajusta mucho mejor a las premisas de fabricación para tecnología LCM, sigue manteniendo algunas de las complejidades geométricas introducidas en la pieza demo original, que resulta de interés valorar. Estas son: caras inclinadas, canaladuras de sección cruzada circular, resaltes circulares en relieve, etc. El diseño del modelo 3D realizado se muestra a continuación:

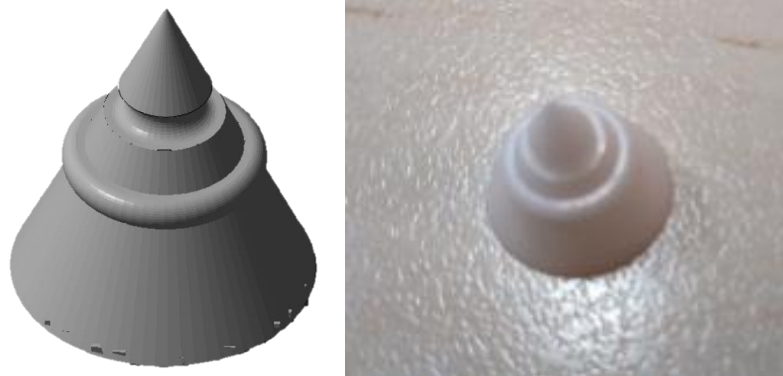


Figura 29. Diseño CAD 3D de la Pieza demo#2 de material cerámico (izquierda). Ejemplo de pieza cerámica fabricada (derecha).

Esta pieza contará con trayectorias de deposición para las pistas que recorrerán las complejidades geométricas implementadas, siendo posible analizar a posteriori el sustrato y la tinta, de forma análoga a la pieza demo#1 empleada con otros sustratos

Para cada proceso de fabricación se han definido los parámetros de proceso más apropiados. Una vez fabricadas, las piezas han sido sometidas al tratamiento superficial seleccionado en etapas previas, es decir, granallado por vidrio. Adicionalmente, se han fabricado distintas versiones de utillajes de soporte de las piezas para la deposición de tintas.

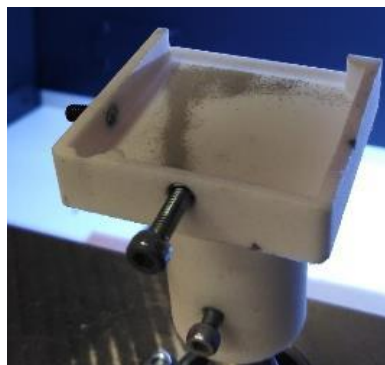
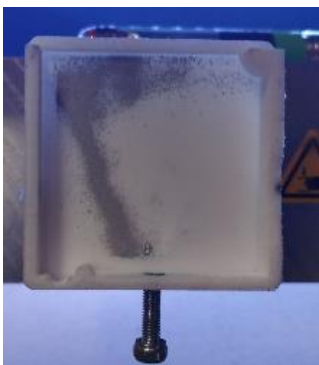


Figura 30. Diferentes soportes fabricados.

3.2.4 T2.4 INVESTIGACIÓN DE PROCESOS DE DEPOSICIÓN INK-JET

De forma previa, se estudian en detalle los parámetros de proceso propios de cada tinta. Si bien esta labor ha sido acometida de forma previa en la impresión 2D, se debe tener en cuenta que en esta ocasión se centra en una impresión 3D volumétrica, y cómo la adaptación a un sistema móvil de 5 ejes afecta a la deposición de la propia tinta. En otras palabras, el objetivo no es tanto ajustar parámetros operativos por su relación con las propiedades inherentes de la tinta (viscosidad, propiedades reológicas, etc.) si no sus propiedades dinámicas, cuando el cabezal se encuentra siguiendo trayectorias complejas previamente programadas.

3.2.4.1 Pruebas con tintas

Se planteó una batería de experimentos consistentes en la deposición controlada de dos tipos de tintas conductoras anteriormente presentadas (HENKEL y DYCOTEC), sobre cuatro sustratos diferentes obtenidos mediante diversas técnicas de fabricación aditiva, en varios materiales (poliamida, resina polimérica, compuesto de poliamida y aluminio y acero inoxidable). Adicionalmente, se ha ensayado la deposición de la tinta dieléctrica J+S sobre los sustratos metálicos (único sustrato sobre el que tiene sentido su empleo como material aislante).

Tinta Henkel y Dycotec

Primeramente, se procede a preparar las tintas. Para ello, se introduce en la jeringuilla evitando es que esta contenga bolsas de aire y se coloca en la máquina Neotech. Un punto importante es colocar el cabezal específico para esta tinta ya que es un factor clave para que salga y spraye correctamente sobre el sustrato. Seguidamente se introducen en el módulo inkjet los parámetros definidos por el fabricante.

Tabla 14. Parámetros operativos definidos para las tintas HENKEL y DYCOTEC

Ink	Henkel WIK20487-36A	Dycotec DM-SIP-3100S
Nozzle	50µm, 7mm long	100µm, flat SN: 563488
Close Voltage	107 V	107 V
Stroke	78%	80%
Open-Time	0,25ms	0,25ms
Close-Time	0,20ms	0,20ms
Cycle	12ms	12ms
Pulse	0,42ms	0,43ms
Frequency	83,3 Hz	83,3 Hz
Pressure (5cc cartridge)	1,1bar	0,9bar

Temperature	46°C	35°C
Sinter	60 min/ 120°C	60 min/ 120°C

Una vez que finaliza la purga, el cabezal se limpia con disolvente para que la tinta no obstruya el orificio. Una vez realizadas estas operaciones se inicia el proceso de impresión con cada una de las tintas siguiendo las trayectorias predefinidas.

En las primeras pruebas de impresión se comprobó la necesidad de realizar ajustes sobre la trayectoria inicial, centrados en aumentar o disminuir las velocidades dependiendo de la zona en la que estuviera el cabezal. En el caso de la tinta HENKEL, en la *Figura 31* puede verse cómo hay zonas en las que hay tinta acumulada, partes en las que la tinta está difuminada, y tramos en los que no hay tinta.

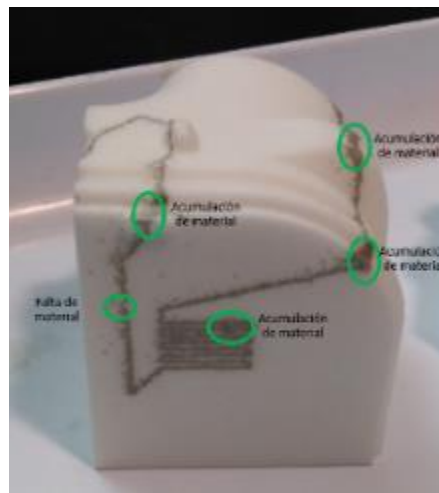


Figura 31. Defectología presente con la tinta HENKEL en las primeras pruebas de impresión

Tras realizar la desposición de la tinta Henkel WIK con los parámetros facilitados por el fabricante y con la finalidad de optimizar la calidad de la deposición de tinta para así conseguir una mejor definición de línea, se realizó una batería de iteraciones con la finalidad de optimizar los parámetros del proceso Piezo Jet con esta tinta.

El gap entre el extremo del cabezal de deposición y el sustrato fue el primer parámetro a ajustar ya que tiene una gran influencia en el proceso y, aunque las recomendaciones permiten un rango de variación de unos 2mm esto afectaría a la calidad del proceso, obteniendo variaciones indeseadas. Por ello, partiendo de un gap de 1mm, se han realizado iteraciones en el proceso de seguimiento de la trayectoria sobre las piezas, piezas que como puede comprobarse presentan una superficie compleja, con resaltes, cambios de curvatura, aristas, etc., que dificultan en gran manera la realización de un seguimiento con un gap tan reducido, produciéndose interferencias entre cabezal y pieza en algunas zonas, por lo que fue necesario ir ampliando el gap y realizando pruebas de seguimiento hasta garantizar que no existe ningún punto de interferencia entre pieza y cabezal.

Partiendo de este valor mínimo, se han realizado pruebas de deposición con la tinta Henkel WIK, modificando los parámetros de presión de aire del sistema, así como las velocidades de desplazamiento, tanto en vacío como durante el proceso de impresión. En la Tabla siguiente pueden verse las diferentes pruebas de ajuste y optimización de parámetros realizadas con esta tinta.

Tabla 15: resultados optimizados para tinta Henkel WIK

WIK	Presión	Rapid Querride	Feedrate	Info
	3	120	120	Sale poca tinta
3,5	120	120	Tinta uniforme	
4	140	140	Tinta uniforme, óptima	
4,5	140	140	Tinta uniforme	
4,5	180	180	Tinta fina, adecuada	
4,5	30	50	Tinta gruesa, adecuada	

Para la tinta Dycotec DM SIP fue necesario el uso de otro cabezal con un tamaño de inyector mayor, ya que utilizando el cabezal de 50µm no se ha conseguido realizar la deposición de la tinta sobre la superficie de las piezas. Para verificar que la tinta no podía ser eyectada utilizando esta boquilla se realizaron varias iteraciones modificando la presión de aire del sistema para tratar de que la tinta saliese por la boquilla, no obteniendo una deposición adecuada en ninguna de las iteraciones realizadas. Una vez comprobado que no se eyectaban más que gotas sueltas de tinta utilizando la boquilla de 50µm, se ha pasado a optimizar la eyección con la boquilla de 100µm, que a priori era la adecuada para esta tinta. Para ello, en primer lugar, se realizaron unas pruebas de eyección a diferentes alturas, de una forma similar a las realizadas para la tinta Henkel Wik, y obteniendo resultados similares en valores de gap necesario para la deposición, por lo que el gap a utilizar va a ser similar para las dos tintas.

Se realizaron entonces una sucesión de pruebas variando la presión de aire del sistema y modificando las velocidades de movimiento durante la eyección y en vacío hasta obtener la mejor calidad posible de deposición. Los resultados pueden verse en la siguiente tabla.

Tabla 16: deposición de tinta DYCOTEC DM SIP con boquilla de deposición de 100µm

	Presión	Rapic Querride	Feedrate	Info
DYCOTEC Nozzle 100µm, flat SN: 563488	2,5	30	30	Sale mal la tinta
	3	30	30	Sale mal la tinta
	3,5	30	30	Sale mal la tinta
	4	30	30	Sale mal la tinta
	4,5	30	30	Sale mal la tinta
	2,5	50	50	Sale mal la tinta
	3	50	50	Sale mal la tinta
	3,5	50	50	Sale mal la tinta
	4	50	50	Sale mal la tinta
	4,5	50	50	Sale mal la tinta
	0,5	30	30	Cae demasiada cantidad
	1	30	30	Cae demasiada cantidad
	0,5	50	50	Cae demasiada cantidad
	0,9	50	50	ok

En las iteraciones, se comenzó con presiones de aire más elevadas para facilitar la eyección de tinta, pero tras no conseguir una buena salida de tinta se ajustaron presiones menores, observando cierta mejora en la eyección, hasta llegar a los valores de presión y velocidades con los que mejores resultados se han obtenido.

Pruebas tinta J+S

Los parámetros de operación utilizados para esta tinta son los mismos que para la HENKEL. Sin embargo, en el proceso de deposición se comprueba que la tinta J+S (dieléctrica) es muy líquida y arroya por la superficie del sustrato metálico llegando a cubrir zonas que estaban fuera de la trayectoria. Tras su deposición, las probetas se introducen en el equipo de luz ultravioleta durante 20min para realizar el curado. Transcurrido este tiempo, se valida que realmente la tinta aísla del sustrato. Esta validación se realiza fundamentalmente mediante la caracterización de la funcionalidad de las pistas impresas sobre sustrato metálico dado que, por ejemplo, su conductividad dependerá de la buena deposición previa del material dieléctrico.



Figura 32. Defectología presente con la tinta dieléctrica.

La tinta dieléctrica J+S UV Supraflex es pues una tinta de baja viscosidad, lo que ha dificultado su eyección de forma controlada utilizando el sistema PiezoJet y por consiguiente no se ha conseguido depositar líneas finas, sino que la tinta se ha eyectado en exceso perdiendo definición el patrón depositado. Al ser una tinta dieléctrica, esta particularidad no ha tenido una influencia importante dentro del presente proyecto, es más, incluso la eyección de líneas de mayor grosor ha sido una característica positiva ya que así se ha asegurado un correcto aislamiento eléctrico a las posteriores deposiciones de tinta conductora sobre piezas metálicas.

Dentro del planteamiento de deposición de esta tinta, en un primer momento se barajó la posibilidad de utilizar la boquilla de 100 μ m para conseguir así una mayor eyección de tinta sobre la pieza y mejorar el aislamiento dieléctrico, pero al comenzar las pruebas con la boquilla de 50 μ m y observar que al ser una tinta fluida la cantidad eyectada era superior, se decidió utilizar únicamente esta boquilla ya que con la de 100 μ m sería muy difícil conseguir una deposición controlada.

Respecto al gap entre cabezal y sustrato, se ha utilizado el mismo que para las tintas anteriores al no notar diferencias significativas en las pruebas realizadas debido a la cantidad de tinta eyectada, que no ha permitido ver mejoras o empeoramientos dependientes del gap.

Con la boquilla de 50 μ m se han realizado diferentes pruebas de ajuste de eyección de tinta a diferentes presiones y velocidades, siguiendo una sistemática similar a la utilizada con las otras dos tintas, como puede apreciarse en la siguiente tabla.

Tabla 17: deposición de tinta J+S UV SUPRAFLEX con boquilla de deposición de 50 μ m

	Presión	Rapic Querride	Feedrate	Info
	J+S	1	20	20
1,1		20	20	No sale tinta
1,5		20	20	No sale tinta
2		20	20	Sale mucha tinta
2,5		20	20	Sale mucha tinta
3		20	20	Sale mucha tinta
1		30	30	Spraya un poco
1,1		30	30	Sale mucha tinta
1,5		30	30	Sale mucha tinta
2		30	30	Sale mucha tinta
2,5		30	30	Sale mucha tinta
3		30	30	Sale mucha tinta
1		40	40	Spraya un poco
1,1		40	40	Sale mucha tinta
1,5		40	40	Sale mucha tinta
2		40	40	Sale mucha tinta
2,5		40	40	Sale mucha tinta
3		40	40	Sale mucha tinta
1		50	50	Sale muy difuminado
1,1		50	50	Sale mucha tinta
1,5		50	50	Sale mucha tinta
2		50	50	Sale mucha tinta
2,5		50	50	Sale mucha tinta
3		50	50	Sale mucha tinta
4		50	50	Sale mucha tinta
4,5		50	50	Sale mucha tinta
5		50	50	Sale mucha tinta
1		60	60	Sale muy difuminado
1,1		60	60	Sale bastante tinta
1,5		60	60	Sale mucha tinta
2		60	60	Sale mucha tinta
2,5		60	60	Sale mucha tinta
3		60	60	Sale mucha tinta
1,1		70	70	ok, Sale bastante tinta
1,1	80	80	ok, Sale bastante tinta	

Con una presión de 1,1bar y velocidades entre 70 y 80 en ambos tipos de movimiento se ha conseguido una deposición uniforme, pero el problema del grosor de línea continúa existiendo, por lo que se procedió a realizar un ajuste de parámetros diferente con la finalidad de reducir esa cantidad de tinta, algo que para las tintas anteriormente utilizadas no tiene sentido ya que el caudal ha sido adecuado. Por ello se procedió a realizar los siguientes ajustes de parámetros dentro del control de eyección, controlando para ello tanto los parámetros de la propia válvula piezoeléctrica PiezoJet como las velocidades del sistema. Tras su ajuste y numerosos ensayos, se ha llegado a una deposición de líneas uniforme que se ha considerado adecuada, aunque se ensancha un poco la línea debido a que la cantidad de tinta eyectada, aunque es menor que en pruebas previas, sigue siendo elevada.

Tabla 18: pruebas adicionales de deposición de tinta J+S UV SUPRAFLEX

VOLT	STROKE%	OPEN TIME	CYCLE	PULSE	FREQ	TEMP °C	PRESIÓN (BAR)	VELOCIDAD	VALORACIÓN
		CLOSE TIME							

107	78	0,25ms 0,20ms	12ms	0,42ms	83.3Hz	OFF	1	50-50	Mala definición
107	78	0,25ms 0,20ms	12ms	0,42ms	83.3Hz	OFF	0,5	50-50	Definición aceptable
107	78	0,25ms 0,20ms	12ms	0,42ms	83.3Hz	OFF	0,2	50-50	Empeora definición
107	78	0,25ms 0,20ms	12ms	0,42ms	83.3Hz	OFF	0,5	100-100	Mejora la definición
107	78	0,25ms 0,20ms	12ms	0,42ms	83.3Hz	OFF	0,5	150-150	Buena definición
107	78	0,25ms 0,20ms	12ms	0,42ms	83.3Hz	OFF	0,5	200-200	Definición óptima

A continuación, pueden apreciarse las diferencias entre los diferentes ajustes aplicados para la deposición de la tinta J+S UV Supraflex.

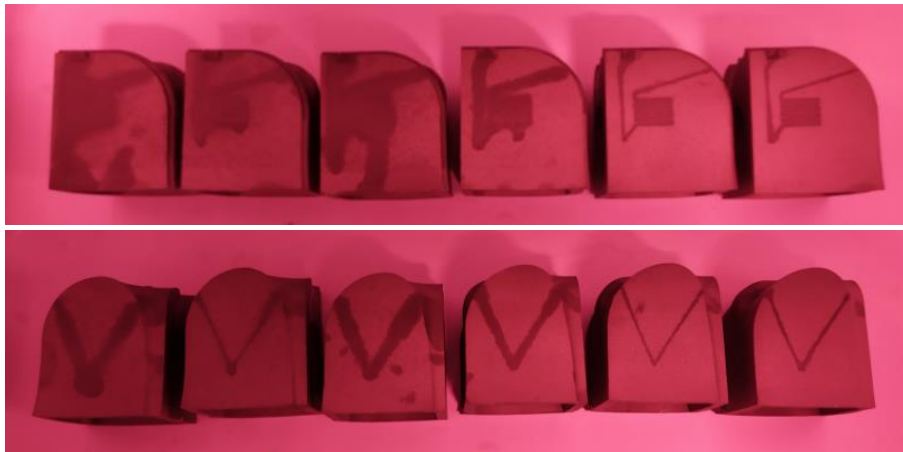


Figura 33: pruebas de impresión de tinta J+S UV Supraflex

Como puede apreciarse en las anteriores imágenes, la mejora de la última iteración frente a la primera es notable, obteniéndose líneas impresas con buena definición, como puede verse en mayor detalle a continuación:

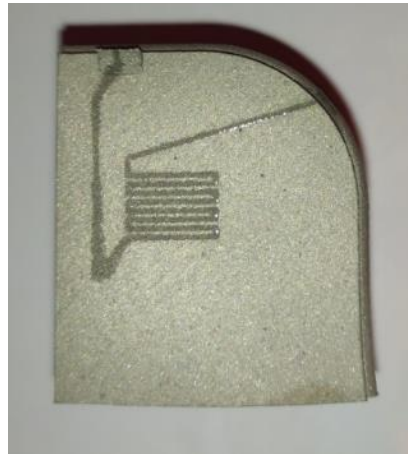


Figura 34: Línea depositada adecuadamente sobre pieza con tinta J+S UV Supraflex

Tras este estudio detallado se concluye que los parámetros más adecuados de los estudiados para la deposición de esta tinta son los siguientes:

Tabla 19: parámetros optimizados para la inyección de tinta J+S UV Supraflex

Ink	J+S UV Supraflex
Nozzle	50µm, 7mm longitud
Close Voltage	107 V
Stroke	78%
Open-Time	0,25ms
Close-Time	0,20ms
Cycle	12ms
Pulse	0,42ms
Frequency	83,3 Hz
Pressure (10cc cartridge)	0,5bar
Temperature	Ambiente

Pruebas sobre sustratos cerámicos

Para realizar la deposición de tinta sobre los conos cerámicos definidos en la anualidad anterior, se diseñó la trayectoria de deposición, utilizando una metodología similar a la utilizada para el resto de piezas, descrita de manera extensa en el informe de la anualidad 2019. Esta geometría sirve para validar la viabilidad de la deposición de tinta conductora sobre material cerámico. Resumimos a continuación las pruebas realizadas y los resultados obtenidos:

- Deposición tinta HENKEL WIK. Se ha depositado tinta Henkel Wik sobre el cono fabricado mediante tecnología LCM, utilizando los mismos parámetros que los previamente usados

para la deposición sobre la pieza de similar geometría a las elaboradas en otros materiales. La deposición se ha considerado adecuada (La pista impresa sobre el cono presenta continuidad y tienen un valor de resistencia eléctrica de 90ohm.) y se ha seguido el mismo proceso de curado térmico de la tinta que en los casos de las deposiciones de la anualidad previa. Para comprobar la adherencia de la tinta al sustrato se realiza la sencilla prueba de la cinta adhesiva, comprobándose que la fuerza de la misma no despegó la tinta, por lo que se considera un resultado adecuado.



Figura 35: Inyección de tinta HENKEL WIK sobre sustrato cerámico – prueba de adhesión

- Deposición tinta DYCOTEC. Utilizando la tinta Dycotec se ha seguido el mismo procedimiento que el utilizado para la deposición sobre el cono con la tinta Henkel Wik. Los parámetros se han mantenido similares a los utilizados con las piezas de la anualidad 2019, obteniendo una deposición continua sin cortes, con una resistencia de 235kohm.

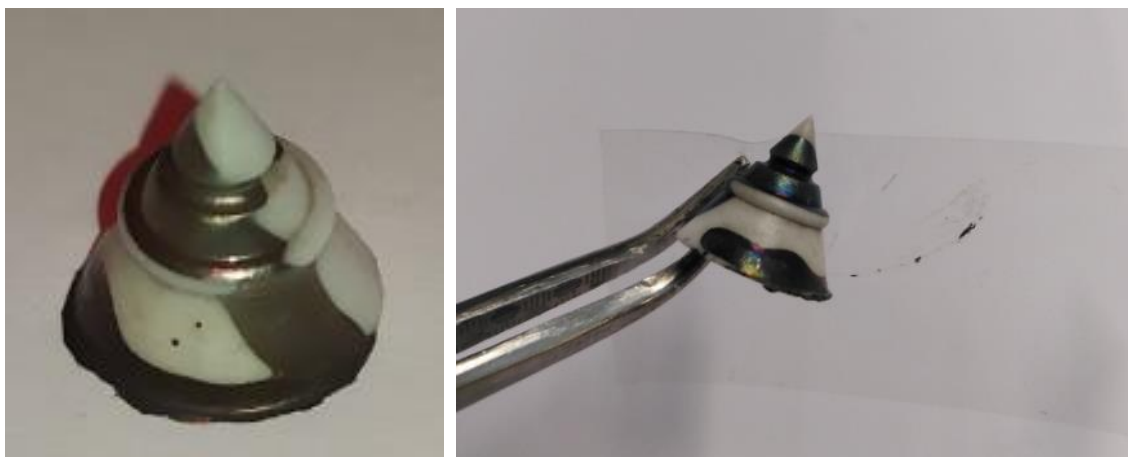


Figura 36: Inyección de tinta DYCOTEC sobre sustrato cerámico – prueba de adhesión

Realizada la prueba de adhesión, solamente se desprende un poco de la tinta del borde de la pieza, que no estaba fijada a la superficie; por lo demás, la tinta presenta una buena adhesión.

3.2.4.2 Optimización de la trayectoria

Para realizar la optimización de trayectoria se reduce la velocidad de la máquina y se inicia la trayectoria sin realizar la deposición de la tinta. En el software (NEOTECH AMT) se va asociando en tiempo real cada línea del programa con la zona y el movimiento que realiza el cabezal y el sustrato. A lo largo de múltiples iteraciones, se fue modificando el programa para mejorar la calidad de la trayectoria y obtener una mejor calidad de pista conductora.

El proceso iterativo y paso a paso realizado modificando los parámetros de impresión ha permitido que la calidad de las pistas depositadas haya mejorado notablemente, como puede verse en la *Figura 37*.



Figura 37. Pista sin ajustes de programa (izquierda) y con los ajustes implementados (derecha)

Finalmente se realiza el curado de cada tinta depositada según los parámetros indicados por el fabricante (120°C y 10 minutos para la tinta Henkel, y 130°C y 20 min para la tinta Dycotec).

Tabla 20. Condiciones de curado para cada una de las tintas

TINTAS	TEMPERATURA	TIEMPO
Henkel Wik	120°C	10min
Dycotec	130°C	20min

3.2.4.3 Caracterización de resultados

Los resultados obtenidos se han validado mediante diversas sistemáticas:

- Análisis visual cualitativo y dimensional de topología de pistas impresas. Se emplean tres técnicas: microscopía digital, microscopía conofocal y lupa electrónica (30 aumentos). El objetivo es analizar las propiedades de las pistas impresas y relacionarlas con la geometría del sustrato, en cuanto a propiedades superficiales del mismo y características geométricas implementadas a través del diseño. La validación mediante microscopía conofocal es la única que puede proporcionar información cuantitativa del ancho de pista deposita.

- Análisis funcional mediante medición de la conductividad eléctrica. Para medir la conductividad se emplea un multímetro y se pincha con las sondas en el comienzo y final de la trayectoria de forma simultánea, como se muestra en la siguiente imagen:



Figura 38. Medición de la conductividad a través de la resistencia en la pista impresa.

En modo “resistencia”, se tiene un valor en ohmios (Ω) de la resistencia eléctrica que presenta al paso de la corriente todo el recorrido de la pista por las cinco caras de la pieza. En caso de que no se tenga valor de resistencia válido, significa que el circuito está cortado en algún punto por diversas casuísticas. En esta situación, se analizan todas las caras de forma individual hasta encontrar el defecto. Esta operación se repite para las dos tintas y los cuatro sustratos a estudiar.

- Análisis de adhesión de tintas según normativa estandarizada ASTM. El análisis de adhesión de las pistas conductoras se lleva a cabo según la sistemática asociada a la norma. Se trata de un procedimiento simple en el que se emplea una cinta adhesiva que se pega sobre la superficie del sustrato, con la pista depositada encima, y se tira de ella para verificar que la fuerza de adhesión sustrato-tinta es superior a la tensión superficial de contacto con la cinta adhesiva.

3.2.4.3.1 Análisis visual cualitativo y dimensional de topología de pistas impresas: Microscopía Digital.

La microscopía digital tiene la ventaja de ser un sistema versátil que permite visualizar zonas de mayor complejidad geométrica, donde otros sistemas serían incapaces de acceder por falta de profundidad de campo o disposición del propio instrumento.

Con esta aproximación se busca caracterizar la apariencia de la pista en su tramo inicial y relacionarlo (de forma visual comparativa) con su aspecto en aquellos tramos que presentan mayor complejidad geométrica y, por tanto, la tinta es más susceptible de deformarse o incluso cortar su flujo durante el proceso de deposición.

Las zonas de complejidad geométrica se discriminan de antemano:

1. Inicio de la trayectoria. Da idea de la calidad esperable en condiciones favorables, al comienzo de la deposición.
2. Cambio de trayectoria repentino. Aporta información sobre el comportamiento de la tinta antes cambios de dirección en la trayectoria a seguir.
3. Trayectoria cuadrangular en serpentin. Permite caracterizar la capacidad de superposición de la tinta en pistas muy cercanas entre sí.
4. Transición concavidad-convexidad: zona recta. Se muestra el comportamiento de la tinta al adaptarse a cambios de geometría de una curvatura positiva a una negativa, sobre una zona plana.
5. Transición concavidad-convexidad: zona curva. Sobre una arista redondeada, análogo al caso anterior. Supone la transición geométrica más complicada.

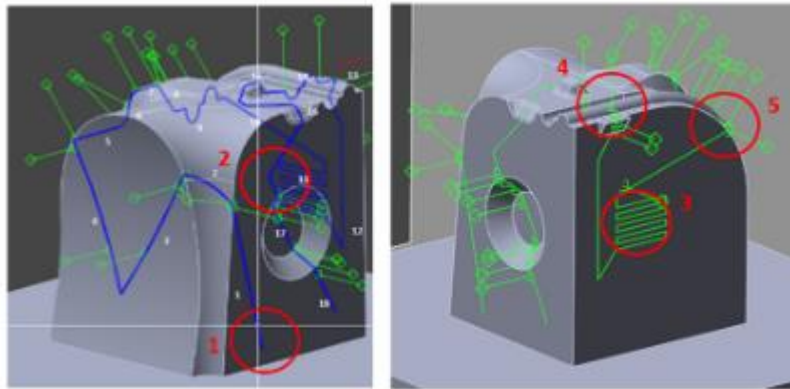






Figura 39. Zonas de complejidad geométrica a considerar en el análisis por microscopía digital


A continuación, se analizan cada una de ellas para los pares tinta/sustrato que forman parte de los ensayos.

- Tinta dieléctrica J+S. Esta tinta resulta un caso particular, pues únicamente se emplea sobre sustratos metálicos (conductores de forma natural), con el objetivo de servir de pantalla para la nueva conducción eléctrica conferida por la pista depositada. Se observa en las pruebas realizadas que su comportamiento no atiende a un comportamiento reológico equiparable al de otras tintas estudiadas, sino que es mucho menos viscosa, hasta el punto de no ser autosustentable ni tener consistencia propia, como se ha mencionado anteriormente. Por tanto, dicha tinta se considera en todo momento ligada al sustrato metálico y válida en la medida en que no interfiera ni afecte al resultado obtenido de la pista conductora depositada.
- Tinta Henkel-Sustrato Acero Inoxidable (SLM). El sustrato de acero inoxidable, al ser un material 100% metálico de naturaleza conductora eléctrica, debe apantallarse con un material dieléctrico, como se ha explicado anteriormente. El dieléctrico, si bien se deposita como una tinta convencional, posee una reología mucho menos viscosa, por lo que el material es absorbido por la porosidad superficial inherente al material/proceso de

transformación y por eso se encuentra mucho menos concentrado y definido que las propias tintas. Se observan estos comportamientos por zonas:




Tabla 21: resultados de deposición de tinta Henkel sobre acero inoxidable (SLM)

Zona	Imagen	Comportamiento observado
1		Puede apreciarse una correcta definición, con mínima dispersión en su trayectoria
2		En lo que respecta a la zona (2), el tramo de entrada corresponde a un movimiento adaptativo del cabezal, en su movimiento en el eje 5 (giro del sustrato sobre el cabezal). De este modo, el cabezal aún se está recuperando de describir la curvatura previa, y no se ha adaptado a la deposición en plano. Esto provoca que la deposición sea más errática y desordenada, por el cambio en la aceleración del cabezal móvil y la falta de estabilidad en la distancia cabezal-sustrato durante el movimiento. Después del vértice (zona FIN), el cabezal ya está perfectamente paralelo al sustrato y se recupera la homogeneidad en la deposición
3		Si bien existe cierta dispersión colateral en las pasadas, se obtiene un trazado bastante definido en la forma. Se concluye que es posible imprimir pistas con el espaciado propuesto. Sin embargo, la estabilidad dimensional que se obtiene no es demasiado buena.
4		En el caso de la zona cóncava, al ser muy estrecha y no poder acceder el cabezal hasta tener el gap boquilla-sustrato oportuno, se tiene mucha más dispersión en la tinta. Por el contrario, en la parte convexa, al ser un relieve positivo sobre la superficie del sustrato, el cabezal puede seguir la trayectoria y, por tanto, la definición de la pista es mucho mejor.

Zona	Imagen	Comportamiento observado
5		En el caso de la zona curva, se tienen efectos similares a la zona 4, si bien se percibe una dispersión general mucho mayor, al acumularse el efecto de aceleración del cabezal por el seguimiento de la zona radial en la que se ubica la complejidad geométrica.

- Tinta Henkel-Sustrato “Alumide” (SLS). “Alumide” es el nombre comercial que recibe un material compuesto, específico para impresión 3D en cama de polvo, formado por poliamida 12 con carga de polvo de aluminio para mejorar su conductividad y propiedades mecánicas. Posee una rugosidad bastante elevada, y eso se puede apreciar en los bordes de las pistas impresas, que tienen a ser difuminados por la porosidad del material.


Tabla 22: resultados de deposición de tinta Henkel sobre Alumide (SLS)




Zona	Imagen	Comportamiento observado
1		La calidad de la deposición en condiciones óptimas es aceptable
2		No se percibe una gran diferencia en la calidad de la deposición en la zona 2, siendo deficiente en su mayor parte, si bien la zona de entrada (izquierda) posee un espesor variable, desde grosor más elevado en la transición hasta que se estabiliza al recuperar la orientación. Sin embargo, el seguimiento de la trayectoria en condiciones más favorables no parece mejorar mucho (derecha).
3		La zona de análisis correspondiente al serpentin presenta varias irregularidades en la deposición. La zona de entrada (superior de la imagen) presenta una resolución aceptable, con difusión de los bordes de pista, pero estables en cuanto a dimensiones. Sin embargo, en las zonas de salida de la trayectoria puede comprobarse cómo la nitidez de la pista se pierde.
4		

Zona	Imagen	Comportamiento observado
		<p>En cuanto a las transiciones cóncavas/convexas se aprecia que la deposición en la zona curva resulta ligeramente más estrecha y menos dispersa que en la zona recta. Esto no es muy lógico a priori, si bien el aspecto de las pistas en la zona recta se asemeja más a la apariencia por defecto en la primera zona de análisis (1), por lo que se puede atribuir a pérdida del material en el aire por la propia inercia del movimiento del cabezal. Es importante destacar que una merma en el material depositado es tan poco deseable como una pista poco definida o dispersa, pues afectará a los valores de conductividad eléctrica y, con ello, a la funcionalidad final del sistema.</p>
5		

- Tinta Henkel - Sustrato resina polimérica “Verowhite” (material jetting). Los procesos de impresión 3D de material jetting, basados en resinas foto curables, consolidan una de las tecnologías de aditiva con mejores acabados superficiales, libres de defectos. Esto se contrapone a los sustratos estudiados hasta ahora, con mayores porosidades y, por tanto, mayor absorción de la tinta depositada.


Tabla 23: resultados de deposición de tinta Henkel sobre Verowhite (material jetting)

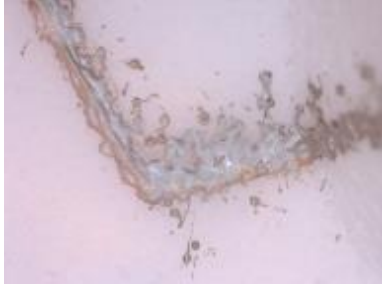



Zona	Imagen	Comportamiento observado
1		Se ha conseguido depositar con buena calidad en la zona 1, con algo de dispersión en los bordes de la pista, pero en general, con buena concentración del material y nitidez en el trazado.
2		La homogeneidad de la pista se mantiene muy similar, sin grandes fluctuaciones en el espesor de la pista o en el grado de dispersión.

Zona	Imagen	Comportamiento observado
3		En la zona de la trayectoria en serpentín se encuentra una calidad bastante inferior al resto de zonas de este sustrato, e incluso comparando con otros sustratos. La deposición es muy irregular, encontrándose zonas definidas y otras donde la tinta se ha dispersado hasta tocar con las secciones colindantes. Posiblemente esto se deba a que esta cara de la pieza se corresponde con la de crecimiento de las capas de construcción y, por tanto, su disposición es más desfavorable ante este efecto.
4		En las zonas de transiciones cóncavas/convexas se aprecia una calidad de deposición notable. En la zona recta la definición es muy superior, hasta el punto de no apreciarse diferencia entre el tramo cóncavo y el convexo, a pesar de que en segundo el cabezal perfila la geometría perfectamente mientras que el primero, no tiene espacio suficiente para entrar. En la zona curva se aprecia algo más de irregularidad en el contorneado periférico de la pista, pero, a pesar de esa, muy buen factor de rellenado y continuidad en todo el tramo.
5		

- Tinta Henkel - Sustrato Poliamida (SLS). La poliamida procesada mediante SLS es uno de los materiales más porosos que se pueden encontrar en el portfolio de procesables mediante fabricación aditiva.

Tabla 24: resultados de deposición de tinta Henkel sobre Poliamida (SLS)

Zona	Imagen	Comportamiento observado
1		En este caso, para la tinta HENKEL se tiene una amalgama de homogeneidad en la deposición (puede apreciarse perfectamente el cordón central), a la vez que se tiene una dispersión muy alta en los extremos, posiblemente favorecida por la porosidad del material.

Zona	Imagen	Comportamiento observado
2		En la zona 2 se puede comprobar que el cambio de dirección al describir la trayectoria afecta notablemente sobre este sustrato. La zona de entrada presenta uniformidad, con el cordón de la tinta siendo visible, pero la zona de salida (derecha) presenta un aspecto mucho más irregular y no uniforme, ligeramente desviado hacia la zona interior de la trayectoria, posiblemente por la inercia del movimiento del cabezal que haya propiciado la dispersión en dicho sentido.
3		En el caso del serpentín (3), la baja calidad de la impresión comienza a afectar de forma negativa a la resolución integrada del proceso. Esto es debido a que la dispersión que se tiene en los bordes de las pistas impresas, viene a encontrarse en el rango dimensional del espaciado entre pistas para este diseño, lo que provoca que las filas del patrón geométrico lleguen a estar en contacto eléctrico, invalidando así la funcionalidad del sistema. Se concluiría de este análisis que el espaciado entre pistas debe ser mayor que el aquí planteado.
4		En las transiciones de las zonas (4) y (5) se tienen resultados análogos en cuanto a irregularidad de las pistas y dispersión, si bien es posible apreciar que esto es un factor inherente al conjunto tinta/sustrato, pues dentro de la poca uniformidad en la deposición, se aprecia una homogeneidad en el trazado y un espectro acotado en la dispersión de las gotas de la tinta. En la zona curva, se aprecia una ligera concentración del material en la superficie plana que separa la zona cóncava de la convexa, resultado del cambio de estrategias de movimiento.
5		

- Tinta Henkel- Sustrato cerámico alúmina (tecnología LCM). Como se ha indicado anteriormente, la tecnología de fabricación LCM presenta ciertas limitaciones que han impedido la fabricación de la pieza demo completa. La pieza de ensayo no ha llegado a reproducirse de forma óptima aunque se ha alcanzado la fabricación de una geometría aproximada (a falta del segmento superior) sobre la que es posible llevar a cabo algunas caracterizaciones.

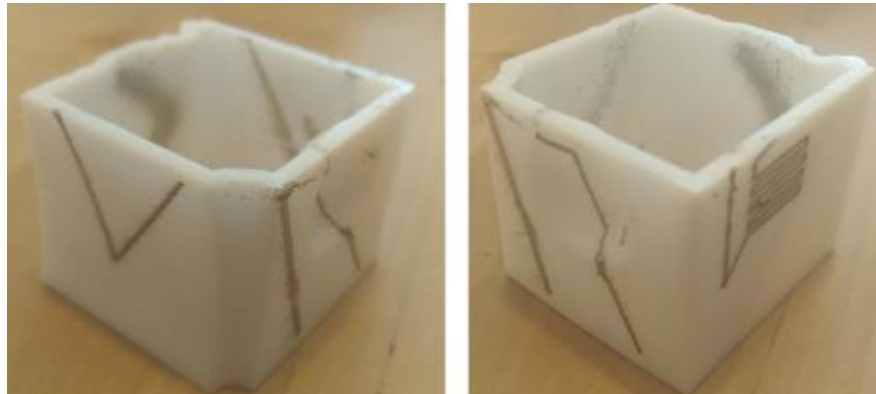
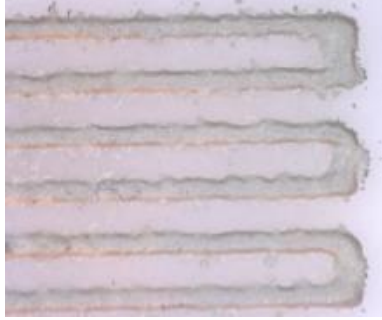


Figura 40. Geometría fabricada en cerámica mediante tecnología LCM.

Tabla 25: resultados de deposición de tinta Henkel sobre cerámica alúmina (LCM)


Zona	Imagen	Comportamiento observado
1		En la zona 1 se puede apreciar que la calidad de la deposición es excepcionalmente buena. El cordón de tinta está perfectamente definido, existe estabilidad dimensional y mínima dispersión. Esto estaría muy estrechamente relacionado con la calidad superficial propia del sustrato, característico de la tecnología LCM. Los valores medios de rugosidad Ra que se obtienen por dicho sistema son de hasta 0,4 μm , mientras que para otras tecnologías de cama de polvo (SLM), los valores medios están en torno a 10 μm . Por tanto, las superficies finales obtenidas de este proceso de fabricación se encuentran totalmente pulidas, sin apenas rastro de las capas consolidadas. Esto explicaría que la tinta no se disperse por efecto de la absorción de los poros.
2		La zona de cambio de dirección en la trayectoria (2) no es fácil de apreciar con nitidez al coincidir en uno de los tramos de separación de los segmentos. A pesar de ello, se puede intuir que la estabilidad es bastante buena, si bien el cordón se termina por difuminar tras describir el vértice de la trayectoria, se conserva cierta homogeneidad en el ancho de pista y en el grado de dispersión.


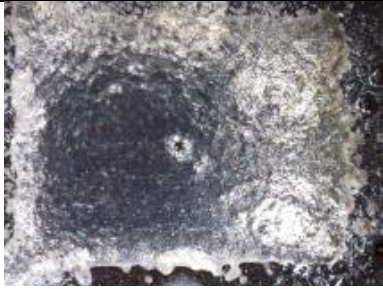


Zona	Imagen	Comportamiento observado
3		En la zona del serpentín (zona 3) se comprueba un resultado de muy buena calidad, con una definición total de las pistas y mínima dispersión en los bordes.

Se concluye que el sustrato cerámico resulta uno de los más prometedores para la deposición de la tinta conductora, si bien no se ha podido caracterizar la conductividad eléctrica (por no existir continuidad en toda la geometría). Esto se atribuye, como se ha comentado anteriormente, a la excelente calidad superficial del sustrato y la afinidad del propio material cerámico.

- Tinta Dycotec - Sustrato Acero Inoxidable (SLM)






Tabla 26: resultados de deposición de tinta Dycotec sobre sustrato acero inoxidable (SLM)

Zona	Imagen	Comportamiento observado
1		Puede apreciarse en la imagen correspondiente a la primera zona de control (1) que la tinta DYCOTEC posee un comportamiento distinto a la HENKEL tras ser depositada. Si bien su acabado superficial es superior, se percibe que su grado de dispersión es bastante mayor, lo que implica anchos de pista mayores.

Zona	Imagen	Comportamiento observado
2		Los anchos de pista más elevados enmascaran posibles errores de irregularidad y dispersión de la tinta, por lo que en la zona de transición (2) se tiene un comportamiento bastante homogéneo a pesar de las inercias del movimiento.
3		Donde más perceptibles son las deficiencias asociadas a los mayores anchos de pista depositada es, sin duda, en el tramo de la geometría en serpentin (3). El grado de dispersión es tal que las pistas se terminan por superponer, sin existir un espaciado mínimo entre ellas. Por lo tanto, para esta tinta se deben emplear distancias entre pistas mayores, de al menos 4-5 mm.
4		En las últimas zonas de control (4), (5) se comprueba que existe una buena homogeneidad en el ancho y estabilidad superficial de las pistas, sin existir deficiencias visibles asociadas a la transición geométrica o el cambio en la dinámica del cabezal. Cabe destacar en la zona recta (4), la escasa variación en los contornos de la pista que se aprecian entre la zona cóncava (derecha) y la convexa, lo que lleva a concluir que ranuras, canaladuras y geometrías de reducido tamaño que impidan al cabezal entrar a depositar con un gap adecuado, pueden procesarse con un correcto acabado, en el caso de emplear la tinta DYCOTEC. Como contrapartida, evidentemente, el ancho de pista resultante sería mayor.
5		





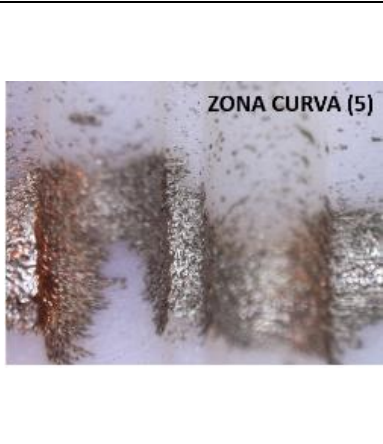
- Tinta Dycotec - Sustrato "Alumide" (SLS).

Tabla 27: resultados de deposición de tinta Dycotec sobre sustrato alumide (SLS)

Zona	Imagen	Comportamiento observado
1		Se puede comprobar que los anchos de pista siguen siendo elevados. Por otro lado, en el caso del sustrato SLS, la porosidad superficial es mucho más notable. Este factor se comprueba que tiene impacto, principalmente, en la calidad superficial final de la pista depositada. Mientras que en el caso del acero la superficie era completamente lisa, aquí se ve como los poros absorben parte de la tinta, dando lugar a una superficie más irregular
2		En la zona 2 la homogeneidad de la impresión se mantiene, dentro de los anchos de pista observados.
3		La zona del serpentín (3) mantiene la misma defectología observada en el caso del sustrato de acero. Además, puede comprobarse como la porosidad es más fácil de ver en esta zona, así como la tinta siendo absorbida por ella.
4		En las transiciones (zonas 4 y 5) también se percibe cierta regularidad en el trazado de las pistas, si bien, una vez más, el efecto de la porosidad del material es negativo en lo que a definición de los bordes de las pistas se refiere.
5		




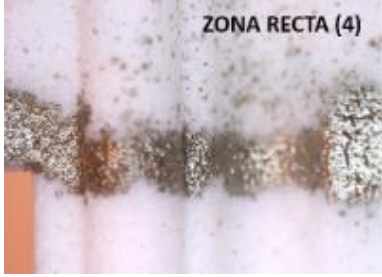

- TINTA DYCOTEC - Sustrato Verowhite (resina polimérica).

Tabla 28: resultados de deposición de tinta Dycotec sobre Verowhite (resina polimérica)

Zona	Imagen	Comportamiento observado
1		<p>Con el sustrato de verowhite se advierte el problema que ya se había adelantado en el caso de la tinta HENKEL: la filtración de la misma por los intersticios laminares que va dejando la consolidación sucesiva de las capas de material durante la fabricación aditiva. Es importante recalcar que esto está más condicionado por la tecnología de impresión 3D, que por el propio material del sustrato. Además, por ser está tinta menos viscosa aún y, por tanto, con más tendencia a fluir, es más propensa a ser absorbida por estas grietas microscópicas.</p>
2		<p>De nuevo, la zona de cambio de dirección (2) no presenta variaciones significativas, manteniendo una correcta homogeneidad.</p>
3		<p>En cuanto al serpentin (zona 3), se repite el efecto evidenciado en los casos anteriores, con una repercusión aún mayor al dispersarse la tinta también periféricamente hacia el exterior del patrón geométrico.</p>
4		<p>Estas zonas de transición son de especial interés para comparar la repercusión de la calidad superficial de los sustratos en las pistas depositadas. Así, la zona recta (4) muestra una vez más el defecto asociado a la presencia de capas de fabricación. En este caso puede verse como se genera una trayectoria bastante irregular. Por el contrario, en la zona curva, se encuentra una zona especialmente afectada por el proceso de limpieza manual de los sustratos tras la impresión 3D (un defecto involuntariamente introducido). Aquí, se le ha aplicado un lijado especialmente agresivo que genera una mayor porosidad. Curiosamente, esto hace que el comportamiento de la tinta se asemeje más al encontrado en otros sustratos, de mejor calidad. A la vista de esto, se podría concluir que los procesos de impresión 3D de alta resolución, con espesores de capa muy finos no son especialmente indicados para la deposición de esta tinta, pues tenderá a filtrar por los espacios entre las mismas, desvirtuando la calidad de la pista y, con ello, la funcionalidad asociada (como se verá en los siguientes apartados).</p>
5		<p>Estas zonas de transición son de especial interés para comparar la repercusión de la calidad superficial de los sustratos en las pistas depositadas. Así, la zona recta (4) muestra una vez más el defecto asociado a la presencia de capas de fabricación. En este caso puede verse como se genera una trayectoria bastante irregular. Por el contrario, en la zona curva, se encuentra una zona especialmente afectada por el proceso de limpieza manual de los sustratos tras la impresión 3D (un defecto involuntariamente introducido). Aquí, se le ha aplicado un lijado especialmente agresivo que genera una mayor porosidad. Curiosamente, esto hace que el comportamiento de la tinta se asemeje más al encontrado en otros sustratos, de mejor calidad. A la vista de esto, se podría concluir que los procesos de impresión 3D de alta resolución, con espesores de capa muy finos no son especialmente indicados para la deposición de esta tinta, pues tenderá a filtrar por los espacios entre las mismas, desvirtuando la calidad de la pista y, con ello, la funcionalidad asociada (como se verá en los siguientes apartados).</p>

- Tinta Dycotec - Sustrato Poliamida (SLS).

Tabla 29: resultados de deposición de tinta Dycotec sobre Poliamida (SLS)

Zona	Imagen	Comportamiento observado
1		De nuevo nos encontramos con un sustrato fabricado mediante tecnología de impresión 3D de cama de polvo, lo que provoca que la porosidad intrínseca actúe en detrimento de la calidad superficial de la pista, pero, a la vez, ayude a confinarla dentro de unos márgenes dimensionales.
2		El cambio de dirección en la trayectoria se ejecuta sin mayores defectos, no apreciándose fenómenos asociados a la inercia del movimiento.
3		En cuanto al serpentín (zona 3), se repite el efecto encontrado en todos los sustratos. La porosidad es especialmente notable en esta imagen, si bien se aprecia de igual forma que todos los poros están rellenos, por lo que la capacidad de empapados o mojado de la tinta es adecuada para el tamaño de los mismos.
4		El comportamiento de la tinta parece más inestable en las zonas de transición (4), (5). Al no poder el cabezal entrar a depositar en las zonas más estrechas, las gotas de tintas se dispersan, lo que, sumado al efecto de la porosidad, hace que el trazado de las pistas sea más irregular.
5		

3.2.4.3.2 Análisis visual cualitativo y dimensional de topología de pistas impresas: microscopía confocal

La microscopía confocal permite obtener valiosa información geométrica/dimensional del sustrato medido, pero presenta el inconveniente de ser muy sensible en cuanto al estrecho rango de medición que presenta (profundidad de campo), así como a alteraciones en la calidad superficial del sustrato. Al objeto de determinar las características geométricas de las pistas depositadas se ha medido la zona más representativa de la geometría de la pieza (zona 1).



Figura 41. Equipo confocal durante la medición de una de las piezas.

Con fines ilustrativos, se muestra a continuación el proceso concreto de análisis e interpretación de la información seguido para la microscopía confocal de la **TINTA HENKEL - Sustrato Acero Inoxidable (SLM)**.

- La reconstrucción 3D resulta nítida y es intuitivo distinguir entre la pista impresa y el sustrato. La topología de la pista conductora resulta clara. Para obtener una lectura más representativa, se pueden transformar a “imagen de intensidad”.

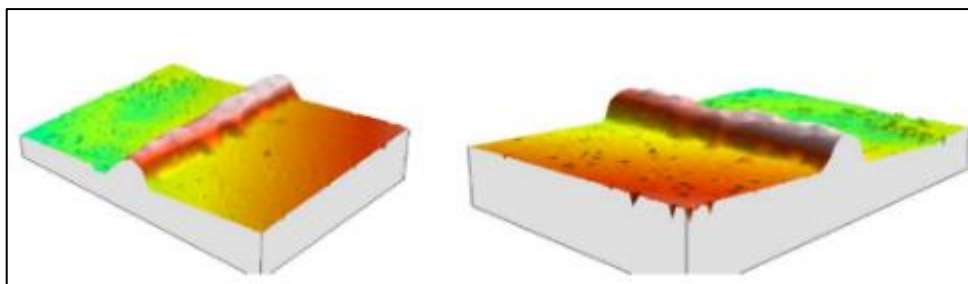


Figura 42. Datos obtenidos de la microscopía confocal sin tratar sobre sustrato acero.

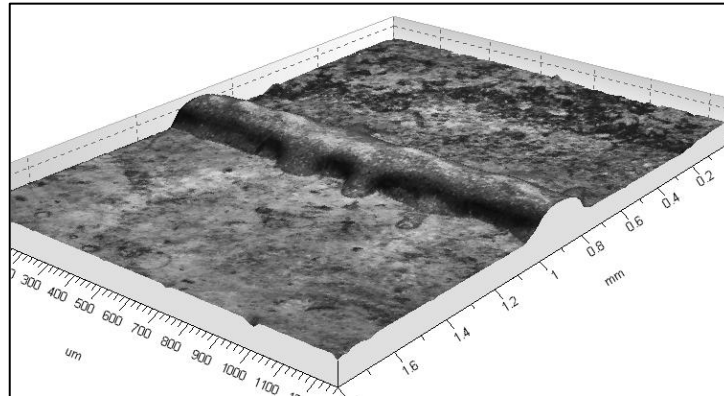


Figura 43. Transformación de datos captados sobre acero inoxidable a "imagen de intensidad"

- A partir de la imagen de densidad es posible obtener la altura o espesor y ancho de la pista impresa, para lo cual se reconstruye la sección cruzada de la misma, a través de la medición secuencial en 400 perfiles, y tomando el valor medio.

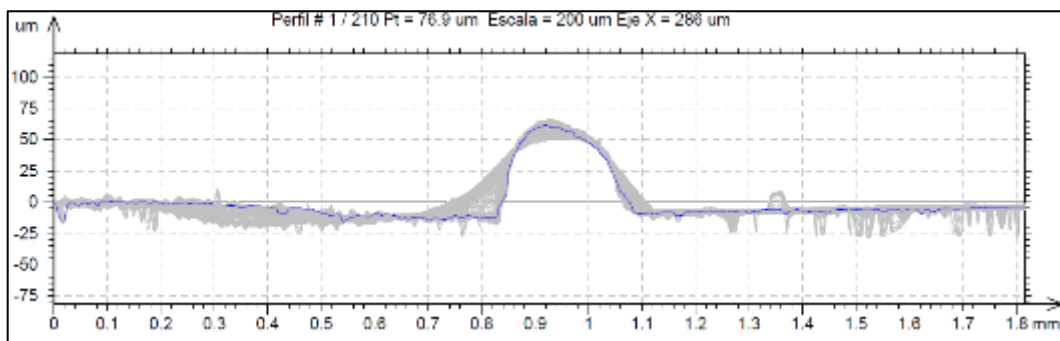


Figura 44. Medición del perfil medio del escaneo realizado.

- Para poder realizar mediciones de forma más certera, se magnifica el gráfico respecto al eje z, y se aísla la parte superior de la pista (resaltada en la imagen inferior), que resulta más representativa del estrato funcional de la tinta. Además, así se eliminan posibles distorsiones asociadas al patrón de contrastes que emplea el algoritmo del software para reproducir la imagen tridimensional.

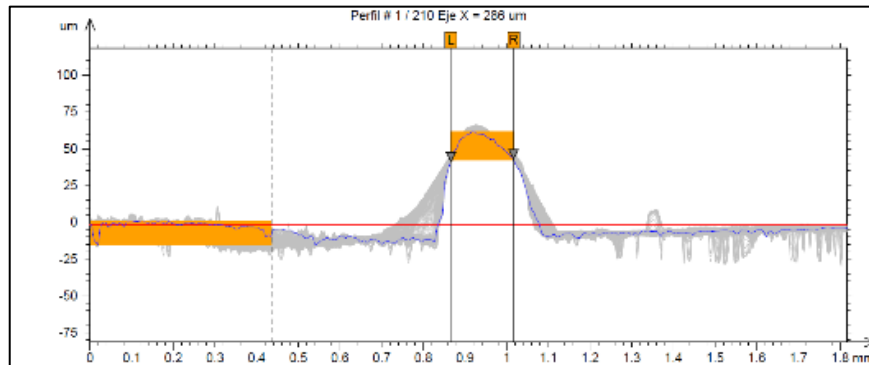


Figura 45. Eje z magnificado y zona de interés resaltada.

La zona resaltada a la izquierda de la imagen sería la “cota 0” o superficie libre de referencia del sustrato. La zona central resaltada sería la topología superior de la pista. Los **datos dimensionales obtenidos del análisis son altura media de 56,6 μm y ancho medio de 0,151 mm.**

- Puede apreciarse que la topología de la pista es muy clara: la tinta se encuentra concentrada en un espesor bajo, y el volumen se manifiesta en la altura de la misma.

En base al proceso descrito, se incluye a continuación una tabla que resume todas las microscopías conofocales desarrolladas:

Tabla 30: resumen de resultados de la microscopía conofocal

Conjunto Tinta-sustrato	Resultados
TINTA HENKEL - Sustrato Acero Inoxidable (SLM)	Los datos dimensionales obtenidos del análisis son altura media de 56,6 μm y ancho medio de 0,151 mm. Puede apreciarse que la topología de la pista es muy clara: la tinta se encuentra concentrada en un espesor bajo, y el volumen se manifiesta en la altura de la misma.
TINTA HENKEL - Sustrato “Alumide” (SLS)	Aunque sigue sin resultar claro, se trata de distinguir entre las principales zonas de referencia. En la “cota 0” se puede apreciar el efecto de la rugosidad, que complica sensiblemente el encontrar una sección horizontal de referencia. Por su parte, la superficie de la pista se intuye en las mediciones más altas del conofocal, pero no está claro el tránsito de una a otra. Se aísla, no obstante, una posible zona válida. Con ello, los resultados son altura media de 86,4 μm y ancho medio de 0,551 mm.
TINTA HENKEL - Sustrato Verowhite (resina polimérica)	El defecto inherente a este sustrato por el sistema de consolidación capa a capa genera un tipo de inestabilidad superficial que, en este caso, está afectado notablemente a la medición. A pesar de ello, se extraen los valores cuantitativos, que no resultan muy reveladores: altura media 16,1 μm y ancho medio de 0,454 mm. A juzgar por los mismos, la tinta ha filtrado por los intersticios de las capas anteriormente mencionados, perdiendo altura y difuminándose en su ancho hasta confundirse con el propio sustrato.

Conjunto Tinta-sustrato	Resultados
TINTA HENKEL - Sustrato Poliamida (SLS)	Si bien se aprecia que la superficie de la tinta está a una cota más elevada, en este caso es su propia topología la que queda menos clara, al no presentar una superficie regular, sino dos relieves con un valle en medio. A pesar de ello, se extraen valores: altura media 59,3 μm y ancho medio 0,536 mm.
TINTA HENKEL - Sustrato cerámico alúmina (LCM)	Las zonas de interés se resaltan sin problema, siendo perfectamente posible distinguir entre sustrato y tinta. Esto se debe en parte a la excelente calidad superficial de la pieza cerámica, que no introduce rugosidades o imperfecciones que falseen las medidas. Las irregularidades que puedan verse bien pueden corresponder a gotas de tinta dispersas en la periferia o defectos en el contorno de la tinta. Esto se verá mejor en el análisis complementario con lupa. Los resultados obtenidos son altura media 39,2 μm y ancho medio 0,198 mm.
TINTA DYCOTEC - Sustrato Acero Inoxidable (SLM)	Los valores obtenidos de este modo, sobre la zona de interés, son altura media 29,5 μm y ancho medio 0,767 mm. En cuanto al ancho, como se ha mencionado, se ha empleado una discretización de valores conservadora, que abarca sólo la topología superior de la pista.
TINTA DYCOTEC - Sustrato "Alumide" (SLS)	Resulta imposible distinguir la pista del sustrato, y, por tanto, efectuar la medición.
TINTA DYCOTEC - Sustrato Verowhite (resina polimérica)	Como sucedía en el caso anterior, los tratamientos de datos habituales resultan infructuosos. La medición del perfil medio tampoco permite obtener datos cuantitativos de la geometría de la pista.
TINTA DYCOTEC - Sustrato Poliamida (SLS)	En este caso, sí se consiguen distinguir las zonas de interés; la cota "0" propia del sustrato y una potencial zona superior superficial de la pista conductora. Los valores medidos sobre las mismas son altura media 31,3 μm y ancho medio 1,06 mm.

Conclusiones para cada tinta:

- HENKEL. Es importante destacar la enorme influencia del estado superficial del sustrato en la caracterización de las tintas. Sustratos con porosidades muy acentuadas o defectos análogos, serán muchos más complicados de procesar, y la tinta se distribuirá de forma poco homogénea. Por el contrario, sustratos muy bien acabados (cerámicos) o en su defecto, con los poros sellados (tinta dieléctrica para el caso del sustrato de acero), serán más susceptibles de generar una pista de buena calidad. Todo esto, evidentemente, se relaciona estrechamente con la propia reología de la tinta y a continuación se muestra como, para tintas menos viscosas, este efecto adverso es aún más nocivo.
- DYCOTEC. Resulta claro que una tinta menos viscosa (como es el caso de la DYCOTEC) no favorece en absoluto a la estabilidad de la pista impresa. Esto se agrava al contar con sustratos porosos por los que esta pueda filtrar. Más allá de la dificultad para efectuar la medición, es importante tener en cuenta que esto afectaría a la funcionalidad de la tinta, pues la resistencia eléctrica se vería afectada, como se comprueba en apartados posteriores.

3.2.4.3.3 Análisis visual cualitativo y dimensional de topología de pistas impresas: Lupa Electrónica

En este caso, se ha utilizado la lupa electrónica Olympus SZX16. El sistema no presenta una medición directa, sino que muestra una imagen ampliada de la pista contrastada con una referencia dimensional fija. Para la toma de imágenes se emplean 30 aumentos.

- Tinta Henkel.

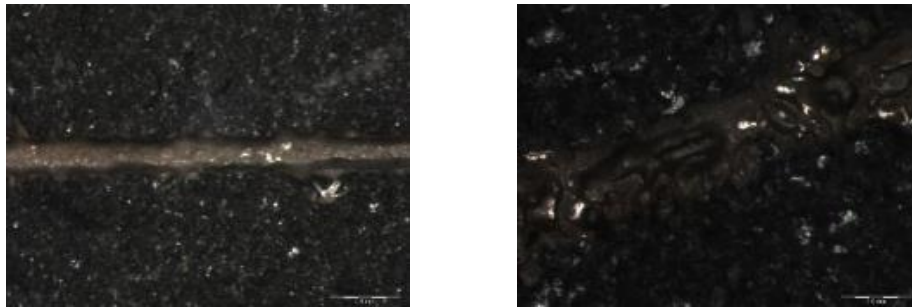


Figura 46. Imagen en lupa (x30 aumentos) de los sustratos de acero (izquierda) y alumide (derecha).

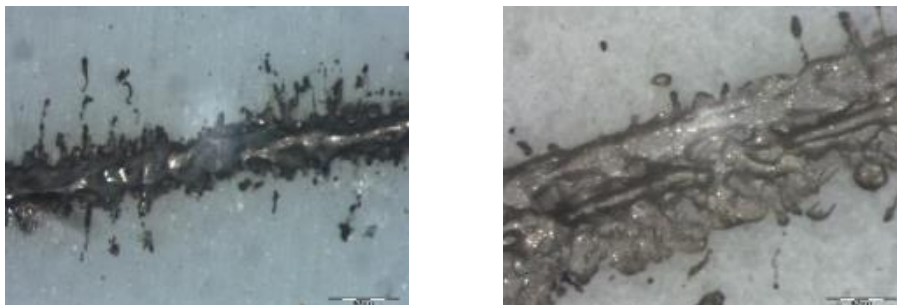


Figura 47. Imagen en lupa (x30 aumentos) de los sustratos verowhite (izquierda) y poliamida (derecha)

En el caso del sustrato alumide se confirma la defectología adelantada en el análisis conofocal: la tinta tiende a absorberse por los poros de la pieza, comprometiendo así su estabilidad geométrica y perdiendo consistencia. En el caso verowhite se obtiene un efecto similar, pero es visible la causa que lo produce: el efecto “capa” que se ha dado durante la consolidación del curado en el proceso de impresión 3D. Puede verse la tinta filtrando por los huecos.



Figura 48. Imagen en lupa (x30 aumentos) del sustrato cerámico de alúmina.

En el caso de la alúmina, si bien la pista está claramente impresa, se presenta un defecto de dispersión continuo de gotas en la periferia, probablemente causado por un defecto operativo durante la deposición.

- **Tinta Dycotec.**

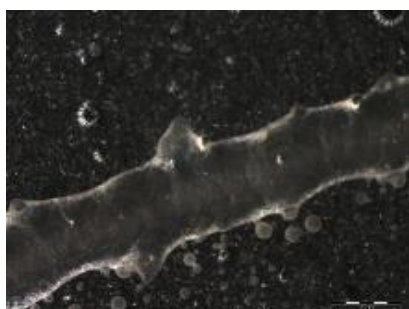


Figura 49. Imagen en lupa (x30 aumentos) de tinta DYCOTE sobre los sustratos de acero (izquierda) y alumide (derecha).

En el caso del sustrato de alumide, al no haber podido obtener datos cuantitativos de las dimensiones de la pista impresa mediante la microscopía conofocal, la mejor aproximación será la obtenida a través del análisis de las imágenes de la lupa. En este caso, el ancho de pista medido sería de unos 0,4 – 0,5 mm, como puede verse en la siguiente imagen:



Figura 50. Medición sobre la imagen de la lupa de la tinta DYCOTEC depositada sobre alumide.

En el caso del verowhite, al no disponer de datos de microscopía conofocal, se procede de forma análoga al caso anterior, obteniendo ancho de pista mediante análisis de la imagen de la lupa. En este caso resulta aún más complicado, pues como puede apreciarse, el trazado es más irregular por la difusión entre las capas del material. En este caso, el ancho de pista medido sería de unos 0,8 mm.

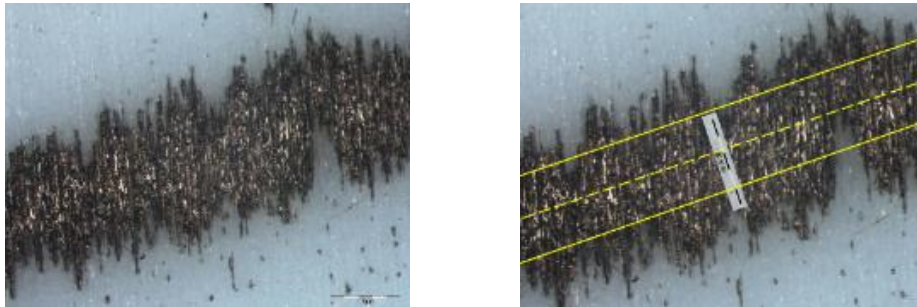


Figura 51. Imagen en lupa (x30 aumentos) de la tinta DYCOTEC depositada sobre el sustrato de verowhite.



Figura 52. Imagen en lupa (x30 aumentos) de la tinta DYCOTEC depositada sobre sustrato de poliamida.

3.2.4.3.4 Análisis funcional mediante medición de la conductividad eléctrica.

A continuación, se muestran los resultados de las medidas de conductividad eléctrica realizadas sobre las dos tintas ensayadas sobre los sustratos fabricados de manera integral, es decir, acero inoxidable, alumide, verowhite y poliamida. Como se ha indicado anteriormente, no se ha podido realizar la caracterización eléctrica de los sustratos cerámicos por no existir continuidad en su geometría al estar fabricados en varias secciones.

Se concluye que el sustrato cerámico resulta uno de los más prometedores para la deposición de la tinta conductora, si bien no se ha podido caracterizar la conductividad eléctrica (por no existir continuidad en toda la geometría).

- Tinta Henkel. En el sustrato de Acero Inoxidable (SLM) se tiene conductividad eléctrica válida, de valor 46 Ohmnios. En "Alumide" (SLS) también se obtiene conductividad eléctrica válida, de valor 6,5 Ohmnios.

En el sustrato verowhite no se tiene conductividad eléctrica principio-fin de la pista. Se procede por tanto a su análisis en detalle en cada una de las caras.

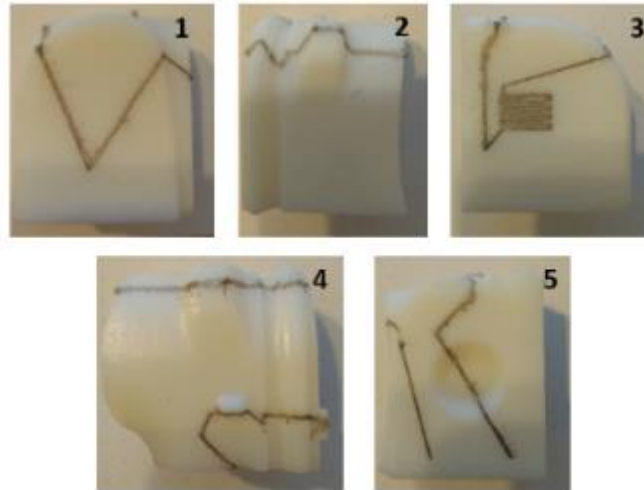


Figura 53. División de cada una de las caras de la pieza demo (HENKEL sobre verowhite) para caracterización individual de conductividad.

Tabla 31. Medidas de conductividad por tramos para tinta HENKEL depositada sobre sustrato verowhite

Referencia cara	Valor conductividad
1	1,1 ohmnios
2	0,6 ohmnios
3	No conduce
4	1,2 ohmnios
5	1,9 ohmnios

La fuente del problema en la zona 3 deriva de la falta de calidad de las deposiciones en la zona del serpentín, que provoca que en ciertas zonas haya faltas de material que generan circuitos abiertos. Puede apreciarse en detalle en la Figura 54.

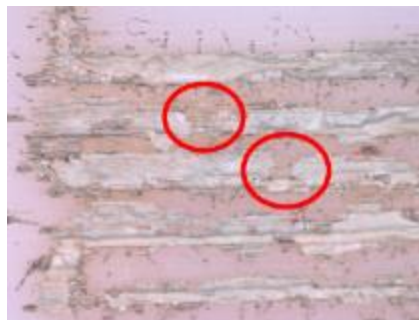


Figura 54. Defectos encontrados en la deposición de tinta HENKEL sobre sustrato verowhite, cara (3). Circuito abierto por faltas de material en varias zonas.

En el caso del sustrato **poliamida (SLS)**, tampoco se tiene conductividad en todo el trazado de las pistas. Se realiza análisis análogo al sustrato verowhite.

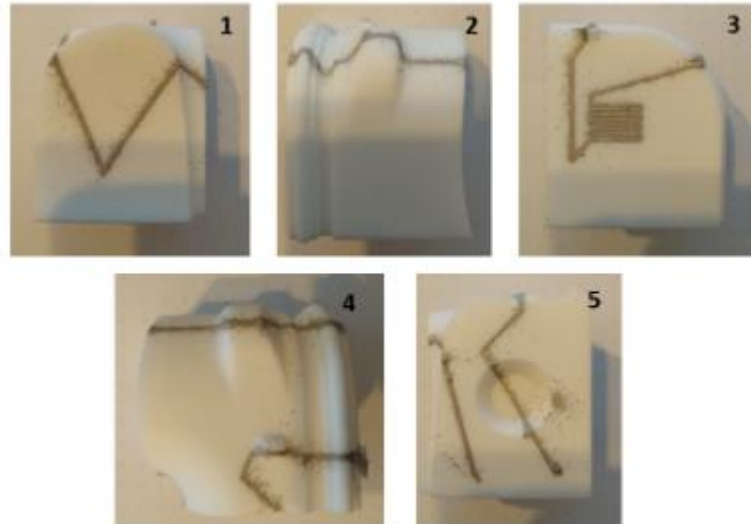


Figura 55. División de cada una de las caras de la pieza demo (HENKEL sobre poliamida) para caracterización individual de conductividad.

Tabla 32. Medidas de conductividad por tramos para tinta HENKEL depositada sobre sustrato poliamida

Referencia cara	Valor conductividad
1	0,9 ohmnios
2	0,8 ohmnios
3	1,6 ohmnios
4	0,7 ohmnios
5	No conduce

En este caso, es la cara "5" la que no presenta conductividad eléctrica, por lo que se estudia en detalle. En este caso, el defecto no se había delatado en el análisis cualitativo, por encontrarse en una zona fuera de las de estudio, y además bastante oculta. Se trata de la zona tronco cónica, el encuentro entre la cara inclinada y la cara plana del fondo. En dicha sección, la pista se corta, generando un punto de circuito abierto justo en la arista. Se trata de un problema asociado al seguimiento de trayectorias del control del cabezal móvil, pues en ese punto debe modificar su inclinación, afectando a la aceleración y con ello, a la deposición de tinta.

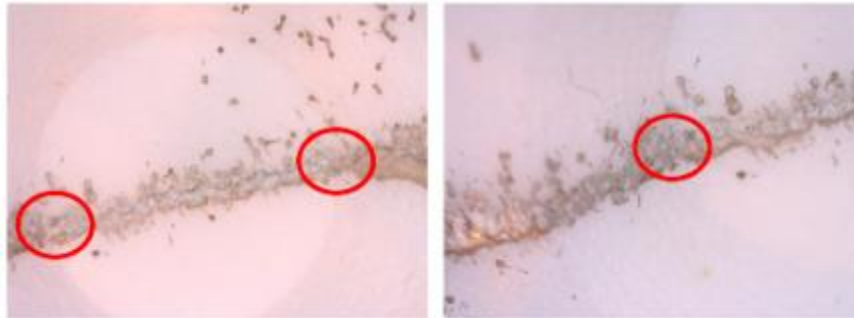


Figura 56. Defectos encontrados en la deposición de tinta HENKEL sobre poliamida, cara (5). Circuito abierto por faltas de material en la arista circular de la base.

- Tinta Dycotec. En el sustrato de Acero Inoxidable (SLM) se tiene conductividad eléctrica válida, de valor 1,2 Ohmios. En "Alumide" (SLS) también se obtiene conductividad eléctrica válida, de valor 19 Ohmios. También en poliamida (SLS) se tiene conductividad eléctrica válida, de valor 6,9 Ohmios.

En el sustrato verowhite no se tiene conductividad eléctrica. Al proceder de forma análoga al planteamiento seguido para la tinta HENKEL, se encuentra que ninguna de las caras conduce. Al tomar tramos localizados de longitudes muy bajas (aproximadamente unos 5 mm), se tiene que tampoco existe conducción eléctrica en los mismos. Por tanto, resulta claro que el defecto detectado en el análisis cualitativo visual, vinculado a la estratificación por el proceso de fabricación, y posterior filtrado de las tintas, llega a ser tan severo que provoca que las pistas sean discontinuas y, por tanto, no conductoras a escala microscópica.

3.2.4.3.5 Análisis de adhesión de tintas según normativa estandarizada ASTM.

Cada una de las pistas depositadas en esta tarea, para cada una de las dos tintas y cuatro sustratos ha sido verificada según esta sistemática. En ningún caso ha habido evidencias de que la tinta se despegase, por lo que se concluye que la adhesión es óptima y, por tanto, la afinidad entre materiales de sustrato y tintas. Esto puede venir en gran medida propiciado por la rugosidad superficial propia de los procesos de fabricación de estos sustratos que, en mayor o menor medida, contribuyen a asimilar las gotas de tinta, como se ha podido apreciar en el análisis cualitativo visual.

3.2.4.3.6 Conclusiones de la tarea

Tras todas las pruebas realizadas es posible constatar una serie de conclusiones:

- Aún consiguiendo que la eyección de tinta sea adecuada, la geometría de la pieza tiene una gran influencia, existiendo zonas delicadas en las que, bien por acumulación de tinta o bien por falta de la misma, no quedan uniformes con el resto de las pistas. Esto se debe, en parte, porque el software de control no permite modificar las velocidades por tramos,

siendo necesario ajustar la velocidad del proceso a la más adecuada para cubrir todo el rango de movimientos en cada deposición. Por ello en las zonas de geometría más uniforme se consigue una mejor calidad de deposición, algo a tener en cuenta a la hora del trazado de pistas en función de cada geometría.

- Respecto al grosor de las pistas depositadas, se ha visto que es fuertemente dependiente tanto del comportamiento reológico de la tinta como de la superficie sobre la que se eyecta, tanto en material como en acabado superficial. En las pruebas realizadas, el grosor se ha mantenido fino y ajustado al ancho objetivo excepto con la tinta J+S UV Supraflex al ser ésta más fluida, haciendo inviable la deposición de líneas paralelas separadas el grosor de línea teórico sin que éstas entren en contacto.

Con las tintas Henkel WIK y Dycotec sí que se podría llegar a igualar el grosor de línea depositado con la separación necesaria entre dos líneas para que éstas no se toquen, pero teniendo siempre en cuenta la geometría sobre la que se van a eyectar, ya que se producen fluctuaciones en el ancho de pista debido a los movimientos en 5 ejes y a los cambios de velocidad relativa entre pieza y cabezal.

- Por estas razones, al no poder controlar la deposición en función de la velocidad relativa entre el cabezal y la pieza, y siendo la frecuencia de eyección uniforme, sería muy complejo poder controlar o estimar los valores de conductividad de cada pista depositada ya que no seguiría un valor uniforme en función de la longitud. En los casos en que conocer este valor sea necesario, hay que realizar pruebas físicas con la misma geometría y realizar las medidas sobre la misma, ya que, aunque no se pueda estimar, sí que se puede obtener una buena repetibilidad al ser un proceso automatizado y contar con un sistema de deposición piezoeléctrico de alta precisión.

3.2.5 T2.5 INVESTIGACIÓN DE PROCESOS DE DEPOSICIÓN AEROSOL-JETTING

En esta tarea se desarrolló el proceso de deposición de tinta de baja viscosidad mediante la tecnología Aerosol-Jet. Para ello y al ser una tecnología novedosa sobre la que se tenía un conocimiento reducido (no en vano, su implementación en el proyecto fue posible gracias a la adquisición de un nuevo equipo), se planteó la realización de pruebas iniciales sobre probetas planas para ajustar el proceso de eyección de la tinta conductora. El planteamiento inicial de esta tarea se centró entonces en el desarrollo del proceso de deposición mediante tecnología Aerosol Jet de tintas con viscosidad adecuada, desarrolladas específicamente para esta aplicación.

En el mercado, la gama de tintas adecuadas para esta aplicación es reducida ya que, aunque por viscosidad puede considerarse que muchas de las tintas desarrolladas para InkJet pueden ser compatibles, debido a la tecnología de deposición se optó por utilizar únicamente tintas específicamente desarrolladas para esta aplicación. De esta forma, el ajuste y optimización de los parámetros de deposición se realizó partiendo de la base de que las tintas eran adecuadas para este uso. Las pruebas inicialmente desarrolladas se caracterizaron por lo siguiente:

- Si bien inicialmente se había propuesto el uso de tinta conductora, tinta resistiva y tinta dieléctrica por esta tecnología, tras una serie de pruebas iniciales simples se descartó el uso de la tinta resistiva, al presentar valores de conductividad muy bajos y, sobre todo, porque la adhesión a los materiales procesables por fabricación aditiva mostró ser (por las pruebas realizadas con anterioridad en las diversas combinaciones entre tintas y sustratos) muy reducida, deteriorándose con mucha facilidad.
- En el caso de la tinta dieléctrica se comprobó que su nivel de aislamiento eléctrico era muy reducido, no siendo apta para su aplicación como aislante, que es la aplicación para la que se incluyó en el presente proyecto. En vez de utilizar la tinta dieléctrica UTDots se ha utilizado la tinta dieléctrica J+S Supraflex para su aplicación sobre las piezas metálicas ya que esta tinta presenta unas propiedades aislantes adecuadas, que permiten validar la deposición de tintas conductoras sobre piezas metálicas recubiertas con esta tinta dieléctrica.
- En cuanto a la tinta conductora, fue necesario modificar la tinta a utilizar por causas externas a IDONIAL, y es que el fabricante de la tinta CLARIANT PRELECT® TPS 50G2 vendió durante el proyecto parte de su negocio de desarrollo de materiales electrónicos a AGFA, en proceso de transferir las tecnologías de desarrollo de tintas y comenzar a fabricarlas ellos mismos, sin que esta compañía pudiera suministrar la tinta original en tiempos aptos para el proyecto. En base a lo anterior, se inició un proceso de búsqueda de una tinta alternativa, siendo seleccionada la desarrollada por el fabricante UTDots, con la referencia UTDAg40X. Según las especificaciones del fabricante, esta tinta ha sido desarrollada específicamente para el sistema Aerosol Jet, por lo que su selección era potencialmente adecuada. Como peculiaridad, para cargar esta tinta en el sistema de deposición es necesario diluirla utilizando para ello Xileno. La disolución propuesta tanto por el fabricante de la tinta como por el fabricante de la máquina de deposición es de 1 Tinta:4 Xileno y esta proporción ha sido la utilizada en el presente proyecto.

En base a estas premisas, debido además a la reducida cantidad de tinta eyectada por este sistema, y con la finalidad de que factores como la rugosidad superficial puedan interferir en la apreciación de la calidad de eyección de tinta de este sistema, las primeras pruebas de ajuste fueron realizadas sobre placas de vidrio portaobjetos de laboratorio, ya que estas permiten apreciar la calidad de la deposición de tinta.

Tras la realización de varias iteraciones y con la finalidad de obtener conductividad eléctrica como parámetro validador, se realizaron deposiciones de líneas de 55mm de longitud sobre estas placas de vidrio, curando posteriormente la tinta y comprobando tanto la calidad de la deposición en el equipo óptico LEICA disponible en las instalaciones de IDONIAL, como la capacidad conductora de las pistas depositadas. Para ajustar la proporción de tinta a eyectar era necesario regular varios parámetros. Estos parámetros se fueron ajustando uno a uno, a fin de verificar la posible mejora o empeoramiento en la calidad de deposición:

- Voltaje del sistema ultrasónico que atomiza la tinta. Este parámetro se ajustó partiendo de un valor de 10V y en incrementos de 2V analizando de forma cualitativa en el microscopio las variaciones producidas. Inicialmente y hasta valores de 18V no se obtuvieron mejoras apreciables, mientras que en el rango 20 – 28V se apreciaba como a mayor voltaje se producía un aumento de la tinta atomizada y, por tanto, de la tinta que era posible eyectar durante el proceso de impresión. Debido a que el resto de parámetros no estaban aún optimizados, se mantuvo como rango operativo el de 20-28V, utilizando 24V como valor intermedio con la finalidad de optimizar los demás parámetros, volviendo a este parámetro de forma iterativa una vez los otros parámetros fueron considerados operativos, con la finalidad de realizar un ajuste más fino del ajuste de voltaje óptimo para la eyección. Finalmente, y tras numerosas iteraciones se concluyó que, para la tinta utilizada, con la dilución con disolvente aplicada el voltaje con el que se obtiene una deposición de mayor calidad era de 25V.
- Flujos de aire de aerosol. La tecnología Aerosol Jet printing se basa en dos flujos de gas, uno de ellos encargado de llevar las partículas atomizadas de tinta hasta el sustrato mientras que el otro se encarga de focalizar estas partículas y conseguir que el sprayado de las mismas sea lo más reducido posible, obteniendo así una deposición controlada de la tinta, lo que permite trazar pistas conductoras de pequeño grosor. Con el ajuste inicial se realizó una optimización primera del parámetro de voltaje del sistema de atomización ultrasónico y, una vez ajustado, se realizaron las iteraciones necesarias para ajustar estos flujos, tras lo que se ha realizado el ajuste final en el que se ha seleccionado el valor de voltaje del dispositivo ultrasónico.

El siguiente flujo en ajustarse fue el del gas de aerosol, realizando variaciones de caudal, y determinando tras comprobar las variaciones en el flujo que el valor de 15 SCCM era el óptimo. El flujo de gas sheath se ajustó partiendo del ajuste anterior y modificando el caudal de 5 en 5 SCCM, llegando a la conclusión de que el intervalo 50 – 60 era el más adecuado, manteniendo los parámetros de entrada de presión de aire uniformes. Todos esos parámetros se han optimizado para su uso con la boquilla FISNAR 25 Gauge (8001274)

- Parámetros de posicionado. Son parámetros de proceso que no se han ajustado como tales, sino que se han tenido en cuenta para el trazado de trayectorias, orientación, y velocidad del proceso. La distancia entre el cabezal de Aerosol Jet y el sustrato se mantuvo entre 1y 3 mm en todo momento para evitar que esta distancia pueda afectar a la deposición de tinta. Este rango es el recomendado por el fabricante y se ha tomado como válido, comprobando su validez durante las pruebas de ajuste realizadas sobre otros parámetros.

La velocidad del cabezal también es un parámetro que influye directamente sobre el resultado de la deposición de tinta ya que el sistema no ajusta las presiones de deposición a la velocidad del sistema. Por ello y debido a la baja cantidad de tinta eyectada y a la rugosidad superficial de las piezas tridimensionales fabricadas mediante impresión 3D, se

mantuvo baja, realizando las deposiciones a la velocidad mínima que permitía el sistema ya que en estas pruebas fue preferible asegurar conductividad sobre superficies rugosas.

La velocidad del cabezal, aunque se fije uniforme, en cambios de sección o aristas disminuye, mientras que la eyección de tinta se mantiene constante. Esto ya se había observado en la deposición de tinta con el sistema Piezo Jet constituyendo pues una limitación del sistema a tener en cuenta en el futuro.

A modo de resumen, los parámetros óptimos obtenidos empíricamente tras la realización de deposiciones de ajuste de impresión son los siguientes:

Tabla 33: Parámetros óptimos Aerosol Jet printing

Voltaje del sistema ultrasónico	25V
Presión de aire sistema	7,5 psi
Aerosol flow	15 SCCM
Sheath flow	50 – 60 SCCM
Boquilla	FISNAR 8001274
GAP	1-3mm
Velocidad "Rapid"	1
Velocidad "Feedrate"	1

Una vez concluidas las labores de ajuste anterior, era posible realizar pruebas propiamente dichas con las tintas y sustratos seleccionados, que pasamos a describir a continuación.

3.2.5.1 Deposición de tinta UTDAg40X sobre placas de vidrio portaobjetos para ajuste de parámetros de impresión con Aerosol Jet

Inicialmente, la deposición de tinta obtenida fue poco consistente, no consiguiendo eyectar la cantidad de tinta continua necesaria para poder tener conductividad eléctrica; además, la tinta se dispersaba mucho, quedando poco definida la línea impresa. Tras los ajustes iniciales, se ha consiguió minimizar esta dispersión de tinta, quedando más ajustada a la forma del patrón lineal que se quería depositar:

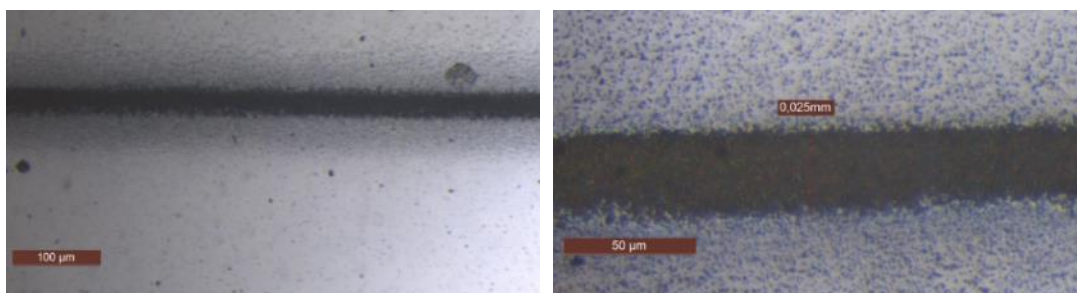


Figura 57. Óptimos de uniformidad y la conductividad tinta UTDAg40X sobre placa de vidrio

3.2.5.2 Deposición de tinta UTDAg40X sobre piezas tridimensionales elaboradas por fabricación aditiva.

Tras ajustar la deposición de tinta sobre las placas de vidrio, se depositó la tinta UTDAg40X sobre piezas con la misma geometría que en la tarea “T2.4 Investigación de procesos de deposición Ink-Jet”. Para ello se utilizó el soporte previamente diseñado y se posicionaron en la máquina de la misma forma que se realizó en la tarea de impresión Ink-Jet con el equipo Piezo Jet. Para ajustar el trazado de las pistas a este equipo de deposición se utilizó el software Motion3D, de Neotech AMT, partiendo de las trayectorias generadas para la impresión ink-jet y adaptando el cabezal de deposición a Aerosol Jet, con sus parámetros de equipo.

Una vez simulada la trayectoria se pasó a probar en el equipo ajustando el gap entre boquilla y pieza en el rango 1-3mm ya que es el óptimo para la deposición de tinta. El patrón depositado presentaba una buena definición a simple vista en casi todas las piezas, con alguna zona (aristas, cambios de altura...) con errores de deposición, pero en general con un buen acabado.

El curado de la tinta conductora se realizó durante 12 horas a 150°C para asegurar que el secado y curado fuera el adecuado al realizarse el mismo a temperatura inferior a la indicada por el fabricante. El fabricante recomienda realizar el curado a 200°C para obtener la máxima conductividad posible, pero dado que esta temperatura afecta a los materiales de las piezas tridimensionales, el fabricante recomendó en nuestro caso 150°C como temperatura mínima y un aumento de tiempo de curado para asegurar que la tinta fuera conductora.

Veamos a continuación detalles concretos sobre las pruebas realizados sobre diversos sustratos:

- **Deposición sobre Poliamida.** La deposición de tinta conductora sobre poliamida se consideró adecuada: las pistas impresas presentaban una buena uniformidad y grosor uniforme. Al ser un material poroso, la tinta es absorbida por el propio material por lo que no se aprecia apenas relieve en la pista depositada, pero como la cantidad máxima de tinta eyectada por esta tecnología es reducida, incluso imprimiendo a mínima velocidad para tratar de aportar la mayor cantidad de tinta posible no se ha conseguido que las pistas depositadas fueran conductoras eléctricas. Algún tramo de 1cm de longitud presenta valores de resistencia de 100 - 220Ω, pero de forma muy variable. Esto es algo que ya se había planteado como posibilidad, ya que la cantidad de tinta depositada mediante Aerosol Jet es muy reducida, específica para el trazado de líneas de muy bajo grosor y espesor, por lo que sobre este material no se ha podido conseguir conductividad eléctrica.

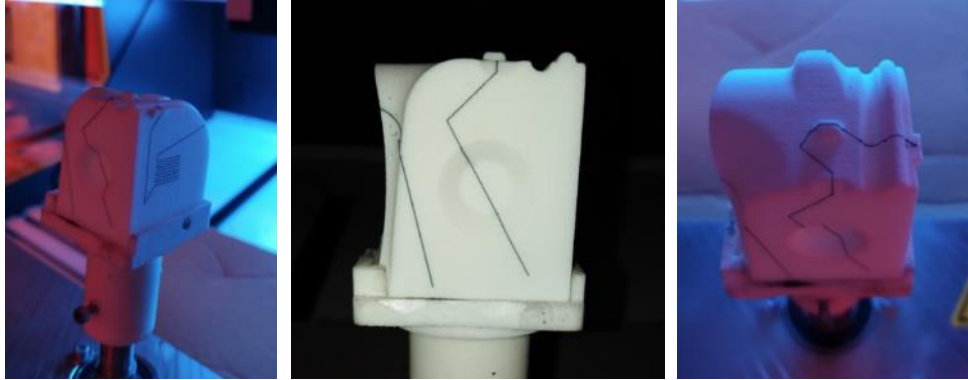


Figura 58. Deposición de tinta conductora por Aerosol Jet sobre poliamida

- **Deposición sobre Alumide.** El Alumide es una poliamida con partículas de aluminio, lo que lo dota de mayor rigidez y resistencia mecánica. Las piezas fabricadas en Alumide tienen un color gris metálico y una rugosidad superficial similar a las realizadas en poliamida. La deposición sobre Alumide se realizó de forma adecuada, siendo más complicado observar a simple vista la calidad de deposición debido a su color gris, que contrasta poco con el color grisáceo de la tinta conductora depositada.



Figura 59. Piezas de Alumide con pistas conductoras en su superficie

En cuanto a la conductividad eléctrica, ocurre algo similar que con la poliamida. Debido a la rugosidad y porosidad superficiales, la cantidad de tinta eyectada no fue suficiente para asegurar una buena conductividad eléctrica, obteniendo solo pequeñas zonas aleatorias con algo de conductividad. Como ejemplo, en algunas zonas se ha podido medir una resistencia eléctrica de unos 40-60Ω en tramos de longitud de unos 3mm. Por ello, junto con la poliamida, el Alumide se considera un material no adecuado para depositar tinta sobre él mediante Aerosol Jet.

- **Deposición sobre Nylon FDM.** Las piezas fabricadas por tecnología FDM en nylon tienen una muy buena apariencia, con un acabado superficial que dista bastante del típico acabado esperable en piezas fabricadas por FDM. Por ello, aunque la tecnología es la

misma, se planteó también la deposición de tinta conductora sobre piezas realizadas por FDM en material PLA, que tienen un acabado más acorde a los procesos FDM estándar. El equipo FDM que fabrica con Nylon permite obtener buenas geometrías con una superficie bastante uniforme, sobre la que se ha depositado tinta conductora eyectada por el sistema Aerosol Jet.



Figura 60. Piezas de Nylon FDM con pistas depositadas

En cuanto a la conductividad eléctrica, presentaba zonas con cortes debidos a la geometría al igual que los casos anteriormente descritos ya sea en zonas con aristas o cambios de altura. En las zonas en la que la línea es continua se tiene conductividad eléctrica del orden de 4 - 5,5 Ω por cm lineal. Esta variación de resistencia se considera adecuada ya que la superficie presenta cierta rugosidad, lo que hace que el espesor de tinta depositado presente variaciones. Esto contrasta con las placas portaobjetos de vidrio en las que, una vez ajustada la deposición, presentaban una resistencia lineal con menor variación al presentar una superficie más lisa, aunque con el inconveniente de que durante la medida se deterioran y cortan las pistas debido a la baja adhesión superficial del vidrio.

- **Deposición sobre PLA FDM.** La razón de realizar estas pruebas de deposición sobre piezas realizadas por FDM en PLA era la de validar la deposición de tinta conductora mediante Aerosol Jet sobre superficies que presentaran el acabado típico de las piezas realizadas por FDM en las que se puede apreciar cada capa depositada. El interés radicaba en ver cómo se comporta la tinta sobre esta superficie ya que, aunque es irregular, no es porosa como la Poliamida o el Alumide, por lo que es posible que se obtenga conductividad en las pistas depositadas.

Cabe destacar que este material no soporta bien altas temperaturas, por lo que la parte superior se deformó durante el proceso de curado térmico de la tinta. Para este estudio no se consideró algo relevante, ya que está condicionado por la temperatura mínima de curado de la tinta, pudiendo ser operativo con otras tintas o mayores tiempos de curado.



Figura 61. Zona superior de la pieza, se aprecia la deformación debida a la temperatura

Una vez curada la tinta se ha procedido a comprobar la resistencia eléctrica de las pistas conductoras, siendo esta variable entre 27 - 300 Ω /cm. Esta gran variabilidad encaja con la suposición de que la no uniformidad de la superficie afecta mucho al espesor de la tinta depositada sobre la pieza, presentando zonas con cortes y zonas con mala conductividad. Los resultados obtenidos sobre las piezas de PLA se consideran adecuados teniendo en cuenta el proceso de deposición de tinta Aerosol Jet y su superficie irregular.

- **Deposición sobre Vero White.** La deposición sobre Vero White se realizó siguiendo la misma metodología que sobre el resto de materiales. Esta resina presenta una superficie bastante uniforme, con un buen acabado superficial, aunque presenta una cierta rugosidad.

La deposición de tinta se ha realizado de forma adecuada, obteniendo líneas finas y uniformes, presentando los mismos errores que sobre el resto de piezas debidos a la geometría tridimensional compleja, aristas y cambios de altura.



Figura 62. Deposición de tinta conductora sobre piezas de Vero White

Pudo apreciarse en las piezas de Vero White que tras el tratamiento térmico de curado de la tinta su color pasó de un blanco inicial hasta un color amarillento en la pieza una vez curada la tinta. Esto es debido a la temperatura de 150°, ya que este material no está preparado para soportar estas temperaturas y ha sufrido una degradación superficial.

En cuanto a la conductividad, en general no se consiguió que las pistas sean conductoras eléctricas. Esto puede estar causado por la degradación de la superficie, ya que a 150° presenta un tacto pegajoso, con lo que ha podido interactuar con la propia tinta evitando su conductividad eléctrica. En los tramos que conduce, se ha obtenido una resistencia del orden de 50Ω/cm lineal, siendo muy pocas zonas las que conducen la electricidad por lo que no se ha considerado un material operativo para imprimir mediante Aerosol Jet sobre él.

- **Deposición sobre PH1 + dieléctrico.** Para poder depositar sobre PH1 fue necesario darle un recubrimiento de tinta conductora. La tinta adecuada para su deposición por aerosol no funcionó (sus capacidades de aislamiento son muy reducidas), por lo que se optó por utilizar la tinta dieléctrica que se fue utilizada en la tarea Ink-Jet, ya que se ha visto que aislaba de forma adecuada.

Una vez curada por UV esta tinta dieléctrica se procedió a depositar la tinta conductora sobre la pieza y a realizar el proceso de curado térmico al conjunto.

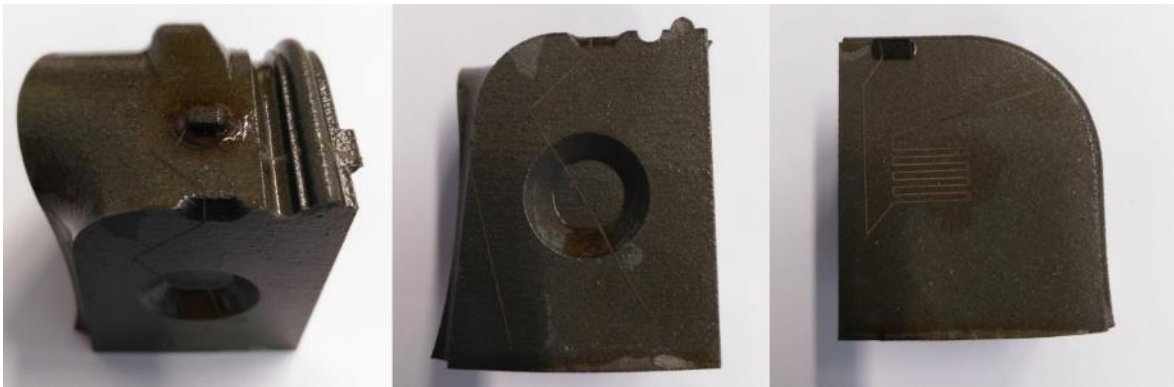


Figura 63. Deposición de tinta conductora sobre piezas de PH1 + dieléctrico

La tinta se depositó de forma adecuada, con líneas finas y uniformes. Al tener un recubrimiento de tinta dieléctrica, esto ayudó a suavizar la rugosidad superficial de la pieza en PH1, por lo que a simple vista se aprecia que la tinta tiene buena continuidad y acabado. Con el proceso térmico la resina dieléctrica sufre un pequeño amarilleamiento, pero sus propiedades se mantienen operativas, aportando un buen aislamiento eléctrico.

En cuanto a la conductividad eléctrica de las pistas, esta se ha considerado bastante buena ya que, salvo en los cortes producidos en las pistas debidos a la geometría de la pieza, las pistas presentan conductividad eléctrica. La resistencia eléctrica de las pistas conductoras

varía según la zona, siendo menor en zonas planas y mayor en zonas con cambios de geometría, algo lógico viendo la tipología de esta pieza. El rango de resistencia eléctrica de las pistas está entre 7-15 Ω /cm lineal en las zonas planas y unos 30-40 Ω /cm en zonas con curvatura o pequeñas aristas.

- **Deposición sobre cerámica.** La deposición sobre cerámica se realizó sobre piezas cónicas con la misma geometría que las utilizadas en la tarea Ink-Jet. Se descartó el uso de piezas de similar geometría que el resto de materiales, ya que el equipo utilizado para su fabricación fallaba durante la misma al ser piezas relativamente grandes para sus capacidades.

En el caso de estas piezas cónicas, el equipo de fabricación funcionó de forma adecuada, obteniendo una geometría no exenta de aristas y cambios de altura para la deposición. Se utilizó un soporte realizado a medida para la sujeción de estas piezas a la plataforma del equipo de impresión, y se procedió a depositar la tinta mediante Aerosol Jet sobre su superficie. Posteriormente se realizó el tratamiento térmico para el curado de la tinta, al igual que con las piezas del resto de materiales.



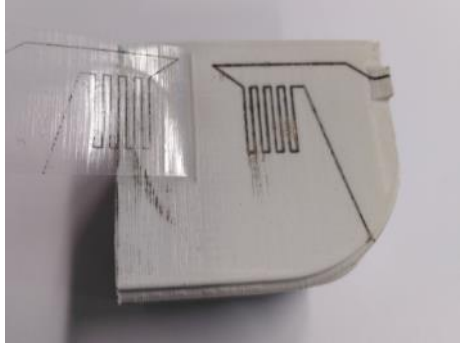
Figura 64. Piezas de cerámica con tinta conductora

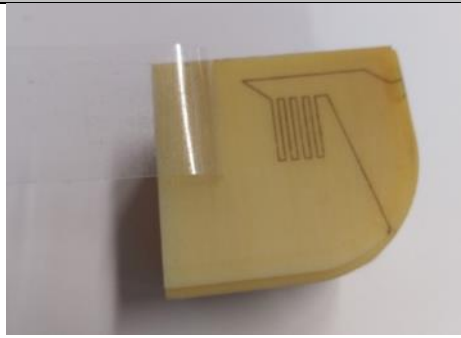
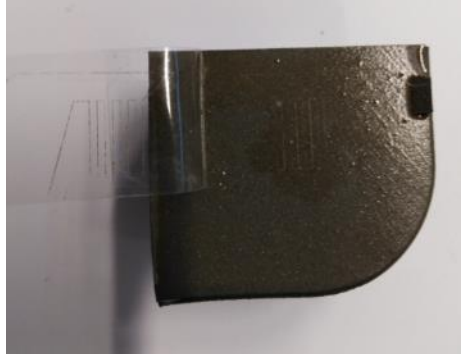

Tras el curado térmico de las pistas conductoras se procedió a comprobar la resistencia de las pistas depositadas, obteniéndose valores de entre 5 - 8 Ω /cm lineal. Estos buenos valores están influenciados por la superficie de las piezas ya que mediante el proceso Lithography-based Ceramic Manufacturing (LCM) se consigue una superficie con baja rugosidad y baja porosidad, lo que facilita la continuidad de la tinta depositada sobre ella mediante Aerosol Jet.

3.2.5.3 Pruebas de adhesión de tinta

Se realizaron pruebas de adhesión sobre las pistas depositadas sobre las piezas fabricadas por impresión 3D. Para ello se siguió la norma ASTM estandarizada y su sistemática de uso de cinta adhesiva. En la realización de estas pruebas, se pegó una cinta adhesiva 3M sobre las piezas con las pistas depositadas y se despegó esta cinta, tirando con ángulo 180° para comprobar si la fuerza de adhesión de la superficie de la pieza y la tinta evita que la tinta se quede pegada a la cinta adhesiva.

Tabla 34: Resumen de resultados de adhesión de las pruebas realizadas con la tecnología Aerosol Jet

Material	Prueba	Resultado
Poliamida PA2200		La tinta depositada mediante Aerosol Jet sobre poliamida PA2200 sufre desprendimiento al realizarle la prueba de adhesión. Una pequeña parte de la tinta se queda pegada a la cinta adhesiva por lo que se considera que la adhesión no es adecuada.
Alumide		La prueba de adhesión realizada sobre Alumide presenta cierta mejora respecto a la realizada sobre Poliamida, presentando una adhesión bastante buena, aunque con ciertas partes de la tinta que se quedan adheridas a la cinta adhesiva.
PLA FDM		La prueba de adhesión realizada sobre PLA FDM indica malos resultados en términos de adhesión de la tinta sobre este sustrato al quedarse gran parte de esta tinta adherida a la cinta adhesiva por lo que no se considera correcta.
ONYX FDM		La prueba de adhesión realizada sobre Onyx FDM indica falta de adhesión superficial de la tinta ya que parte de la misma se queda adherida a la cinta adhesiva.

Material	Prueba	Resultado
Vero White		La prueba de adhesión realizada sobre la pieza de Vero White indica una buena adhesión de la tinta ya que no se levanta ni total ni parcialmente de la pieza al realizar la prueba de la cinta adhesiva.
PH1 + dieléctrico		La prueba de adhesión realizada sobre la pieza de PH1 con recubrimiento dieléctrico indica una adhesión deficiente de la tinta, por lo que no se considera adecuada.
Cerámica UTDots		Se ha realizado la prueba de adhesión de la cinta adhesiva sobre el cono de cerámica con tinta UTDots depositada por Aerosol Jet. Esta prueba indica falta de adhesión de la tinta al sustrato ya que ésta se levanta parcialmente durante la prueba de adhesión.

3.2.5.4 Análisis visual cualitativo y dimensional de topología de pistas impresas: microscopía digital

La parte de análisis visual de la tarea de Aerosol Jet es similar a la realizada para el sistema Piezo Jet. Para ello se ha caracterizado la apariencia de las pistas depositadas en zonas delicadas, donde se espera que pueda haber fallos o problemas, inspeccionando las mismas zonas que en la tarea 2.4.

A continuación, se pasan a detallar para cada material los resultados de la deposición de pistas de tinta **UTDAg40X** sobre cada material:

- Poliamida. Las líneas depositadas sobre poliamida presentan una uniformidad bastante buena a la vista, con pistas bien definidas. En las caras planas la tinta tiene un acabado más definido que en las zonas con curvatura ya que las piezas presentan un peor acabado superficial en esas zonas. En la zona del serpentín (3) se aprecia una geometría bien definida

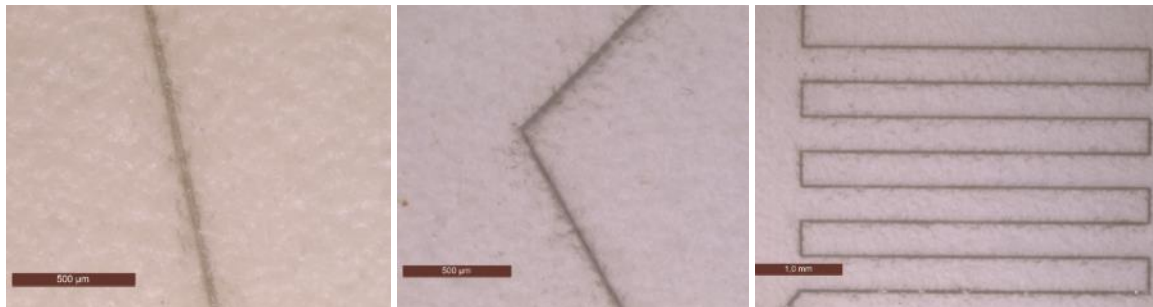


Figura 65. Pista depositada sobre pieza de poliamida zonas 1, 2 y 3

En las zonas 4 y 5 es donde se aprecia mayor pérdida de definición, con cortes en las pistas y una peor calidad de la deposición.



Figura 66. Pista depositada sobre pieza de poliamida zona 4 y zona 5

- Alumide. En Alumide se aprecia peor la tinta depositada ya que son piezas de color similar, pero aun así se puede ver que las pistas se han depositado de forma adecuada, con una buena definición.

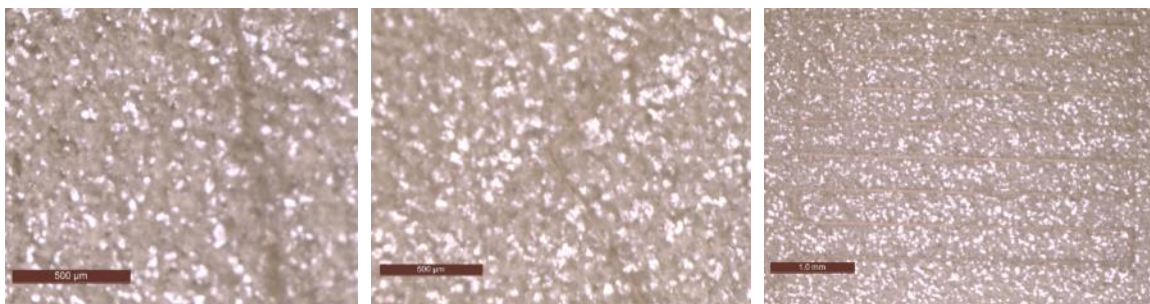


Figura 67. Pista depositada sobre pieza de ALUMIDE zonas 1, 2 y 3

En las zonas 4 y 5 tiene una peor calidad de deposición debido a los cambios de geometría en esas zonas.



Figura 68. Pista depositada sobre pieza de ALUMIDE zona 4 y zona 5

- PLA FDM. Las piezas elaboradas por FDM en material PLA presentan una estratificación definida de capas por lo que su geometría presenta ondulaciones en su superficie, que afecta a la deposición de tinta como puede verse en las siguientes imágenes; en la zona del serpentín la calidad es buena, aunque hay una zona en la que se ha corrido un poco la tinta al manipular la pieza antes del curado de la tinta.

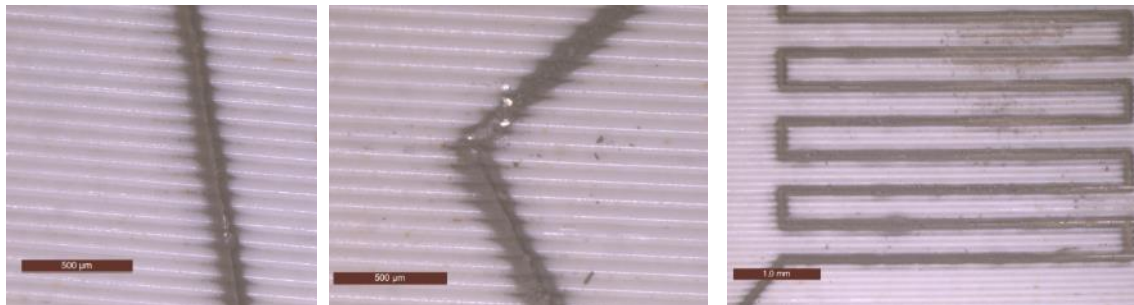


Figura 69. Pista depositada sobre pieza de PLA FDM zonas 1, 2 y 3

En las zonas con geometría más compleja se puede apreciar una calidad deficiente en las pistas depositadas, manteniendo zonas uniformes, pero sufriendo cortes en las pistas.

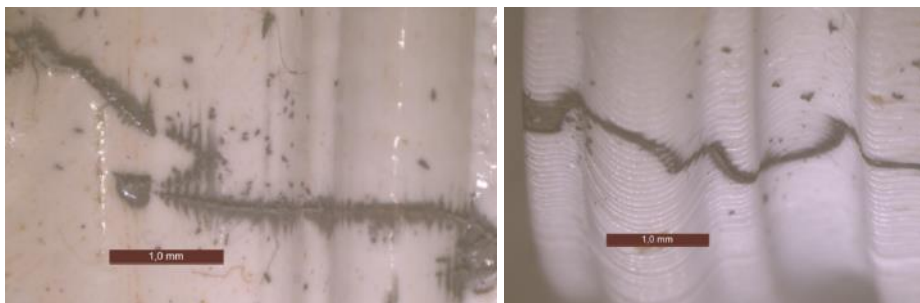


Figura 70. Pista depositada sobre pieza de PLA FDM zonas 4 y 5

- NYLON FDM (ONYX). Debido al material y al equipo de fabricación de las piezas mediante FDM en ONYX, las capas presentan un menor relieve que en las piezas en PLA. Por ello,

presentan una superficie más uniforme, lo que mejora la deposición de tinta. La calidad de deposición es correcta, como puede verse en las imágenes de las zonas 1, 2 y 3.

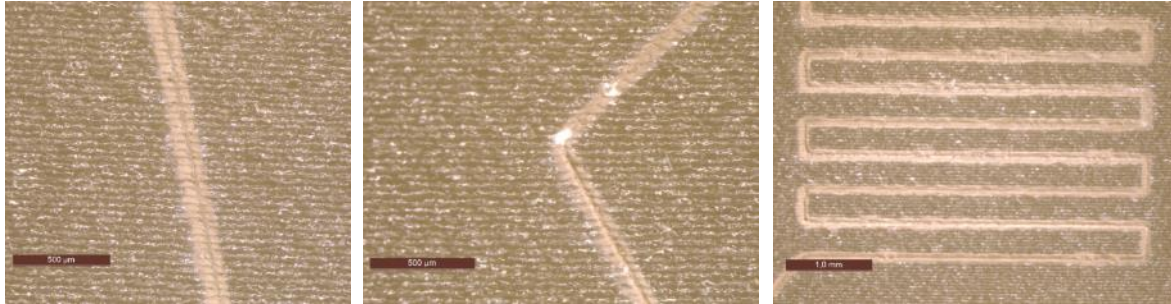


Figura 71. Pista depositada sobre pieza de NYLON FDM zona 3

En las zonas con variaciones de geometría presentan una calidad bastante buena. Se nota un empeoramiento general en la calidad de la deposición, pero se ha mantenido la continuidad en las pistas conductoras.

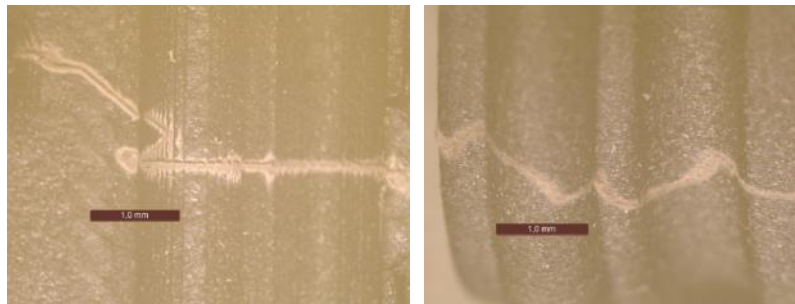


Figura 72. Pista depositada sobre pieza de NYLON FDM zonas 4 y 5

- VERO WHITE. El acabado superficial de las piezas realizadas en Vero White es bastante bueno, apreciándose una deposición buena aunque con influencia de las capas de fabricación que, aunque son finas, puede apreciarse como la tinta fluye un poco por los pequeños valles horizontales de la superficie. Aun así, la calidad es buena, presentando buena definición y un grosor de pista contenido.

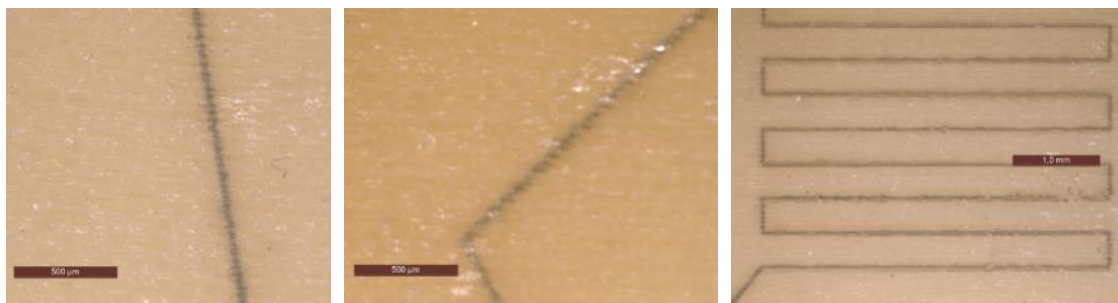


Figura 73. Pista depositada sobre pieza de VERO WHITE zonas 1, 2 y 3

En las zonas de la pieza con mayor complejidad geométrica, la calidad ha sido bastante buena, aunque ha habido algún corte en las pistas, por lo que la continuidad no es adecuada.

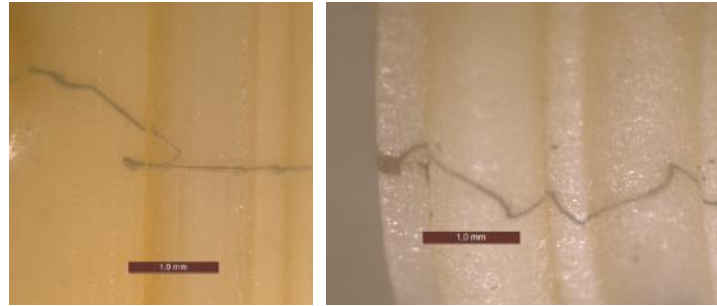


Figura 74. Pista depositada sobre pieza de VERO WHITE zona 4 y zona 5

- **PH1 + DIELECTRICO.** Las piezas en PH1 están recubiertas de una resina dieléctrica para evitar la interacción del material metálico conductor con las pistas depositadas. La calidad de la deposición sobre la superficie de estas piezas es buena, con alta definición y uniformidad.

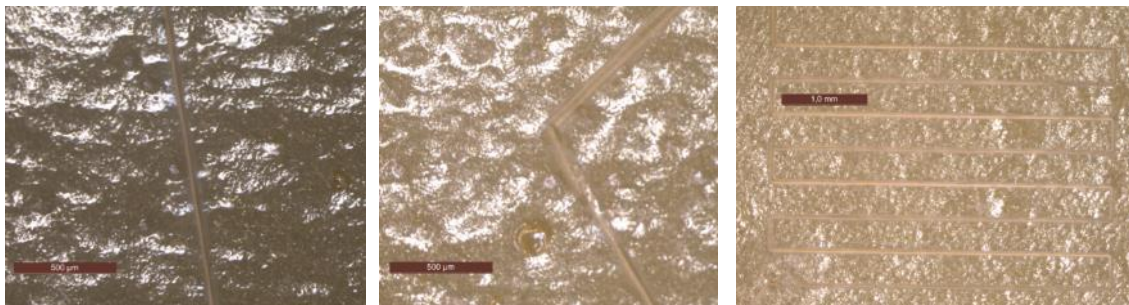


Figura 75. Pista depositada sobre pieza de PH1 zonas 1, 2 y 3

En las zonas complejas de las piezas, la calidad disminuye, aunque sigue siendo bastante alta. Se ha detectado algún corte en las pistas, por lo que la continuidad eléctrica no está asegurada.

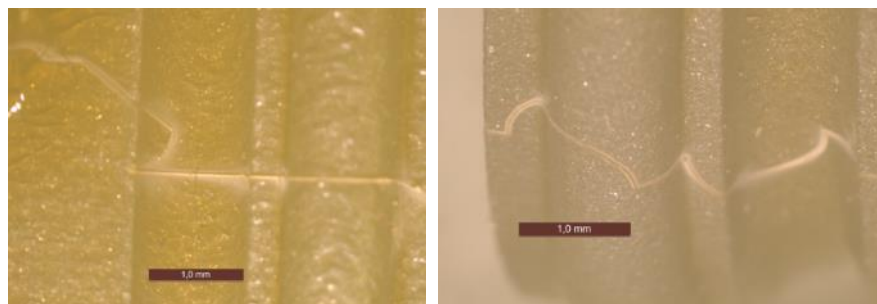


Figura 76. Pista depositada sobre pieza de PH1 zona 4 y zona 5

- **Cerámica.** La pista depositada sobre el cono cerámico presenta una muy buena definición y calidad, sin cortes en las zonas con relieve y con un grosor de pista reducido.

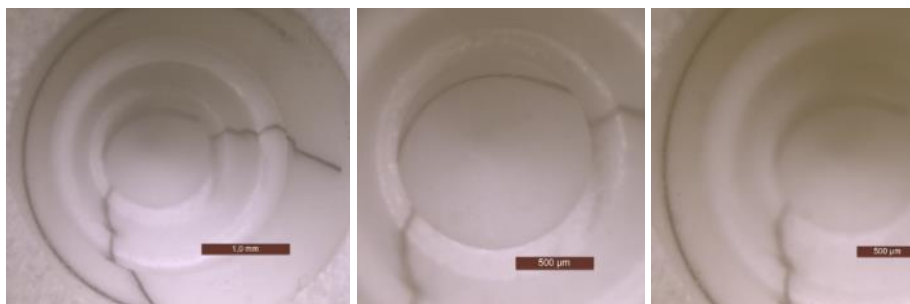


Figura 77. Pista depositada sobre pieza cerámica por Aerosol Jet

3.2.5.5 Análisis visual cualitativo y dimensional de topología de pistas impresas: microscopía confocal

Se ha realizado un estudio de microscopía confocal en las pistas depositadas sobre las piezas de diferentes materiales. Se ha medido, al igual que en la comprobación de la deposición Piezo Jet, la zona 1 de las piezas.



Figura 78. Zona a considerar en el análisis por microscopía confocal.

Se resumen en la tabla siguiente los resultados:

Tabla 35: resumen de resultados de la microscopía confocal

Conjunto Tinta-sustrato	Resultados
Tinta UTDAg40X - Poliamida	El espesor de tinta aportado es muy reducido, siendo éste incluso inferior a zonas superficiales de la propia pieza por lo que no es posible cuantificarlo. Esto tiene sentido ya que la cantidad de tinta eyectada durante la impresión por Aerosol Jet es muy reducida por lo que, sumado a la alta rugosidad de la pieza, hace que la tinta prácticamente no tenga relieve, queda embebida en la propia superficie de la pieza.
Tinta UTDAg40X - Alumide	No es posible valorar el espesor de tinta depositada sobre la superficie. Al igual que sobre el sustrato Poliamida, esto tiene sentido debido a su alta porosidad.

Tinta UTDAg40X – PLA (FDM)	La zona donde se ha depositado la tinta no presenta relieve apreciable, por lo que no es posible realizar una medida precisa del ancho de pista ni de su espesor.
Tinta UTDAg40X – Nylon FDM (ONYX)	tanto en este material como en el resto de materiales medidos, que un espesor muy bajo de tinta depositado sobre superficies con cierta rugosidad no permite obtener valores de medida. Esto tiene cierta lógica ya que, debido a su baja densidad, la tinta penetra en los poros y canales de la superficie, reduciendo todavía más su espesor respecto a su deposición sobre sustratos con una superficie uniforme de baja rugosidad.
Tinta UTDAg40X – Vero White	En este caso se aprecia que la zona donde está la pista de tinta conductora presenta una elevación mayor que el resto de zonas de la superficie de la pieza. Aun así, este incremento es muy pequeño en comparación con la propia rugosidad de la pieza, por lo que no se puede obtener una medida clara del espesor de tinta al no conocer los valores de altura de la superficie sobre la que se ha eyectado.
Tinta UTDAg40X – PH1 Dieléctrico	Gracias al recubrimiento dieléctrico de la pieza de PH1, se ha podido medir el espesor y ancho medio de la pista conductora depositada mediante Aerosol Jet sobre la superficie de la pieza. La altura media es de 30,9µm con una anchura de 100µm en la base de la tinta. Esta anchura se va reduciendo con el aumento de altura de la pista depositada. Con estos valores podemos hacernos una idea de la deposición de tinta real sobre el sustrato mediante la tecnología Aerosol Jet.
Tinta UTDAg40X – Cerámica	El cono de cerámica no ha podido medirse en el conofocal debido a su geometría, por lo que se ha comprobado con un equipo de microscopía óptica el grosor de línea depositado.

3.2.5.6 Conclusiones de la tarea

Vamos a enumerar las principales conclusiones obtenidas tras el desarrollo de esta tarea:

- En esta tarea se ha comprobado la viabilidad del uso de sistema de impresión de tintas conductoras Aerosol Jet sobre diferentes materiales.
- Estos materiales son los propios de las piezas tridimensionales elaboradas por fabricación aditiva, no estando pensados como sustrato para impresión. Por ello, esta tecnología no ha podido obtener los resultados óptimos que pueden verse sobre otros materiales más adecuados.
- Al presentar, en general, superficies no uniformes, rugosidades relativamente altas y una porosidad elevada en muchos de los casos, la compatibilidad de estas piezas con la tecnología Aerosol Jet es muy limitada.
- La deposición por Aerosol Jet presenta unas ventajas coincidentes con la eyección de cantidades muy reducidas de tinta. Con esto pueden obtenerse líneas muy finas, incluso con una anchura menor de 20µm y un espesor inferior a 1µm en la mayoría de los casos.

- En las pruebas realizadas se ha conseguido eyectar la tinta con el patrón definido con líneas de unas 25 -30 μm , que se consideran muy finas, teniendo en cuenta que la prioridad ha sido la de eyectar la mayor cantidad de tinta posible para tratar de obtener conductividad eléctrica sobre estas piezas.
- Tras observar los resultados obtenidos y partiendo de la base de que el sistema de deposición se ha conseguido optimizar de tal forma que el caudal de tinta eyectado es homogéneo, no puede considerarse un sistema de deposición adecuado para la mayoría de los materiales que se han probado.
- Solamente se considera adecuado para su eyección sobre PH1+dieléctrico al presentar la pieza una disminución de la rugosidad superficial y la porosidad dada por el recubrimiento dieléctrico, y sobre piezas cerámicas al obtenerse en la fabricación de las piezas una superficie uniforme con baja rugosidad superficial.
- También se ha observado la gran dependencia de la geometría con la continuidad de las pistas conductoras ya que, al depositar una cantidad tan reducida de tinta, cualquier cambio brusco en la geometría conlleva cortes en la pista a depositar, por lo que se desaconseja su uso en el caso de disponer de aristas, cambios de altura e incluso pequeñas curvaturas si no presentan una superficie muy uniforme que actúe como sustrato de impresión para esta tinta.

3.2.6 T2.6 INVESTIGACIÓN DE PROCESOS DE INTEGRACIÓN DE COMPONENTES ELECTRÓNICOS

3.2.6.1 Identificación y selección de adhesivo conductor

Para la fijación del componente electrónico a la pieza y para su correcto conexionado eléctrico es necesario el uso de un adhesivo que conduce la electricidad. Para ello será necesario dispensar una pequeña cantidad de adhesivo en la zona donde se posicionará cada pad del elemento electrónico. Con ello se realizará la conexión entre las pistas conductoras depositadas sobre la pieza y el componente.

En lo referente al proceso de secado o curado del adhesivo, la mayoría de adhesivos presentan curado térmico, variando la temperatura y tiempo de proceso necesario en función del adhesivo, de la cantidad depositada e incluso de los materiales sobre los que se deposita. También existen adhesivos de curado UV, adecuados cuando la temperatura puede afectar térmicamente a las piezas o componentes, aunque presentan una menor conductividad.

Dentro de los adhesivos, pueden diferenciarse también en función de si es necesario mezclar dos componentes o vienen directamente listos para utilizar. En el presente proyecto se va a utilizar adhesivo conductor mono-componente, ya que los sistemas de dispensado disponibles no permiten el uso de adhesivos bi-componente. Se ha realizado una búsqueda de adhesivos conductores mono-componente comerciales, centrándose en los adhesivos de curado térmico ya

que los valores de conductividad son normalmente más elevados que los de curado UV al no presentar aditivos no conductores para el proceso de curado UV. Para evitar que pueda dañarse la pieza o los posibles componentes electrónicos a utilizar se ha filtrado la gama de adhesivos posibles limitando la temperatura de curado a 140°C como máximo, descartando los que necesitan temperaturas más elevadas, aunque sea por cortos periodos de tiempo.

Se optó además por usar adhesivos isotrópicos ya que para que los adhesivos anisotrópicos tengan conductividad eléctrica en el eje Z es necesario realizar un proceso térmico y de presión al posicionar el componente que no es operativo para su utilización sobre piezas tridimensionales. El uso de un thermode es necesario y habría que estudiar en detalle el comportamiento del componente electrónico a depositar, para ver si el calor le afecta negativamente y si puede soportar la presión necesaria sin deteriorarse.

Teniendo todo lo anteriormente descrito en cuenta y, tras realizar una búsqueda detallada, se seleccionó el adhesivo PANACOL ELECOLIT 3043, un adhesivo mono-componente epoxi con alto contenido en partículas conductoras de plata, lo que asegura una buena conductividad eléctrica una vez curado. La viscosidad de este adhesivo es de 4000-5000 cps, lo que hace que sea adecuado para su dispensado.

3.2.6.2 Pruebas de adhesión realizadas con adhesivo conductor sobre sustratos 2D.

Una vez seleccionado el adhesivo, se han realizado pruebas de dispensado sobre probetas de cada material para comprobar que la adherencia es adecuada y que, una vez curado, conduce adecuadamente.



Figura 79. Probetas de los materiales a testear con el adhesivo seleccionado.

En un primer punto se ha verificado la condición de curado térmico para el adhesivo según sus parámetros óptimos, que son 90 minutos a una temperatura de 120°C. En este caso todos los materiales soportan esa temperatura, por lo que se han realizado pruebas de dispensado y curado de adhesivo con esos valores, descartando las otras opciones posibles dadas por el fabricante ya sea por su alta temperatura necesaria como por tiempos muy largos de proceso. Una vez verificado el correcto curado del adhesivo se ha procedido a dispensar el adhesivo sobre los diferentes materiales, realizando diferentes patrones de deposición.

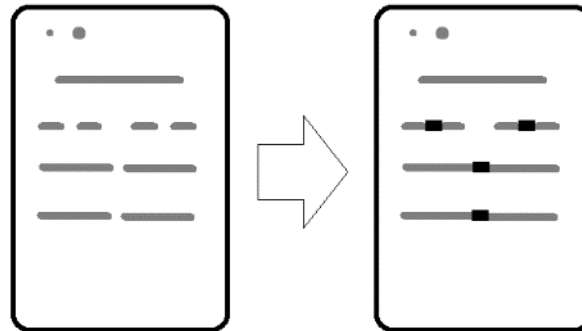


Figura 80. Ejemplo de patrón de adhesivado.

Se ha depositado una gota con un volumen aproximado de 0.005ml y otra gota con un volumen aproximado de 0.034 ml para comprobar que ambas cantidades de adhesivo curaban bien en el proceso de 120°C durante 90 minutos y verificar una correcta adhesión a las piezas.



Figura 81. Ejemplo de deposición de adhesivo.

Por ello se ha realizado la prueba de la cinta adhesiva sobre estas dos gotas dispensadas, obteniendo los siguientes resultados.

Tabla 36: resultados observados en las pruebas de adhesivado realizadas

POLIAMIDA	BUENA ADHESIÓN
ALUMIDE	BUENA ADHESIÓN
NYLON FDM	MALA ADHESIÓN
VERO WHITE	BUENA ADHESIÓN
PHI+DIELÉCTRICO	BUENA ADHESIÓN
CERÁMICA	BUENA ADHESIÓN

Así, se considera que la adhesión del adhesivo conductor ELECOLIT 3043 es buena sobre todas las piezas excepto las de Nylon FDM (en este caso se ha comprobado que el curado no ha sido adecuado ya que el adhesivo estaba todavía fluido, si bien mayores tiempos de curado mejorarían el resultado), por lo que a priori su uso es adecuado para esta aplicación.



Figura 82: Problema de adhesión sobre NYLON FMD por un curado insuficiente del adhesivo.

Para verificar que la conductividad del adhesivo es correcta y verificar de nuevo la adhesión se ha trazado sobre cada pieza una pista conductora de 10mm de longitud, sobre la que se han realizado medidas de resistencia eléctrica y posteriormente prueba de adhesión, obteniendo los siguientes resultados:



Figura 83. Líneas conductoras depositadas sobre probetas en diversos materiales.

Tabla 37: valores de resistencia obtenidos

POLIAMIDA	3,4 Ω
ALUMIDE	4,1 Ω
NYLON FDM	-- Ω (mal curado, mala adhesión)
	3,7 Ω (curado adecuado, buena adhesión)
VERO WHITE	1,3 Ω
PH1+DIELÉCTRICO	5,5 Ω
CERÁMICA	4,2 Ω

Para comprobar su capacidad de fijación y no solo su adherencia al material de las piezas, se han colocado componentes electrónicos de montaje SMD sobre las probetas de cada material para comprobar si los componentes se fijan adecuadamente. Esta comprobación se ha realizado de

manera manual evaluando la fuerza necesaria para quitar el componente adherido a la pieza con unas pinzas, comprobando así de una manera cualitativa la calidad de la adhesión.

Para ello, se han fijado dos resistencias SMD mediante dos pequeñas gotas de adhesivo de tal forma que cada gota se fija a un pad de conexión de las resistencias SMD. También se han trazado pequeñas pistas conductoras utilizando el adhesivo como tinta y colocando resistencias SMD directamente en el gap que se ha dejado para ello.



Figura 84. Componentes depositados sobre probetas en diversos materiales.

Tabla 38: fijación de componentes sobre los diferentes sustratos

	COMPONENTE SMD 1	COMPONENTE SMD 4	COMPONENTE SMD 3	COMPONENTE SMD 4
POLIAMIDA	SUFICIENTE	SUFICIENTE	SUFICIENTE	ALTA
ALUMIDE	SUFICIENTE	ALTA	MUY ALTA	MUY ALTA
NYLON FDM	BAJA	BAJA	BAJA	BAJA
VERO WHITE	BAJA	BAJA	BAJA	ALTA
PH1+DIELÉCTRICO	MUY ALTA	MUY ALTA	MUY ALTA	MUY ALTA
CERÁMICA	MUY ALTA	MUY ALTA	MUY ALTA	MUY ALTA

Así:

- En el caso del ALUMIDE no se ha conseguido arrancar los componentes SMD 3 y SMD 4.
- Sobre NYLON FDM y VERO WHITE la adhesión no ha sido alta, puede valorarse ampliar el tiempo de curado para mejorar la adhesión ya que el calor penetra peor bajo componentes SMD.
- Sobre PH1+DIELÉCTRICO y CERÁMICA la adhesión ha sido muy alta en todos los casos, posiblemente debido a que son buenos conductores térmicos y el curado del adhesivo se ha realizado de forma más uniforme.

3.2.6.3 Deposición de adhesivo y colocación de componentes sobre piezas tridimensionales

Dado que para la ejecución de los demostradores y para futuras piezas con electrónica en su superficie se va a contar con geometrías complejas es necesario validar la viabilidad tanto de dispensado como de colocación de componentes sobre las piezas. A la hora de colocar los componentes electrónicos (en este caso resistencias SMD) tanto si se colocan manualmente como si se colocan de forma automatizada se obtiene una mejor precisión si se colocan de forma perpendicular a la superficie de la pieza. Esto puede ser más variable en el caso de posicionar los componentes con pinzas, pero en el caso de utilizar sistemas pick and place ya sean automatizados o manuales se convierte en algo indispensable ya que la sujeción del componente se realiza en posición vertical y su colocación también, por lo que la pieza deberá estar girada en una posición que permita la colocación del componente en la zona adecuada mediante un movimiento vertical.

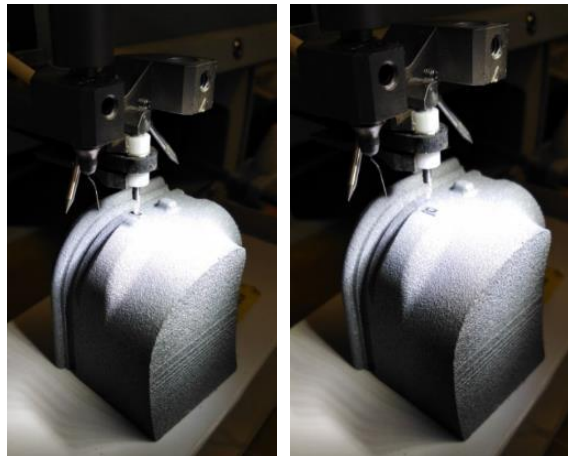


Figura 85: Proceso semi-automático de pick and place para componentes SMD sobre pieza tridimensional

3.2.6.4 Alimentación de los componentes electrónicos

Dentro de esta tarea se plantea también la alimentación de los componentes electrónicos colocados en la superficie de las piezas. Para ello es necesario que pase por cada componente electrónico la alimentación adecuada, algo que a priori puede parecer sencillo, pero debido a la alta resistencia eléctrica de las pistas conductoras realizadas con tinta de plata, hace necesario ajustar la alimentación en algunos casos para compensar las pérdidas.

Para la validación de los procesos de integración de componentes electrónicos en sustratos tridimensionales se va a emplear un circuito sencillo formado por una fuente de alimentación, una resistencia y un led, tal como se muestra en la *Figura 86*. Debido a que la resistencia final de las pistas impresas es variable se deben ajustar los valores de la tensión de alimentación en función del valor de la resistencia eléctrica del circuito para mantener la corriente que circula por el led en valores recomendados por el fabricante en su hoja de características. Además, el tamaño de los componentes electrónicos (Resistencia y led) se elige el estándar 0603 ya que presentan un tamaño suficiente para facilitar su manejo de forma manual.

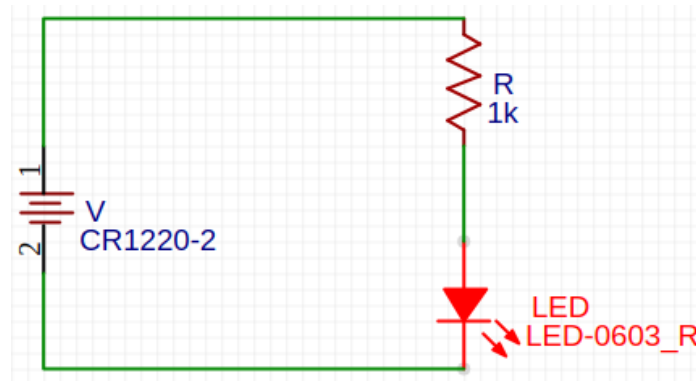


Figura 86: Circuito básico de prueba formado por una fuente de alimentación, una resistencia y un led.

El cálculo de la resistencia mínima del circuito para garantizar el funcionamiento del led en la corriente deseada se puede calcular, fijada una tensión de alimentación del circuito, empleando la fórmula de la ecuación (1).

$$R_{\min} = (V - V_c) / I_{\max} \quad (1)$$

En este caso, como generalmente es la resistencia de las pistas impresas las que definen la resistencia del circuito, empleando el componente resistivo para ajustar dicho valor si es muy bajo, se varía la tensión de alimentación para ajustar la corriente de funcionamiento a la deseada. Dicha tensión se puede calcular usando la ecuación (2), que se obtiene de despejar V de la ecuación (1).

$$V = V_c + I_{\max} R_{\min} \quad (2)$$

Por lo tanto, como cada pista impresa presenta una resistencia eléctrica diferente, antes de alimentar el circuito se ha de medir dicha conductividad en las pistas para proceder al cálculo de la tensión de alimentación adecuada.

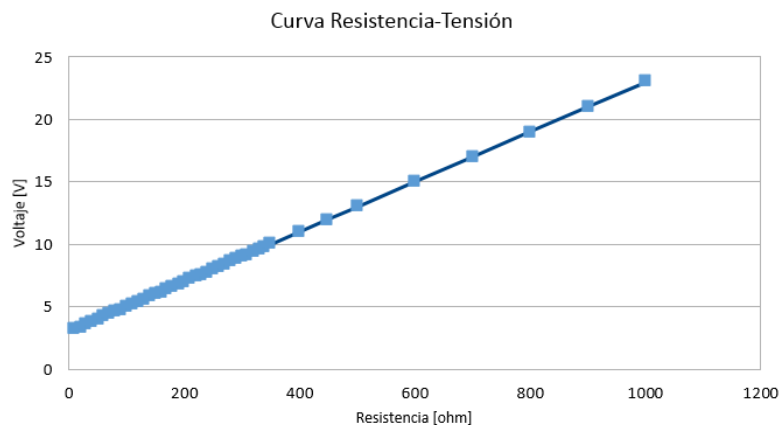


Figura 87: Curva de Resistencia-Tensión para el circuito ideado

3.3 HITO 3. DESARROLLO DE PROCESOS PARA ELECTRÓNICA ESTRUCTURAL EMBEBIDA

3.3.1 T3.1 PLANIFICACIÓN DE EXPERIMENTOS

Las pruebas a realizar en este hito se basan en embeber pistas conductoras en piezas elaboradas mediante técnicas de fabricación aditiva. Para ello se van a plantear dos posibilidades diferenciadas: a) Fabricar las piezas dejando canales en su interior que se rellenarán de tinta, b) Detener la fabricación de las piezas, depositar tinta sobre una capa intermedia y continuar la fabricación de la pieza de tal forma que la tinta quede embebida dentro de la misma. A continuación se detallan los parámetros a considerar dentro de ambas alternativas.

a) Piezas con canales internos para rellenar de tinta.

Para el diseño de las piezas con canales internos es necesario tener en cuenta las reglas de diseño para fabricación aditiva, tratando de no utilizar o minimizar el uso de material soporte en los canales internos de las piezas, ya que este soporte ha de ser eliminado para permitir una correcta inyección de tinta en los canales.

Por ello se ha planteado una geometría de canales que minimice el soporte, planteando ángulos de 45° en los canales para así evitar el uso de soportes, pasando progresivamente de geometría triangular a cilíndrica en los canales verticales. Con esto se espera obtener un paso correcto de tinta y un llenado adecuado de los canales, siendo necesario comprobar una vez dispensada la tinta la continuidad eléctrica de la misma dentro de las piezas. Se plantea como geometría también una espira, para la cual no es posible la fabricación sin material soporte, por lo que esta espiral debe diseñarse con un punto intermedio de acceso que facilite la eliminación del soporte.

La longitud de los canales no es, a priori, una limitación, aunque en función del método de fabricación empleado sí que puede dificultar la extracción del soporte, sobre todo en canales de sección pequeña a los que no se pueda acceder de forma adecuada desde el exterior de la pieza.

Las tintas que se van a inyectar permiten ser dispensadas mediante un sistema neumático controlado por lo que se valorará la presión necesaria para que fluyan de forma adecuada en los canales.

Existe la posibilidad de que estos canales presenten un bloqueo interior debido al soporte o incluso a pequeños descuelgues de material durante la fabricación. Se deben diseñar canales de diferente sección que permitan estudiar los límites de las tecnologías AM para esta aplicación.

Otra característica a tener en cuenta a la hora de plantear este sistema es el acceso a los canales desde el exterior. Este acceso deberá ser posible desde la superficie de tal forma que permita

conectar a los canales la boquilla de dispensación de la tinta, por lo que será necesario un ajuste del mismo al tamaño de boquilla durante el proceso de diseño de las piezas.

Una vez rellenados estos canales, la tinta que sea expulsada a la salida del canal deberá de aplastarse para así obtener un pad de conexión que consista en una superficie donde poder medir con el multímetro la continuidad y valores de resistencia eléctrica obtenidos. Este pad también será de utilidad en el caso de los demostradores finales, en los que se conectarán componentes SMD mediante adhesivo conductor mediante este pad a los canales internos de las piezas.

Un factor clave en este proceso es el curado de las tintas, será necesario realizar un estudio de las condiciones de curado en las distintas combinaciones sustrato-tinta analizadas. Se iniciará el estudio con las condiciones de curado aportadas por el fabricante para cada tinta pero, dado que en este caso no se trata de una deposición superficial sino de un curado masivo, es de esperar que sea necesario estudiar parámetros de operación.

b) Fabricación interrumpida para deposición de pistas.

En el caso de querer depositar pistas conductoras en el interior de piezas realizadas mediante fabricación aditiva, será necesario detener el proceso de fabricación de las piezas, eyectar la tinta sobre la superficie de la última capa depositada durante el proceso de fabricación, realizar el proceso de curado térmico de estas tintas y, posteriormente, continuar con la fabricación de la pieza mediante la técnica de fabricación aditiva utilizada. El estudio se realizará con las dos tecnologías de fabricación aditiva disponibles en IDONIAL y que permiten interrumpir la fabricación y continuarla a posteriori: filamento fundido (FDM) y sinterizado láser selectivo (SLM).

En el caso de las piezas metálicas fabricadas por SLM será necesario añadir una capa dieléctrica para aislar esta tinta conductora del propio material de la pieza al ser éste también conductor. Para ello se va utilizar tinta dieléctrica depositada sobre la última capa de la pieza fabricada, siendo necesario realizar el proceso de curado de esta tinta previamente a la deposición de tinta conductora. Una vez curada la tinta dieléctrica se realizará la deposición y el curado de tinta conductora. Tras este proceso de curado se volverá a aplicar otra capa de tinta dieléctrica de tal forma que se encapsule la tinta conductora, evitando así la interferencia del material de la pieza en la conductividad eléctrica de las pistas depositadas. El curado de las tintas dieléctricas se realizará mediante luz ultravioleta, por lo que será necesario aplicar esta luz una vez depositada la tinta hasta su completo curado. Es necesario validar el aislamiento eléctrico previamente a la deposición de tinta conductora sobre la tinta dieléctrica. Posteriormente se volverá aplicar tinta dieléctrica y se volverán a validar este aislamiento.

No es posible comprobar si al continuar la fabricación de la pieza el láser del proceso SLM dañará este material dieléctrico. Por ello es necesario realizar una medida de la conductividad de esa tinta depositada y, posteriormente, medir de esquina a esquina de la propia pieza metálica para ver si los valores de conductividad son diferentes o iguales. En el caso de ser valores iguales esto querrá

decir que el recubrimiento dieléctrico ha sido dañado por el láser del proceso de fabricación aditiva SLS y que, por lo tanto, este proceso no ha sido viable.

En el caso de los sustratos SLM, será preciso definir una base sobre la que se pueda transferir la pieza entre equipos. En este sentido, se debe diseñar una base que, por tamaño y por sistema de fijación, permita intercambiar la pieza entre uno y otro equipo con el fin de poder interrumpir y continuar la fabricación.

En ambas tecnologías (FDM y SLM), otro factor limitante puede ser el espesor de la tinta aportada ya que, si este espesor es alto en función del espesor de capa al fabricar, podrá afectar a la fabricación de la siguiente capa de la pieza. Por ello puede ser interesante realizar un mecanizado de un canal con la misma geometría que el patrón de tinta a depositar, evitando este aumento de espesor en la última capa de la pieza debido a la tinta, con lo que la siguiente capa no se vería afectada. Además, se facilitaría que la tinta se quede dentro del canal mecanizado actuando como guía para la tinta.

En el caso de querer embeber un componente electrónico entre las capas de una pieza será necesario realizar el mecanizado del alojamiento para este componente previamente al dispensado de tinta y a la colocación del mismo. Otra opción es diseñar la pieza con este alojamiento o en su interior de tal forma que en la capa que se detenga la fabricación ya esté presente el alojamiento para el componente. Se selecciona esta última opción para poder aprovechar al máximo las capacidades que ofrecen las tecnologías aditivas.

Una vez integradas las pistas, se medirá la conductividad eléctrica. Al estar la tinta protegida por el propio material de la pieza se probarán también las tintas de carbono conductoras ya que, aunque para la aplicación superficial se han descartado debido a su baja adhesión, en esta aplicación se considera adecuado su uso.

3.3.2 T3.2 DISEÑO Y FABRICACIÓN DE PIEZAS CON CANALES INTERNOS PRECONFORMADOS

Se ha realizado el diseño de nuevas piezas modelo pensando en su fabricación por tecnologías aditivas. Se han definido los parámetros de proceso aplicables en cada caso y se han aplicado los post-procesos necesarios para cada una de las tecnologías de fabricación empleadas. Los conjuntos tecnología de fabricación – material seleccionados para cada tipo de pieza son los siguientes:

- Pieza con espira interna: fabricación en VeroWhite mediante tecnología Polyjet, y en poliamida mediante FDM. Se ha diseñado una espiral de diámetro de 2,5mm con tres puntos de conexión con el exterior para facilitar el llenado y permitir la salida de aire del canal durante el llenado. Se ha empleado una canal de 2,5 mm de diámetro porque este se ha considerado el diámetro mínimo que permite ser fabricable mediante estas tecnologías evitando problemas de obturación.

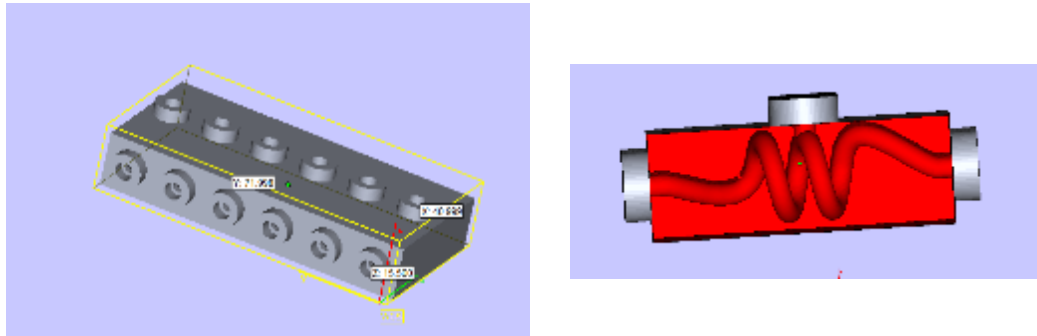


Figura 88. Imagen pieza con canal espiral: general (izquierda) y detalle CAD 3D del canal (derecha)

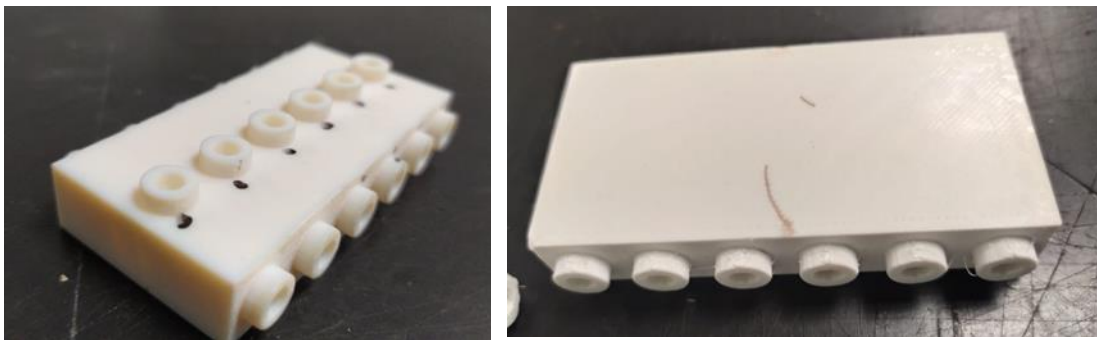


Figura 89. Pieza fabricada en verowhite-polyjet (izquierda) y pieza fabricada en poliamida-FMD (derecha).

- Pieza con canales rectos y codo: fabricada en VeroWhite mediante tecnología Polyjet, y en poliamida mediante FDM. En este caso, se ha diseñado una pieza que tiene tres tipologías de canales, un canal vertical de diámetro 1,5 mm; un codo de 90° y diámetro 1,5mm; y otro codo de 90° y diámetro 2,5mm. La salida de dichos canales se ha realizado con sección triangular con el fin de evitar soportes de fabricación en dicha zona.

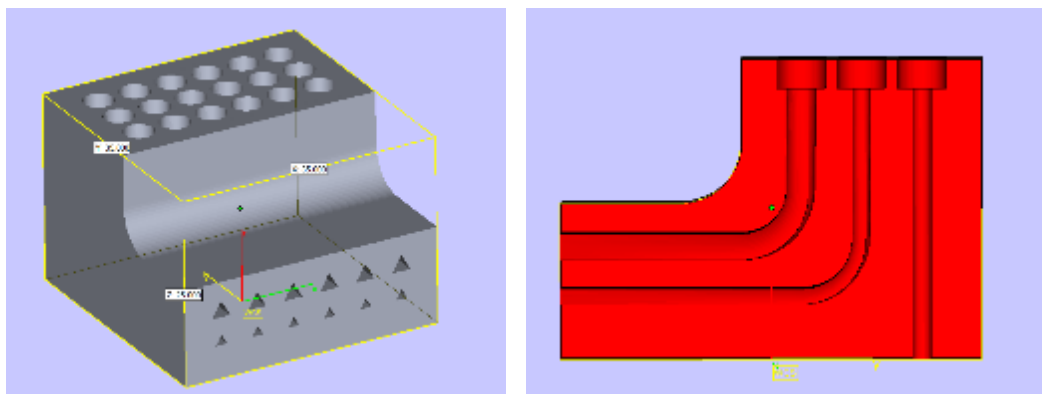


Figura 90. Pieza de canales rectos, y codos a 90°

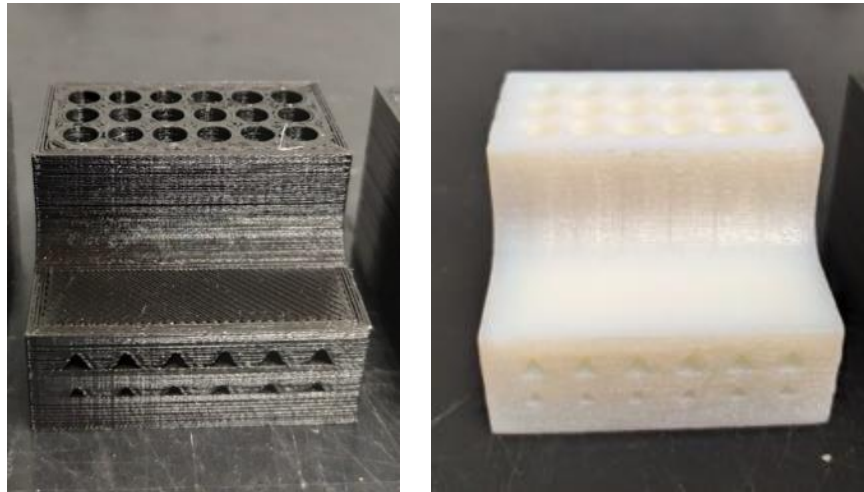


Figura 91. Pieza fabricada mediante FDM (izquierda) y polyjet (derecha)

- Piezas cerámicas: fabricadas en alúmina mediante tecnología LCM. Debido a las limitaciones de la tecnología de fabricación aditiva cerámica disponible, en este caso se ha seguido una estrategia de diseño diferente. Por una parte, las dimensiones máximas de la tecnología son de 115 x 64 x 150 mm (efectivos 80,5 x 44,8 x 105mm); por otra parte, no se permite la fabricación de piezas másicas. Así, se optó por fabricar sólo canales. En este sentido se han diseñado canales con un espesor de pared de 1mm, rectos y con forma de codo de 90°.

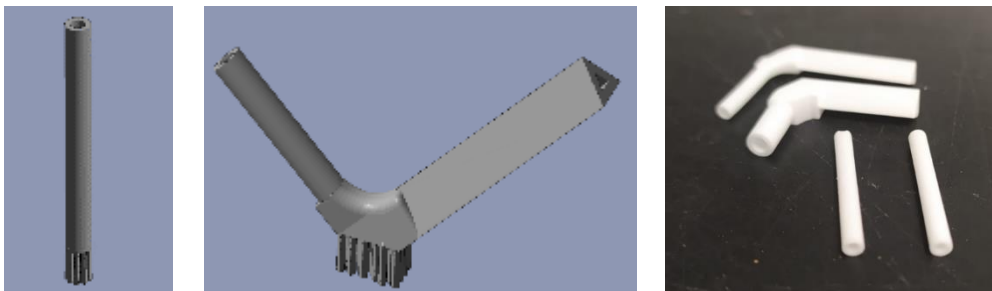


Figura 92. Pieza de canales rectos, y codos a 90°

El proceso de limpieza de los canales internos ha sido bastante relevante, especialmente en el caso de las piezas de Polyjet para eliminar los restos de los soportes de fabricación. La limpieza de estos canales se ha realizado mediante agua a presión y mediante el uso de pequeños alambres, comprobándose que incluso los canales de menor diámetro estaban totalmente libres. Por lo tanto, se considera que los canales de las piezas fabricadas por polyjet debe ser superior a 1,5mm de diámetro para que se pueda realizar el proceso de inyección con las tecnologías consideradas.

3.3.3 T3.3 INVESTIGACIÓN DEL PROCESO DE INYECCIÓN DE PIEZAS CON CANALES PRECONFORMADOS

3.3.3.1 Pruebas iniciales

En esta tarea se trabajó en la inyección de las tintas en los canales preconformados de las piezas fabricadas en la tarea 3.2. Las tintas seleccionadas para el estudio han sido las dos tintas conductoras utilizadas para los estudios de deposición superficial (HENKEL y DYCOTEC). Se han realizado también ensayos con la tinta GWENT dado que su baja adhesión sobre determinados sustratos puede no ser un factor limitante para esta aplicación.

Las tintas se depositaron con un sistema de dispensado neumático de jeringas (FISNAR SL101N) para controlar la cantidad y el caudal aportado de tinta de forma precisa. De esta forma se planificó una serie de ensayos a diferente presión para verificar el llenado de los canales.

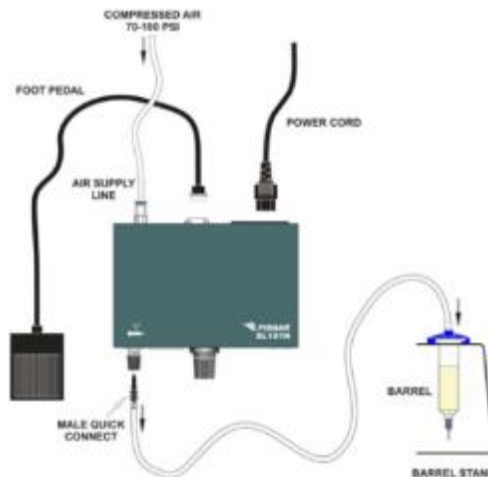


Figura 93. Equipamiento para la inyección

Para la inyección de las tintas se comenzó a usar aquellas que menor temperatura de curado se requería y se realizaron las inyecciones sobre los diferentes sustratos. La primera tinta inyectada fue la HENKEL Wik, posteriormente la DYCOTEC y finalmente la Gwent Carbon. Para poder realizar la inyección de los canales se empleó un sistema sencillo pero que resultó totalmente efectivo: se taponaron las entradas y salidas de cada canal con cinta adhesiva que se perforaba mediante la aguja de inyección para hacer el llenado.

El desarrollo experimental se basó en ir modificando el rango de presiones con el fin de lograr el llenado del canal para cada uno de los canales y para cada una de las tintas. Los ensayos de llenado resultaron positivos para todas las piezas independientemente de la tinta y la presión aplicada.

Tabla 39. Llenado de canales preconformados con tintas

TINTAS	Presión (psi)	Llenado
Henkel Wik	40	ok
	50	ok
	60	ok
	70	ok
	80	ok
Dycotec	40	ok
	50	ok
	60	ok
	70	ok
	80	ok
Gwent	40	ok
	50	ok
	60	ok
	70	ok
	80	ok

En un principio se había planteado medir el tiempo para las inyecciones al objeto de relacionar esta variable con la presión de inyección y su influencia en la calidad del llenado. Sin embargo, se comprobó que el llenado se realizaba en segundos, existiendo muy poca variabilidad en los resultados. Dado que el llenado se realiza correctamente independientemente de la presión, este parámetro únicamente tendría influencia desde el punto de vista del tiempo de llenado. Sin embargo, como se ha indicado, se ha comprobado que la presión de inyección tampoco presenta una influencia significativa sobre los tiempos de inyección.

Una vez inyectado los diferentes materiales y geometrías, se procedió al curado de las tintas, partiendo como base de los parámetros de curado facilitados por el fabricante.

Tabla 40. Parámetros de curado estándar de las tintas

TINTAS	TEMPERATURA	TIEMPO
Henkel Wik	120°C	10min
Dycotec	130°C	20min
Gwent Carbon	130°C	10min

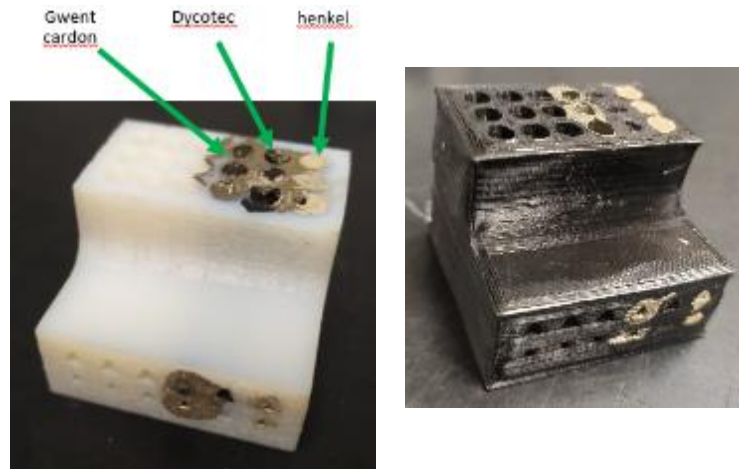


Figura 94. Ejemplos de probetas inyectadas

Los resultados de todas tintas fueron similares y poco satisfactorios: no se consiguió curar la tinta con los parámetros estándar. Por lo tanto, a partir de las condiciones estándar para cada tinta se realizó una batería de ensayos modificando el tiempo y la temperatura de curado.

Tabla 41. Experimentos de curado realizados con las diferentes tintas

TINTA	T (°C)	TIEMPO (min)	TINTA	T (°C)	TIEMPO (min)	TINTA	T (°C)	TIEMPO (min)
GWENT CARBON	130	10	HENKEL WIK	120	10	DYCOTEC	130	10
	130	15		120	15		130	15
	130	20		120	20		130	20
	130	30		120	30		130	30
	130	60		120	60		130	60
	130	90		120	90		130	90
	130	120		120	120		130	120
	130	150		120	150		130	150
	130	180		120	180		130	180
	140	10		130	10		140	10
	140	20		130	20		140	20
	140	30		130	30		140	30
	140	45		130	45		140	45
	140	60		130	60		140	60
	140	90		130	90		140	90
	150	10		140	10		150	10
	150	15		140	15		150	15
	150	20		140	20		150	20
	150	30		140	30		150	30
	150	45		140	45		150	45
150	60	140	60	150	60			
150	90	140	90	150	90			

Tras esta batería de ensayos no se logró que curase ninguna de las tintas en ninguna de las geometrías. La tinta cura superficialmente, pero no se alcanza el curado interno. Incluso después de someterlas a las condiciones de curado más extremas (150°C, 90 minutos) las tintas siguen en un estado líquido, siendo imposible incrementar más la temperatura ya que los plásticos tanto de Polyjet como de FDM estarían por encima de la temperatura de servicio.

Las tintas seleccionadas son específicas para procesos de deposición electrónica, estando por lo tanto su composición y condiciones de proceso especialmente adaptados al curado de capas de pequeño espesor. Las condiciones de curado en el interior de los canales evidentemente son muy diferentes. En este sentido, se ha realizado una nueva búsqueda de tintas conductoras empleadas para otro tipo de aplicaciones en las que se pueda requerir un curado masivo y se ha encontrado que la tinta **XZ302-1 Conductive Carbon** podría solventar los problemas encontrados hasta el momento en el curado. Se destaca en este punto que los espesores de tinta vienen determinados por las limitaciones actuales de los procesos de fabricación aditiva de los sustratos, por lo que se trata de un parámetro que no puede ser modificado. Los ensayos con esta nueva tinta se realizarán en la anualidad 2020. Con

3.3.3.2 Pruebas con tinta XZ302-1 Conductive Carbon

Para el llenado de los canales se ha utilizado el mismo equipo de dispensado neumático que en las pruebas iniciales, ajustando la presión adecuada para un correcto flujo de tinta. La presión utilizada ha sido 40psi al permitir un correcto llenado y una velocidad de relleno de canales adecuada. Esta velocidad podría aumentarse o reducirse si fuese necesario para alguna aplicación determinada ya que no se han apreciado variaciones significantes en la calidad de llenado de los canales con variaciones de presión. Las boquillas utilizadas para el llenado de los canales han sido boquillas FISNAR con diámetro de orificio menor a 1mm y perfil progresivo, por lo que se ha ajustado su diámetro al cortar la boquilla en función del diámetro del canal a rellenar.



Figura 95: Boquilla FISNAR utilizada para el dispensado de tinta CHSN 8032 XZ302-1

El proceso de llenado ha sido adecuado en casi todas las piezas y materiales, teniendo problemas en las piezas con canales de geometría espiral realizados en 1 pieza en VeroWhite, al no poder eliminar el material soporte del interior de los canales, quedando estos taponados.

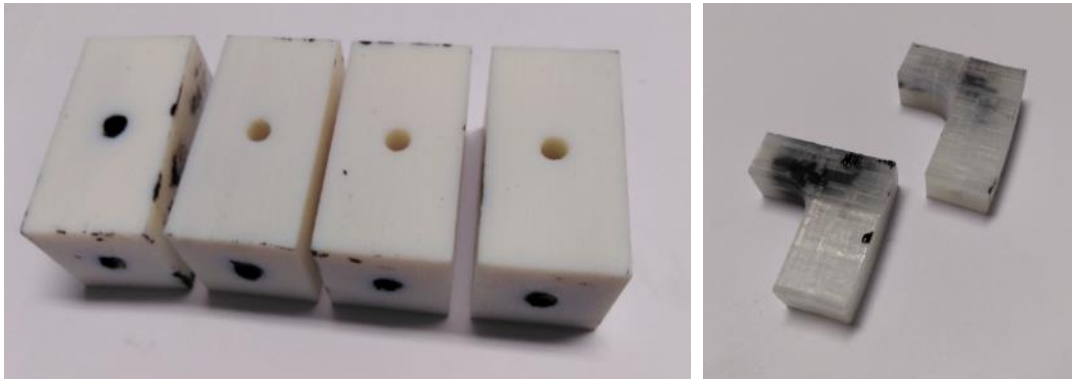


Figura 96: Piezas fabricadas en VeroWhite y en Nylon FDM cuyos canales internos están obturados

Como alternativa, las piezas de similar geometría fabricadas en 2 partes y posteriormente pegadas han permitido el llenado de los canales de forma adecuada. También han presentado problemas de obturación de los canales dos piezas realizadas por FDM en nylon. Esto se ha considerado un problema puntual, quizás por falta de calidad en la fabricación debido a que el material utilizado absorbe la humedad ambiental degradándose rápidamente. Por ello, aunque la mayoría de las piezas han sido fabricadas con precisión, en dos unidades se han taponado los canales internos.

El resto de piezas se han podido rellenar de forma adecuada obteniendo un llenado uniforme, con buen control del caudal y debido a la alta viscosidad de esta tinta, una buena estabilidad en el llenado.

3.3.3.3 Curado térmico de las piezas con canales internos llenos de tinta CHSN 8032 XZ302-1

Para asegurar que las piezas soportan la temperatura de curado se han realizado diferentes iteraciones tanto en temperaturas como en tiempos de curado de la tinta. Las temperaturas a las que se ha realizado el curado de la tinta son las siguientes:

Tabla 42: condiciones de curado testeadas para la tinta CHSN 8032 XZ302-1

150°C	20 minutos
150°C	40 minutos
120°C	20 minutos
120°C	20 minutos
120°C	20 minutos

Tras la realización de todas las pruebas, los resultados se muestran a continuación:

Tabla 43: resultados de pruebas de conductividad realizadas para la tinta CHSN 8032 XZ302-1 (150 °C-20 minutos)

150°C 20 minutos	
Espiral Nylon FDM Diámetro canales 3.5mm	348 kΩ
Espiral Nylon FDM (2 mitades) Diámetro canales 3.5mm	379 kΩ
Espiral VeroWhite Diámetro canales 3.5mm	Canales Obstruidos
Espiral VeroWhite (2 mitades) Diámetro canales 3.5mm	No continuidad, la pieza se ha despegado debido a la temperatura
Espiral Nylon FDM Diámetro canales 2.5mm	213.6 kΩ
Espiral Nylon FDM (2 mitades) Diámetro canales 2.5mm	212.8 kΩ
Canales “L” Nylon FDM Diámetro 1.5mm	21.4 kΩ
Canales “L” Nylon FDM Diámetro 2.5mm	19.2 kΩ
Canales “L” Nylon FDM Diámetro 3.5mm	17.9 kΩ
Canales “L” VeroWhite Diámetro 2.5mm	4.4 kΩ
Canales “L” VeroWhite Diámetro 3.5mm	4.28 kΩ (Pieza rajada debido a la temperatura)
Canales Rectos Nylon FDM Diámetro 1.5mm	9.84 kΩ
Canales Rectos VeroWhite Diámetro 1.5mm	1.15 kΩ
Espiral Cerámica Diámetro canales 2.5mm	No continuidad, la tinta se sale de los canales durante el proceso de curado térmico
Canales “L” Cerámica Diámetro 1.5mm	No continuidad, la tinta se sale de los canales durante el proceso de curado térmico
Canales “L” Cerámica Diámetro 2.5mm	No continuidad, la tinta se sale de los canales durante el proceso de curado térmico
Canales Rectos Cerámica Diámetro 1.5mm	No continuidad, la tinta se sale de los canales durante el proceso de curado térmico

Como puede apreciarse 150°C afectan térmicamente a la resina VeroWhite produciendo grietas o fisuras en las piezas, mientras que en las piezas de material cerámico la tinta se ha salido por los extremos de los canales durante el proceso de curado térmico, por lo que no se ha conseguido conductividad eléctrica.

Para comprobar si un mayor tiempo de curado a esta temperatura mejora los valores de resistencia eléctrica de los canales internos se ha planteado un curado a 150°C durante 40 minutos, obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 44: resultados de pruebas de conductividad realizadas para la tinta CHSN 8032 XZ302-1 (150 °C-40 minutos)

150°C 40 minutos	
Espiral Nylon FDM Diámetro canales 3.5mm	337 kΩ
Espiral Nylon FDM (2 mitades) Diámetro canales 3.5mm	454 kΩ (Pieza despegada debido a temperatura)
Espiral VeroWhite Diámetro canales 3.5mm	Canales obstruidos

150°C 40 minutos	
Espiral VeroWhite (2 mitades) Diámetro canales 3.5mm	No continuidad, la pieza se ha despegado debido a la temperatura
Espiral Nylon FDM Diámetro canales 2.5mm	428 kΩ
Espiral Nylon FDM (2 mitades) Diámetro canales 2.5mm	235 kΩ
Canales "L" Nylon FDM Diámetro 1.5mm	16.6 kΩ
Canales "L" Nylon FDM Diámetro 2.5mm	26.6 kΩ
Canales "L" Nylon FDM Diámetro 3.5mm	16.9 kΩ
Canales "L" VeroWhite Diámetro 2.5mm	21.7 kΩ
Canales "L" VeroWhite Diámetro 3.5mm	37.2 kΩ (Pieza muy rajada)
Canales Rectos Nylon FDM Diámetro 1.5mm	5.54 kΩ
Canales Rectos VeroWhite Diámetro 1.5mm	630 Ω
Espiral Cerámica Diámetro canales 2.5mm	No continuidad, la tinta se sale de los canales durante el proceso de curado térmico
Canales "L" Cerámica Diámetro 1.5mm	No continuidad, la tinta se sale de los canales durante el proceso de curado térmico
Canales "L" Cerámica Diámetro 2.5mm	No continuidad, la tinta se sale de los canales durante el proceso de curado térmico
Canales Rectos Cerámica Diámetro 1.5mm	No continuidad, la tinta se sale de los canales durante el proceso de curado térmico

Las piezas con este tratamiento se han degradado produciéndose grandes grietas y despegándose las que se fabricaron en dos partes. Como puede observarse al comparar los valores de resistencia eléctrica con los obtenidos con el tratamiento térmico de 20 minutos a esta misma temperatura hay algunos canales en los que se reduce la resistencia eléctrica, lo que indicaría una mejora en la conductividad como es el caso de los canales rectos de 1,5mm de diámetro en los que la mejora es ampliamente apreciable, mientras que en otras geometrías de canal los valores se mantienen similares e incluso aumentan en varios casos, por lo que se ha decidido realizar pruebas de curado a temperatura inferior, concretamente a 120°C ya que los materiales de las piezas soportan teóricamente esta temperatura.

Tabla 45: resultados de pruebas de conductividad realizadas para la tinta CHSN 8032 XZ302-1 (120 °C-20 minutos)

120°C 20 minutos	
Espiral Nylon FDM Diámetro canales 3.5mm	1.4 MΩ
Espiral Nylon FDM (2 mitades) Diámetro canales 3.5mm	476 kΩ
Espiral VeroWhite Diámetro canales 3.5mm	Canales Obstruidos
Espiral VeroWhite (2 mitades) Diámetro canales 3.5mm	185 kΩ
Espiral Nylon FDM Diámetro canales 2.5mm	2.25 MΩ
Espiral Nylon FDM (2 mitades) Diámetro canales 2.5mm	2.26 MΩ
Canales "L" Nylon FDM Diámetro 1.5mm	527 kΩ
Canales "L" Nylon FDM Diámetro 2.5mm	3.6 MΩ

120°C 20 minutos	
Canales “L” Nylon FDM Diámetro 3.5mm	689 kΩ
Canales “L” VeroWhite Diámetro 2.5mm	26.7 kΩ
Canales “L” VeroWhite Diámetro 3.5mm	17.8 kΩ
Canales Rectos Nylon FDM Diámetro 1.5mm	292 kΩ
Canales Rectos VeroWhite Diámetro 1.5mm	6.34 MΩ
Espiral Cerámica Diámetro canales 2.5mm	No continuidad, la tinta se sale de los canales durante el proceso de curado térmico
Canales “L” Cerámica Diámetro 1.5mm	No continuidad, la tinta se sale de los canales durante el proceso de curado térmico
Canales “L” Cerámica Diámetro 2.5mm	No continuidad, la tinta se sale de los canales durante el proceso de curado térmico
Canales Rectos Cerámica Diámetro 1.5mm	No continuidad, la tinta se sale de los canales durante el proceso de curado térmico

Realizando el curado con una temperatura de 120°C durante 20 minutos siguen existiendo los problemas en piezas de cerámicas ya que la tinta se sigue saliendo de los canales provocando que no haya continuidad eléctrica. En el resto de piezas se observa que a esta temperatura no se han producido grietas en las piezas ni problemas de adhesión en las piezas formadas por dos partes pegadas. Los valores de conductividad son inferiores a los obtenidos con el curado a 150°C, presentando muchas de las piezas resistencia eléctrica muy elevada, lo que indica que la tinta no se ha curado de forma adecuada. Además, se ha observado que en ciertas zonas, al tocar para medir la conductividad, la tinta no estaba totalmente curada. Viendo que el material de las piezas ha resistido sin deformaciones ni grietas este tratamiento térmico se ha decidido realizar otro tratamiento térmico a la misma temperatura doblando el tiempo, siendo esta vez de 40 minutos.

Tabla 46: resultados de pruebas de conductividad realizadas para la tinta CHSN 8032 XZ302-1 (120 °C-40 minutos)

120°C 40 minutos	
Espiral Nylon FDM Diámetro canales 3.5mm	870 kΩ
Espiral Nylon FDM (2 mitades) Diámetro canales 3.5mm	437 kΩ
Espiral VeroWhite Diámetro canales 3.5mm	Canales Obstruidos
Espiral VeroWhite (2 mitades) Diámetro canales 3.5mm	162 kΩ
Espiral Nylon FDM Diámetro canales 2.5mm	2.12 MΩ
Espiral Nylon FDM (2 mitades) Diámetro canales 2.5mm	826 kΩ
Canales “L” Nylon FDM Diámetro 1.5mm	238 kΩ
Canales “L” Nylon FDM Diámetro 2.5mm	2.6 MΩ
Canales “L” Nylon FDM Diámetro 3.5mm	1.17 MΩ
Canales “L” VeroWhite Diámetro 2.5mm	5.8 kΩ
Canales “L” VeroWhite Diámetro 3.5mm	6.7 kΩ
Canales Rectos Nylon FDM Diámetro 1.5mm	162.3 kΩ
Canales Rectos VeroWhite Diámetro 1.5mm	2.23 kΩ

120°C 40 minutos	
Espiral Cerámica Diámetro canales 2.5mm	No continuidad, la tinta se sale de los canales durante el proceso de curado térmico
Canales “L” Cerámica Diámetro 1.5mm	No continuidad, la tinta se sale de los canales durante el proceso de curado térmico
Canales “L” Cerámica Diámetro 2.5mm	No continuidad, la tinta se sale de los canales durante el proceso de curado térmico
Canales Rectos Cerámica Diámetro 1.5mm	No continuidad, la tinta se sale de los canales durante el proceso de curado térmico

Con el aumento del tiempo de tratamiento térmico se observan mejoras notables en los valores de conductividad. Además, la tinta ya está completamente endurecida dentro de los canales por lo que se considera que el curado puede ser adecuado. Para comprobar si con un aumento del tiempo de curado la conductividad mejoraría más se plantea realizar otra iteración curando a la misma temperatura durante un tiempo de 60 minutos. En principio el material de las piezas debería soportar este tratamiento más largo ya que no se ha observado deterioro ni deformación alguna durante este tratamiento de 40 minutos de duración.

Tabla 47: resultados de pruebas de conductividad realizadas para la tinta CHSN 8032 XZ302-1 (120 °C-60 minutos)

120°C 60 minutos	
Espiral Nylon FDM Diámetro canales 3.5mm	1.27 MΩ
Espiral Nylon FDM (2 mitades) Diámetro canales 3.5mm	2.7 MΩ
Espiral VeroWhite Diámetro canales 3.5mm	Canales Obstruidos
Espiral VeroWhite (2 mitades) Diámetro canales 3.5mm	101 kΩ
Espiral Nylon FDM Diámetro canales 2.5mm	1.11 MΩ
Espiral Nylon FDM (2 mitades) Diámetro canales 2.5mm	489 kΩ
Canales “L” Nylon FDM Diámetro 1.5mm	91.9 kΩ
Canales “L” Nylon FDM Diámetro 2.5mm	2 MΩ
Canales “L” Nylon FDM Diámetro 3.5mm	1.07 MΩ
Canales “L” VeroWhite Diámetro 2.5mm	2.22 kΩ
Canales “L” VeroWhite Diámetro 3.5mm	3.18 kΩ (Pieza rajada)
Canales Rectos Nylon FDM Diámetro 1.5mm	75.8 kΩ
Canales Rectos VeroWhite Diámetro 1.5mm	0.96 kΩ
Espiral Cerámica Diámetro canales 2.5mm	No continuidad, la tinta se sale de los canales durante el proceso de curado térmico
Canales “L” Cerámica Diámetro 1.5mm	No continuidad, la tinta se sale de los canales durante el proceso de curado térmico
Canales “L” Cerámica Diámetro 2.5mm	No continuidad, la tinta se sale de los canales durante el proceso de curado térmico
Canales Rectos Cerámica Diámetro 1.5mm	No continuidad, la tinta se sale de los canales durante el proceso de curado térmico

Tras el tratamiento térmico durante 60 minutos se ha observado que los valores de conductividad mejoran sensiblemente en algunos casos, aunque en otros se ha producido un empeoramiento de los mismos y una pieza de VeroWhite con canal "L" se ha rajado. Además, la pieza formada por dos mitades pegadas se ha despegado parcialmente. Por ello se ha decidido no realizar otro ensayo con mayor tiempo de curado ya que se quiere evitar el deterioro de los materiales de las piezas.

Los valores de resistencia eléctrica obtenidos mediante el proceso térmico a 150°C son inferiores a los obtenidos con el proceso térmico a 120°C por norma general. Por ello deberá valorarse para cada aplicación si prima más la estabilidad de las piezas y que no haya riesgo de grietas y deterioro de uniones adhesivas o es preferible una mejor conductividad a riesgo de que las piezas puedan sufrir daños durante el proceso térmico. En el caso de piezas de material cerámico se considera que no son compatibles con el uso de tinta en canales internos ya que la tinta no se adhiere a las paredes cerámicas por lo que durante el proceso térmico se sale de los canales. Se han realizado pruebas a 100°C y la tinta se sale igualmente de los canales, por lo que no se considera adecuado reducir más la temperatura para tratar de evitar este problema ya que no se produciría un curado adecuado de la tinta.

3.3.4 T3.4 INVESTIGACIÓN DE LA INTEGRACIÓN DE ELECTRÓNICA IMPRESA DURANTE LA FABRICACIÓN ADITIVA DE PIEZAS

Esta tarea tiene como objetivo evaluar la viabilidad de depositar tinta entre diferentes capas de material durante la fabricación de la pieza, para lo que se van a tener que combinar la tecnología de fabricación aditiva utilizada y la deposición de tintas conductoras, adhesivo conductor y el uso de componentes electrónicos. Como prueba de validación, se ha realizado un diseño con una geometría sencilla en el que se van a trazar 8 pistas con tinta conductora sobre piezas elaboradas mediante las tecnologías SLS y FDM, tapando posteriormente esas pistas impresas con más material para generar así una pieza con pistas conductoras embebidas. Este diseño consiste en un prisma de 35mmx30mm para que encajen en el soporte fabricado en poliamida para las piezas tridimensionales, con un espesor de 7.5mm. Sobre este diseño se va a hacer un recrocado de espesor 0.5mm y un tamaño de 15mm x 28mm. De esta manera, se tendrá acceso a los extremos de las pistas depositadas para poder comprobar si se mantiene la conductividad de las pistas tras continuar la fabricación de las piezas sobre ellas y se mantienen las dos pistas de los extremos sin depositar material sobre ellas para utilizarlas como referencia. El diseño es el siguiente:

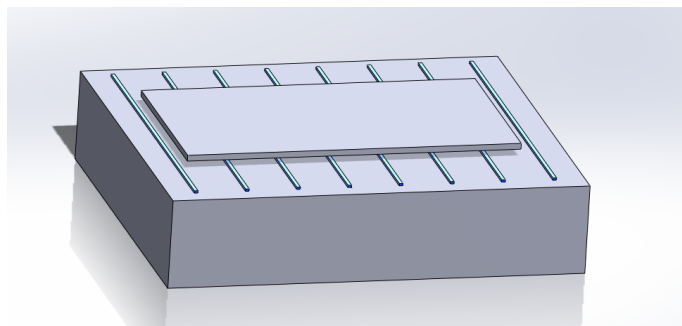


Figura 97: Geometría de validación ideada

Este diseño se ha fabricado en dos materiales, PH1 mediante SLS y PLA blanco con el sistema de impresión FDM del equipo Neotech PJ15X. Una vez obtenidas las piezas mediante SLS y FDM y comprobado que encajan en el soporte que permitirá colocarlas con precisión en el equipo, el siguiente paso ha sido la programación de las líneas de dispensado de tinta conductora, para lo que se ha utilizado el software Motion 3D, obteniendo la programación necesaria para depositar las tintas conductoras.

En las piezas de PH1 no se pueden depositar directamente las tintas conductoras ya que el propio material de las piezas es conductor. Por ello, se ha depositado una pista de mayor grosor con tinta dieléctrica, tanto bajo las pistas conductoras a depositar como sobre ellas una vez depositadas y curadas, para así poder añadir material al continuar con la fabricación de la pieza evitando que éste material conductor esté en contacto directo con las pistas. En las piezas realizadas por FDM esto no ha sido necesario ya que el propio material es aislante eléctrico.

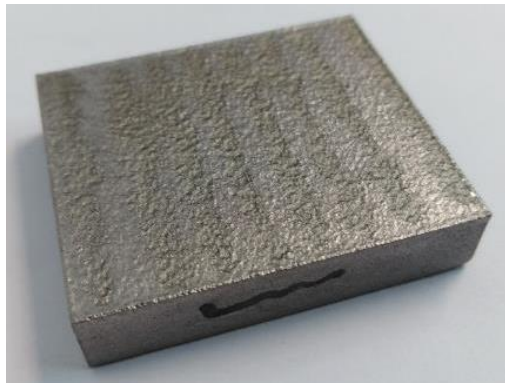


Figura 98: pieza en PH1 con pistas dieléctricas aplicadas

Para evaluar la posible mejora a raíz de la realización de canales mecanizados para depositar la tinta en ellos, se han mecanizado ranuras de bajo espesor en una pieza de cada material para ver si hay cambios respecto a las que no se han mecanizado. El siguiente paso ha sido la deposición de tinta conductora trazando las pistas, su adecuado curado y la medida de resistencia eléctrica de cada pista previa a la deposición de material sobre ellas para completar la pieza. Nótese que se depositaron 8 pistas conductoras, y la deposición de la capa adicional de material se realizó de tal forma que quedarán cubiertas las pistas 2 a 7, con las 1 y la 8 libres como elementos de control.

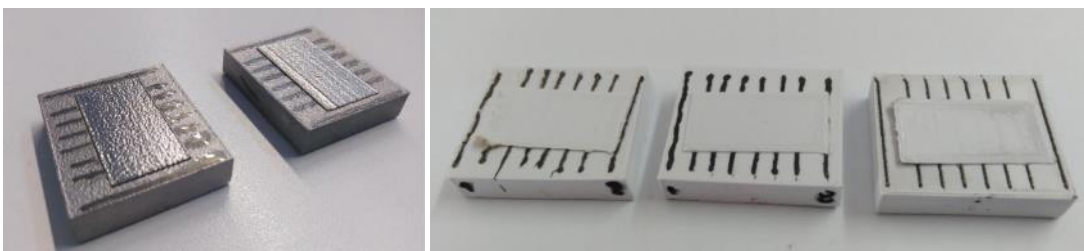


Figura 99: Piezas fabricadas

Se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 48: tabla de resultados de conductividad tras deposición de pistas y nueva capa de material

CUBO 1 FDM	PISTA	Ω ANTES SOBRESPESOR	Ω DEPOSITADO SOBRESPESOR	CUBO 2 FDM	PISTA	Ω ANTES SOBRESPESOR	Ω DEPOSITADO SOBRESPESOR
	1	2,5	3,9		1	3,6	5,5
	2	2,5	3,3		2	5	5,6
	3	2,7	X		3	4,6	4,8
	4	3,2	X		4	4	4,2
	5	3,5	X		5	3,9	4,2
	6	3,7	X		6	4	4,4
	8	2,7	X		8	3,6	4,1
	9	3,8	3,7		9	3,5	X

CUBO 3 FDM	PISTA	Ω ANTES SOBRESPESOR	Ω DEPOSITADO SOBRESPESOR
	1	4,5	5,8
	2	4,2	X
	3	2,5	4,6
	4	3,1	4,7
	5	3,7	4,4
	6	2,5	4,6
	8	2,3	4,5
	9	3,3	5

CUBO 1 PH1	PISTA	Ω ANTES SOBRESPESOR	Ω DEPOSITADO SOBRESPESOR	CUBO 2 PH1	PISTA	Ω ANTES SOBRESPESOR	Ω DEPOSITADO SOBRESPESOR
	1	8	10,2		1	7,9	8,6
	2	9,2	X		2	8,5	X
	3	8,2	X		3	7,4	X
	4	7,4	X		4	7,8	X
	5	8,5	X		5	8,3	X
	6	9,5	X		6	8,2	X
	8	9,2	X		8	7,6	X
	9	10,5	10,9		9	8,2	9

Como puede apreciarse en estas tablas, en los cubos realizados en PH1 solamente han resistido las pistas de referencia (1 y 9) ya que quedan fuera de la zona en la que se ha continuado con la fabricación en PH1, mientras que las pistas que quedan embebidas en el material no han resistido el paso del láser, quedando deterioradas y confirmando que este procedimiento no es viable para su realización con tecnologías DMLS ya que debido a la alta energía aportada por el láser para la sinterización del material deteriora las pistas conductoras y el material dieléctrico.

Por otra parte, los cubos realizados mediante FDM han soportado mejor el proceso de continuar la fabricación de la pieza, sufriendo afectación térmica y algún deterioro debido al paso del nozzle de deposición FDM de PLA, que ha afectado a las pistas al depositar el material fundido sobre ellas. En el CUBO 1 se han deteriorado en mayor medida que en el CUBO 2 y en el CUBO 3. Esto puede ser debido a que, durante el proceso de sinterizado de pistas conductoras, el material polimérico se

deforma variando las dimensiones un poco y de forma aleatoria. Por ello y tras evaluar los valores de resistencia eléctrica una vez depositado el sobre-espesor, se ha tomado como hipótesis válida que en el caso del CUBO 1 se ha aumentado un poco la altura debido al calor, por lo que el propio nozzle ha podido cortar las pistas conductoras.

En los CUBOS 2 y 3 los resultados han sido adecuados, por lo que el proceso se considera válido y adecuado, siendo necesario comprobar la ausencia de variaciones de altura debida a la temperatura en las piezas antes de pasar al proceso de depositar material sobre ellas.

Una vez validado el procedimiento de deposición de tinta en capas intermedias se ha procedido a realizar una pieza que podría considerarse pseudo-demostrador en material PLA, ya que va a contar con pistas conductoras y un elemento SMD conectado, todo ello embebido en el propio material de la pieza. Para ello se ha realizado el diseño en SolidWorks de la pieza a realizar para validar este procedimiento. El diseño se ha realizado en dos partes, que equivaldrían a una pieza ya que la primera parte es la que va a fabricarse antes de la deposición de tinta y la segunda a posteriori. En este diseño se han dejado canales con 0.5mm de profundidad para asegurar que la tinta resiste la fabricación de capas superiores y un alojamiento para el componente SMD de tal forma que el cabezal FDM no choque contra él al continuar la fabricación de las capas.

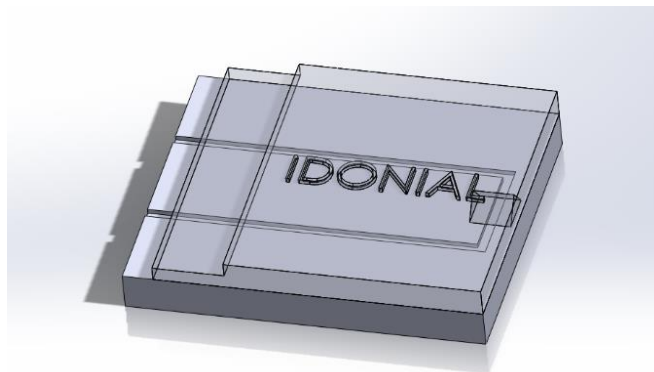


Figura 100: demostrador planteado en la tarea.

Una vez realizados los diseños se han validado en el software desarrollado por Neotech AMT, en el que se ha definido el trazado de pistas a realizar para el conexionado, procediendo acto seguido a la fabricación por FDM de la primera parte de la pieza, y la deposición posterior de las pistas conductoras mediante Piezo-Jet. La deposición de adhesivo conductor se ha realizado de forma manual y para garantizar el conexionado entre el componente SMD y las pistas depositadas. Una vez curado se procede a continuar la fabricación de la pieza FDM, esta vez cubriendo las pistas depositadas. Tras un proceso de curado térmico para asegurar que la tinta y el adhesivo están secos y conducen la electricidad se ha validado alimentando el circuito implementado con el LED SMD, como puede verse en la siguiente imagen.

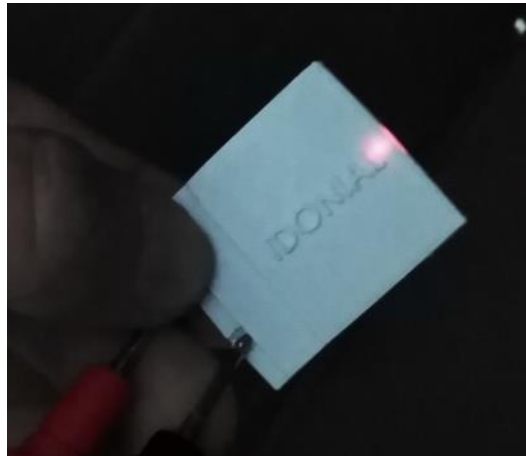


Figura 101: funcionamiento del validador (tras curado)

Al ser el PLA un material que permite pasar parcialmente la luz se ha podido validar que el LED funciona de forma adecuada, por lo que este proceso se considera operativo.

3.4 HITO 4. DEMOSTRADORES TECNOLÓGICOS

3.4.1 T4.1 DISEÑO DE DETALLE DE LOS DEMOSTRADORES

Dentro del presente proyecto se desarrollaron diversos demostradores, que se desgranar en apartados sucesivos.

3.4.1.1 Jaula de Faraday

Este demostrador consiste en la realización de una jaula de Faraday mediante la combinación de procesos de fabricación aditiva y la deposición superficial de pistas conductoras con un patrón definido. La pieza se va a fabricar en poliamida PA2200, depositando posteriormente pistas conductoras sobre su superficie para apantallar señales eléctricas.

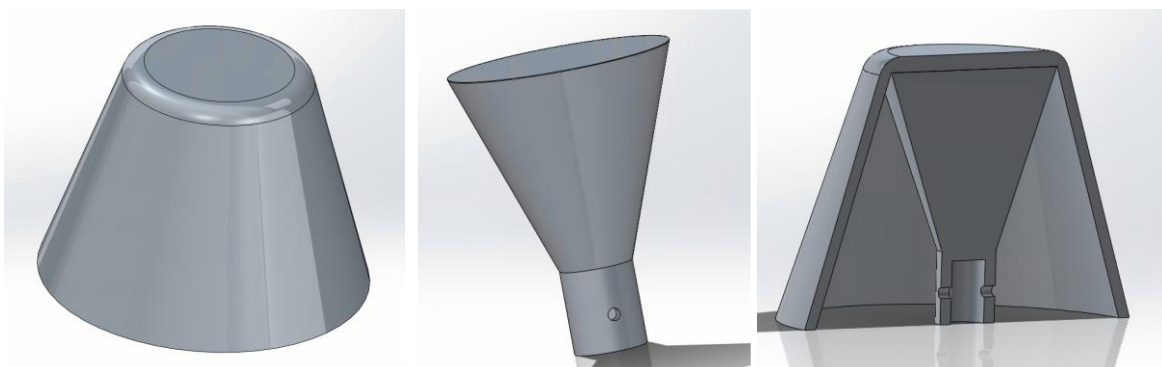


Figura 102: diseño de validador tipo jaula de Faraday

Una vez obtenido el diseño del conjunto, se pasa a diseñar el trazado de pistas conductoras que se depositarán sobre su superficie para obtener el apantallamiento adecuado. Para ello, se utiliza el software Motion3D, en el que se han trazado pistas concéntricas conectadas por pistas radiales para formar una rejilla que contendrá las señales eléctricas. Con el mismo software se ha simulado el proceso de deposición de tinta para verificar la ausencia de interferencias durante la eyección de tinta utilizando el sistema de movimiento en 5 ejes del equipo. Posteriormente se ha obtenido y revisado el código máquina que permitirá realizar la impresión.

3.4.1.2 Pieza calefactada

Manteniendo el planteamiento de electrónica superficial, se ha diseñado un sistema calefactado anti escarcha orientado al sector automoción. Para ello se ha diseñado un emblema de automoción que se utilizará como base. Este emblema cuenta con una curvatura superficial suave y uniforme, lo que permitirá su aplicación sobre la mayoría de los emblemas del mercado al presentar una geometría convexa suave, lo que hace necesario el movimiento en 5 ejes para una correcta deposición de la tinta conductora que formará la resistencia calefactora. El diseño del emblema y del soporte adaptador para su colocación en el equipo Neotech PJ15X se ha realizado con Solidworks 2012.

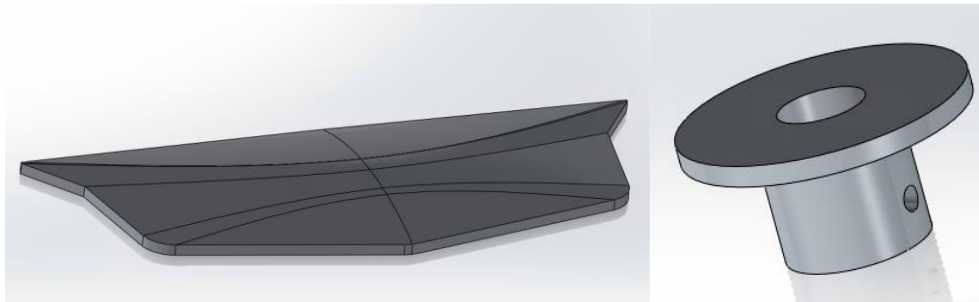


Figura 103: diseño de validador tipo pieza calefactada

Una vez diseñado tanto el emblema como el soporte se han importado en el software Motion3D, realizando el trazado de pistas superficial que aumentará de temperatura al alimentarlo eléctricamente. Este diseño presenta dos pistas en la zona superior que son los puntos de alimentación eléctrica de la resistencia calefactora. Utilizando el software Motion3D se ha ajustado el movimiento del cabezal PiezoJet para dispensar la tinta conductora sobre la superficie de la pieza, para lo que es necesario el uso de los 5 ejes de movimiento para garantizar la perpendicularidad de la superficie y el cabezal de impresión. Por último, se ha obtenido y revisado el código máquina para el equipo PJ15X.

3.4.1.3 Férula para muñeca

Un planteamiento híbrido que se ha realizado es el de la elaboración de este demostrador, que consiste en una férula para muñeca que sensoriza zonas de contacto entre férula y piel. Para ello, y dada la imposibilidad de depositar tinta en el interior de una férula conformada debido a su geometría, que no permite la entrada de ninguno de los cabezales de impresión, se ha planteado la fabricación de esta férula en plano y el posterior conformado térmico de la férula, que le otorgará

la forma adecuada al tipo de muñeca sobre el que se conforme. Este proceso será una mezcla entre impresión 3d, deposición de tintas conductoras y termoformado.

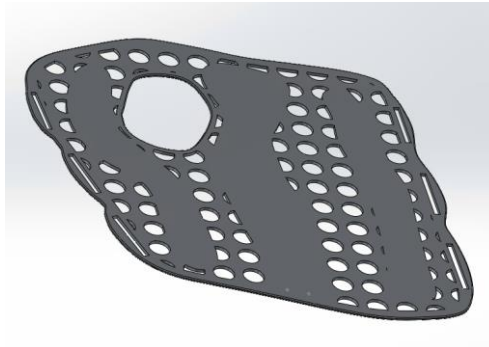


Figura 104: diseño de validador tipo férula

Una vez diseñada, con el uso del software Motion3D se ha planteado tanto el diseño de la pista a depositar que actuará como sensor, como la fabricación en PLA mediante FDM en el propio equipo PJ15X. Una vez ajustado y simulado el proceso se han obtenido los códigos máquina para la fabricación de la pieza y para la deposición de tintas.

3.4.1.4 Galgas extensiométricas en perfil aerodinámico

Este demostrador combina la deposición superficial de tintas y la deposición de tinta en capas intermedias de las piezas durante su fabricación. Para ello se ha planteado el estudio de un perfil aerodinámico, ya que es una pieza que soporta cargas aerodinámicas y sufre deformaciones constantemente durante su uso. En este caso se ha planteado la deposición de una galga extensiométrica en la superficie para poder observar las variaciones en la resistencia eléctrica de la galga en función de su deformación y también otra galga extensiométrica en una capa intermedia cercana a la línea neutra, en la que la deformación sufrida es menor.

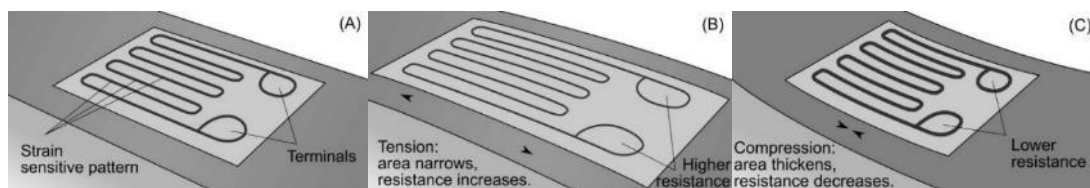


Figura 105: esquema típico de galga extensiométrica

Este demostrador presenta una gran complejidad debido a su geometría, a la necesidad de realizar el perfil en dos partes, siendo necesario continuar la fabricación de una mitad sobre otra mitad previamente fabricada. También es necesaria la realización de un mecanizado siguiendo el patrón de las pistas a depositar para evitar que el pequeño relieve que puede generar la tinta afecte a la siguiente capa de fabricación de la pieza y la deposición de la tinta con muy alta precisión en los canales mecanizados.

El diseño de este demostrador se ha realizado en Solidworks 2012. Para ello se ha diseñado inicialmente un perfil aerodinámico que posteriormente se ha dividido en dos partes para alojar la galga extensiométrica en su interior.

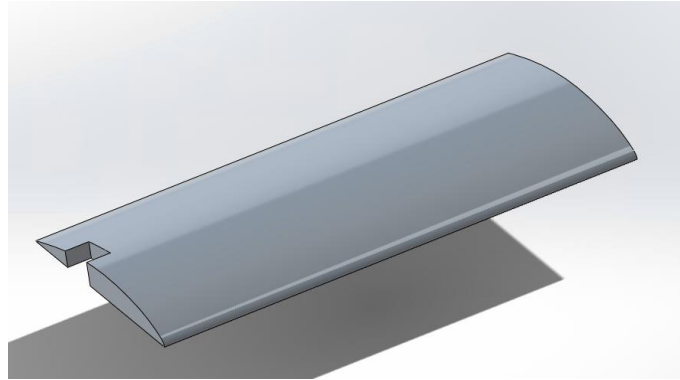


Figura 106: diseño de perfil aerodinámico como base para la colocación de una galga extensiométrica

Una vez finalizado el diseño, los archivos se han importado en el software Motion3D, donde se ha planificado y simulado la fabricación mediante FDM de las dos mitades de la pieza formando una unidad. También se ha realizado el diseño de las pistas para el mecanizado de canales y la deposición de tinta, así como para la deposición de tinta superficial posterior. Cuando estuvo todo ajustado y simulado, se han obtenido los archivos para la fabricación FDM de las dos partes de la pieza, para el mecanizado de los canales y para la impresión de tinta conductora tanto en el interior de la pieza como en su superficie.

3.4.1.5 Brazo de drone con componentes internos

Este demostrador consta de un brazo para montar en un drone. Este brazo, además de permitir el anclaje con el cuerpo del drone y la fijación del motor en su extremo, dispone de tres leds embebidos en su interior durante la fabricación. Con este demostrador se va a validar el proceso de fabricación FDM con pistas en capas intermedias con el uso de componentes SMD.

Para su fabricación ha sido necesario dividir el brazo en dos partes, que se fabricarán por FDM una sobre otra. En este caso, dado que la orientación es adecuada, se han diseñado canales con una profundidad de 0,2mm para eyectar la tinta en los mismos y así protegerla en la fabricación de la capa superior por FDM.

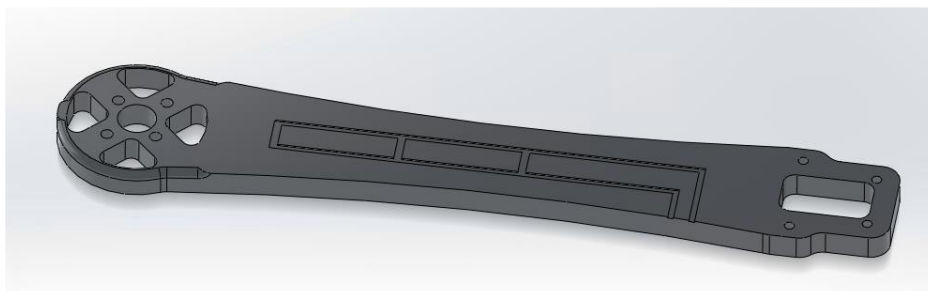


Figura 107: detalle de canales para inserción para inserción de tinta conductora

En la parte superior se han dejado unos pequeños alojamientos huecos para que el cabezal FDM no choque contra los LEDs SMD durante la fabricación.

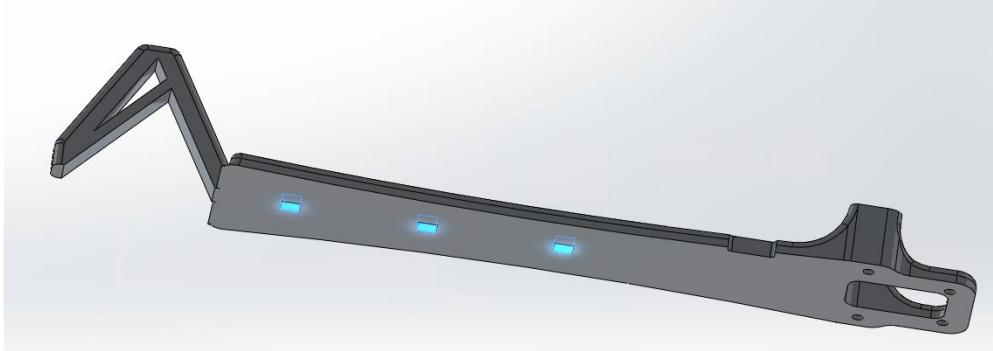


Figura 108: detalle de alojamientos huecos

Con esto se ha conseguido proteger tanto el circuito eléctrico como los componentes SMD al quedar todo embebido en el interior de la pieza. Una vez diseñado cada elemento del brazo, se han exportado al software Motion3D, en el que se ha realizado el diseño de las pistas conductoras a depositar dentro de los canales y se han simulado las fabricaciones de ambas partes del brazo de forma continua para formar un único elemento. Tras validar el proceso mediante simulaciones, se ha procedido a obtener el código máquina para su fabricación.

3.4.2 T4.2 FABRICACIÓN DE DEMOSTRADORES

Una vez finalizado el diseño de detalle de todos los demostradores se ha procedido a su fabricación, mostrándose a continuación los demostradores, ya fabricados:



Figura 109: deposición óptima de pistas conductoras sobre validador tipo jaula de Faraday

Una vez depositada la tinta, se ha realizado un tratamiento térmico a las piezas para el curado de la tinta, lo que le aporta conductividad eléctrica, mejor adhesión y mayor resistencia mecánica.



Figura 110: piezas calefactadas



Figura 111: férulas en diferentes estados de conformación



Figura 112: perfil aerodinámico con galga extensiométrica fabricado.

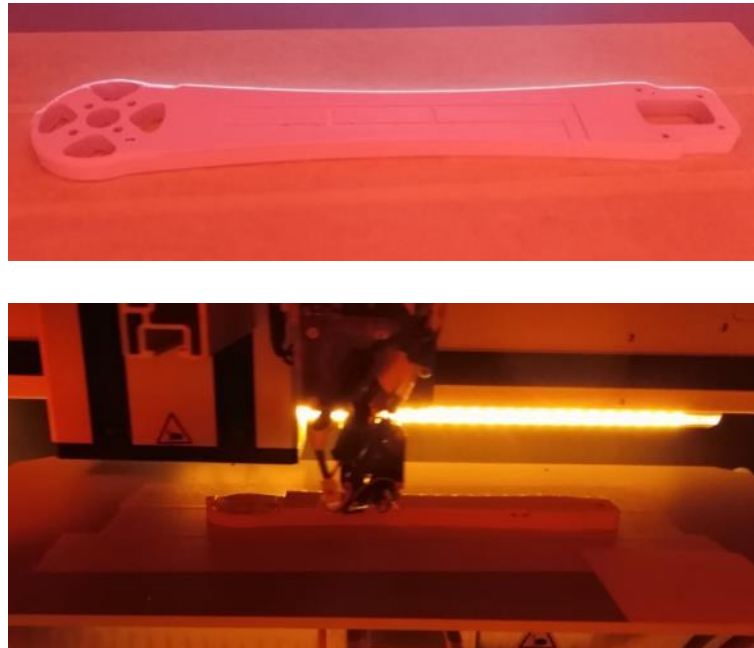


Figura 113: fabricación de demostrador tipo brazo de drone con componentes internos

3.4.3 T4.3 VALIDACIÓN DE DEMOSTRADORES

3.4.3.1 Jaula de Faraday

Este demostrador se basa en la atenuación de una señal, en este caso se ha diseñado con una separación entre pistas adecuada para la atenuación de señales Bluetooth, por lo que tras la fabricación de estos demostradores en poliamida PA2200 y la deposición y curado de las pistas conductoras, se ha procedido a su validación. Para ello se ha utilizado un emisor Bluetooth, que se ha introducido dentro de la Jaula de Faraday fabricada para comprobar si esta Jaula de Faraday funciona, si atenúa la señal Bluetooth.

Como dispositivo emisor se elige una placa de evaluación nRF51 DK que permite programar el chip Bluetooth nRF51822. Además, dicha placa se puede alimentar empleando una pila para poder emplearla sin necesidad de alimentación externa. En el chip Bluetooth se programa una aplicación que emite una señal de advertising que se emplea para publicar el servicio Bluetooth implementado en el chip. La aplicación consiste en realizar un encendido/apagado de un led de la placa de manera remota empleando Bluetooth. Para registrar los valores de intensidad de la señal Bluetooth se emplea un móvil en el cual se ha instalado la aplicación de Nordic Semiconductor que permite realizar una monitorización temporal del RSSI, indicador de intensidad de la señal recibida en dBm.

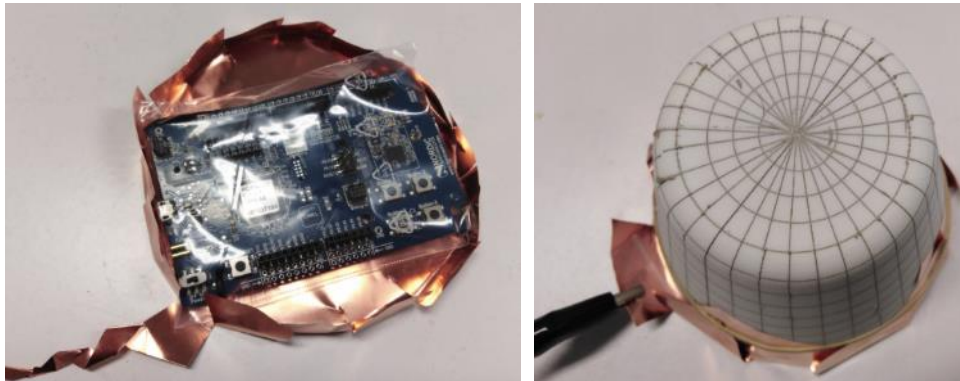


Figura 114: Colocación de base de cobre

Se ha colocado sobre una base de cobre, aislando adecuadamente la placa para que no esté en contacto directo con el cobre para evitar posibles cortocircuitos. La base de cobre actúa como “tapa” inferior de la Jaula de Faraday, siendo necesario colocar las Jaulas de Faraday de poliamida de tal forma que tengan contacto eléctrico con esta base. Para ello, se han realizado cortes a medida en la lámina de cobre de tal forma que se pueda asegurar el contacto por presión utilizando una goma elástica. De esta forma se obtiene un sistema conectado y fácilmente desmontable para poder introducir la placa emisora Bluetooth y así poder comprobar su funcionamiento.

Tras realizar varias pruebas con diferentes Jaulas de Faraday, se ha comprobado que atenúan la señal Bluetooth que recibe el dispositivo móvil externo, que el diseño es adecuado y que las Jaulas de Faraday desarrolladas en el presente proyecto son funcionales. En la siguiente imagen se muestra la captura de la pantalla del móvil en la que se puede ver los datos más relevantes del paquete de advertising como son el nombre y la intensidad recibida. Para que el experimento se pueda realizar de la manera adecuada el móvil se mantiene en una posición fija a una distancia de aproximadamente un metro del sistema bajo estudio.

En la imagen mostrada a continuación se puede ver cómo evoluciona el nivel de señal (RSSI) en el tiempo en dBm en la parte izquierda de la imagen la placa Bluetooth se encuentra en el interior de la estructura que forma parte de la jaula de Faraday por lo que el nivel de señal que llega al móvil es relativamente bajo. A continuación, se procede a quitar la parte superior de la jaula de Faraday y se puede apreciar que salto en el nivel de señal recibido por el móvil. Por lo tanto, a partir de este experimento se puede concluir que la estructura fabricada permite realizar una atenuación de unos 12 dB la señal Bluetooth lo que se puede emplear para tratar de reducir la influencia externa a un objeto en el interior o tratar de reducir el nivel de señal emitido al exterior por un objeto en su interior.

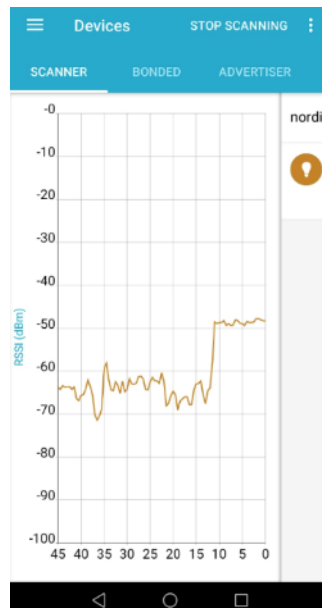


Figura 115: salto en la intensidad de señal bluetooth al retirar la jaula fabricada

3.4.3.2 Pieza calefactada

La validación de estas piezas se ha realizado utilizando para ello una cámara termográfica, con la que se ha medido la temperatura de la pieza cuya resistencia genera calor. Para ello se ha conectado a una fuente de alimentación mediante la que se ha alimentado con diferentes valores de voltaje permitiendo el consumo de corriente adecuado para el aumento de temperatura de las pistas conductoras depositadas durante su fabricación en su superficie. El montaje para su comprobación puede verse en la siguiente imagen:

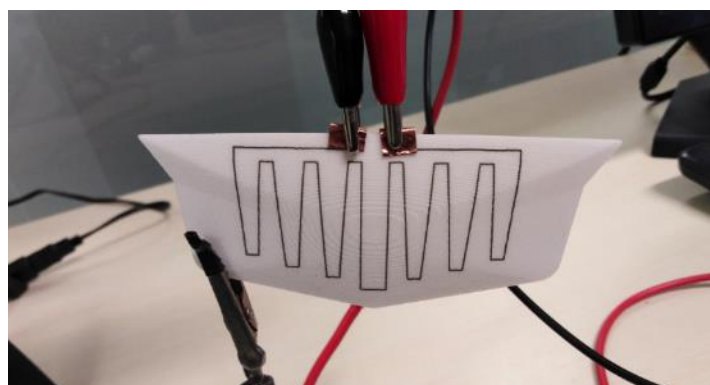


Figura 116: montaje para prueba de pieza calefactada

Una vez conectada a la fuente, se han realizado diversas iteraciones alimentando la resistencia con diferentes parámetros, los principales valores y temperatura obtenida son los siguientes:

Tabla 49: valores de corriente y temperatura medidos para pieza calefactada

VOLTAJE	CORRIENTE	TEMPERATURA
2V	0,15 A	26 °C
5V	0,4 A	36,1 °C
8V	0,53 A	40,7 °C
11V	0,85 A	87,7 °C
14V	1 A	135,7 °C

3.4.3.3 Férula para muñeca

La finalidad de este demostrador es la obtención de una férula que indique si está en contacto una determinada zona con la piel del paciente. Así se mejoraría el ajuste y la sujeción de zonas determinadas. En el caso de estudio se ha realizado un sistema de detección de contacto de la zona de la palma de la mano para asegurar que no hay espacio entre la férula y la piel en esa zona y así asegurar una buena sujeción. Se podría modificar de forma sencilla la zona a medir modificando el patrón de tinta conductora depositada.

Para detectar la correcta colocación de la férula sobre el antebrazo se ha impreso sobre ella una tira conductora que permite saber si esa parte está en contacto con la piel o no. Para ello la opción más sencilla y viable es utilizar la línea impresa como un sensor capacitivo y midiendo su capacidad se puede estimar si el antebrazo está en contacto o no con esa parte de la férula. Por lo tanto, esto puede servir como indicador de que el elemento está bien colocado.

El funcionamiento del sistema es sencillo, se emplean dos pines de un microcontrolador, uno que sirve como transmisor y otro como receptor. Además, se utiliza una resistencia de valor elevado, en este caso se ha utilizado una resistencia de 10 MΩ que con la capacidad parásita del elemento y del cuerpo humano crea un circuito RC (Fig. 1). Para calcular la Capacidad total del sistema (que indica si el brazo está en contacto con la parte impresa) lo que se hace es realizar una transición de nivel bajo del pin transmisor a un nivel alto y se calcula el tiempo que el pin receptor tarda en pasar del nivel bajo a nivel alto (existe un retardo en la transición debido al circuito RC). Una vez calculado el tiempo que ha tardado el pin receptor en alcanzar el nivel alto debido a que el valor de la resistencia es conocido se puede realizar una estimación de la Capacidad C. A partir de dicha estimación se puede detectar si la férula está en contacto con la piel o no tal como se puede ver en las medidas realizadas.

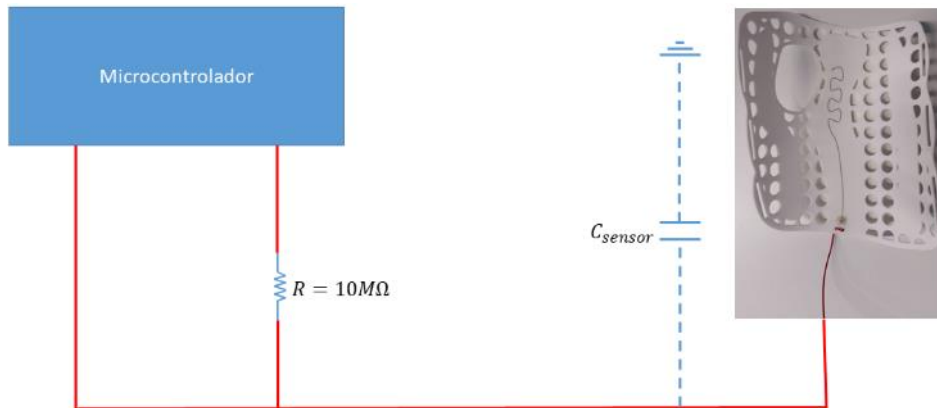


Figura 117: Esquema del circuito de detección de colocación en la férula

En la siguiente imagen pueden verse rodeado en verde los valores medidos en la férula sin tener contacto con la piel.

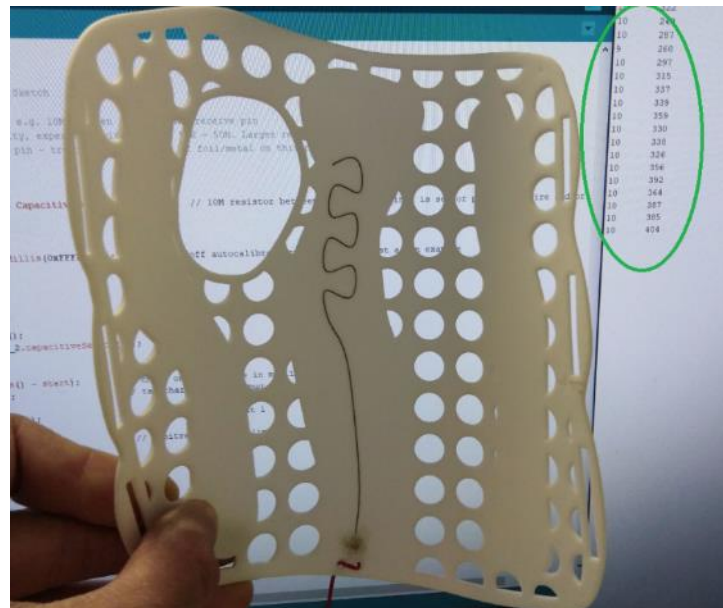


Figura 118: Valores sin contacto con la piel

Una vez comenzada la medida, se ha colocado la mano dentro de la férula y se ha comprobado como los valores de medida se incrementan notablemente (elipse roja), lo que indica que hay contacto entre la piel del paciente y la superficie de la férula.

Las variaciones de resistencia eléctrica con la flexión han sido las siguientes:

- Galga Interior: $0,2 \Omega$ de variación en 4 medidas de resistencia. Aumentando la flexión se ha llegado a $1,8 \Omega$ de variación antes de la fractura de la pieza.
- Galga Superior: $0,2 \Omega$ a $0,5 \Omega$ de variación con el mismo valor de flexión. Los valores se repiten pero presenta cierta variabilidad. Hay que tener en cuenta que estas galgas no se han calibrado, es una validación funcional, por lo que aunque en este caso la precisión es menor, se considera un funcionamiento adecuado ya que los valores se repiten en flexiones sucesivas.

A continuación se ha pasado a evaluar la pieza completa, el demostrador que contiene tanto la galga interna como la superficial en la misma pieza, obteniendo las siguientes variaciones de resistencia al flexionar la pieza manualmente hasta valores cualitativamente similares a los realizados previamente sobre las partes individuales, obteniendo la siguiente variación de resistencia eléctrica en cada una de las galgas:

- Superior: $0,3 \Omega$
- Interior: $0,2 \Omega$

En la siguiente imagen puede verse la pieza completa en proceso de evaluación de la variación de resistencia en el plano intermedio, siendo únicamente necesario cambiar la posición de los conectores a las otras dos pistas para evaluar la galga superficial superior.



Figura 121: evaluación de variaciones de resistencia

3.4.3.5 Brazo de dron con componentes internos

Una vez fabricado este demostrador, para su validación solamente ha sido necesario alimentarlo eléctricamente ya que al disponer de leds SMD integrados en su interior durante la fabricación, si estos componentes se iluminan significa que la tinta conductora se ha dispensado de forma adecuada, que los componentes se han posicionado de forma adecuada y que el adhesivo

conductor actúa correctamente uniendo tanto mecánica como eléctricamente los componentes a las pistas de plata.

Como puede verse en la siguiente figura, han funcionado adecuadamente todos los leds colocados en el interior del demostrador durante su fabricación por lo que se considera totalmente funcional.

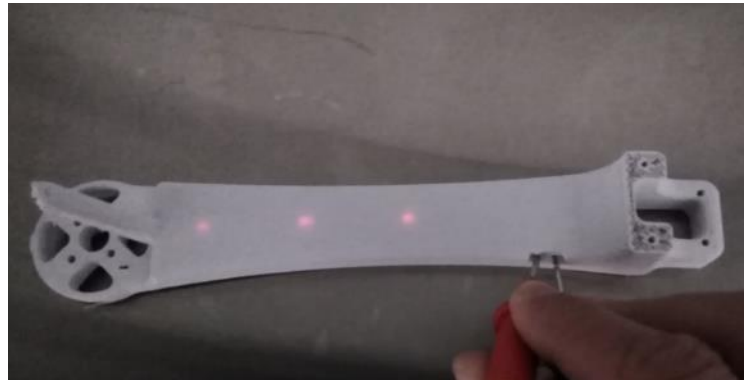


Figura 122: Brazo de drone con los 3 leds SMD iluminados

3.5 CONCLUSIONES

- Tras la ejecución del proyecto se han generado demostradores tecnológicos de gran utilidad para validar las diferentes tecnologías utilizadas, además de haber generado un conocimiento muy importante y aplicable a futuros desarrollos en los que se combinen tecnologías de fabricación aditiva con tecnologías de impresión de pistas conductoras.
- Dentro de las tecnologías de deposición evaluadas (Piezo Jet y Aerosol Jet), con la realización de diferentes pruebas se ha generado conocimiento sobre la tipología de pieza y superficie más adecuada para cada una de ellas, teniendo en cuenta que cada una de estas tecnologías presenta unas características muy diferentes, aunque ambas sean tecnologías de impresión con las que imprimir pistas conductoras.
- La tecnología PiezoJet ha demostrado ser una tecnología robusta y fiable, que permite la elaboración de trayectorias complejas obteniendo un bajo grado de error o cortes de pistas por lo que se considera adecuada para un gran número de aplicaciones, especialmente cuando no se necesite una resolución muy elevada o la deposición de pistas muy finas. Es una tecnología que se adecúa bien a la superficie de las piezas elaboradas mediante fabricación aditiva, con rugosidad superficial bastante elevada y diferentes materiales. Además, gracias a las reglas de diseño de piezas para ser adecuadas a recibir pistas en su superficie, se pueden minimizar o eliminar las geometrías problemáticas mejorando así la calidad y robustez del proceso.
- La tecnología Aerosol Jet es una tecnología fiable, pero con un campo de aplicación más reducido dentro de la interacción con piezas elaboradas mediante fabricación aditiva ya

que al depositar una cantidad muy reducida de tinta se ve muy afectada por la rugosidad superficial de las piezas, así como por las pequeñas irregularidades que puedan tener. Aun así, es una tecnología que permite un alto nivel de detalle, y que puede aplicarse de forma funcional sobre piezas con baja rugosidad superficial o que reciban un coating para reducirla.

- Dentro de este proyecto también se ha estudiado el comportamiento de la tinta conductora rellenando canales internos, teniendo problemas para su curado al no poder expulsar los solventes y produciendo el vaciado de piezas o su rotura y generando el conocimiento adecuado para solventar esto mediante el uso de tintas termoestables que no necesitan evacuar solventes durante su curado. Con esto se ha generado un método de fabricación novedoso que permite el planteamiento de fabricación de piezas que no podrían llevarse a cabo mediante otras tecnologías de fabricación, lo que permite ampliar el campo de aplicación de la combinación entre fabricación aditiva y electrónica impresa.
- También se ha generado un conocimiento muy útil sobre la fabricación de piezas con pistas internas, para cuya deposición es necesario detener el proceso de fabricación, depositar y curar las pistas conductoras, componentes SMD y adhesivos conductores. Se han identificado materiales adecuado para ello y se ha llevado a cabo el desarrollo de esta metodología de fabricación hasta la generación de demostradores funcionales, con lo que se ha validado su viabilidad y es otra de las líneas de fabricación de piezas que han surgido a raíz de este proyecto.
- Como broche final de este proyecto y, sobre todo, como validación de todas las pruebas y optimizaciones realizadas combinando tecnologías de fabricación aditiva y de electrónica impresa, se han generado diversos demostradores operativos, cuyo funcionamiento y robustez nos permiten afrontar nuevos desarrollos en la misma línea e incluso fabricaciones cercanas a pieza final para cliente con seguridad, ya que tras estos años de investigación y ensayos disponemos de un conocimiento muy superior al inicial y de los medios, metodología y equipos que nos permiten abrir nuevas líneas de fabricación acercando a las empresas tecnologías y combinaciones de las mismas con las que puedan mejorar sus productos, generar nuevos productos reduciendo las limitaciones de la electrónica convencional y abriendo nuevas posibilidades de diseño y fabricación.