

***Contribución a las tecnologías de fabricación
aditiva para la obtención de piezas multimaterial,
combinando la impresión 3D por máscara con la
impresión funcional mediante sistemas InkJet***

- VOLUMEN 2 -



Doctorando: **Asier Muguruza Blanco**

Director: **Dr. Joaquim Minguella i Canela**

Codirector: **Dr. Jordi Bonada Bo**



**UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH**

**Escola Tècnica Superior d'Enginyeria
Industrial de Barcelona**

Volumen 2

3.1. INTRODUCCIÓN	533
3.2. EQUIPO DE IMPRESIÓN HÍBRIDA 3D-2D	535
3.2.1. Consideraciones previas.....	536
3.2.2. Sistema de impresión por tecnología DLP.....	538
3.2.2.1. Proyector.....	539
3.2.2.2. Conjunto plataforma de construcción.....	540
3.2.2.3. Depósito de resina.....	542
3.2.2.4. Wiper o nivelador.....	543
3.2.2.5. Estructura.....	545
3.2.2.6. Proceso de impresión mediante la tecnología de DLP.....	547
3.2.2.7. Fotopolimerización.....	551
3.2.2.8. Reproducción de piezas tridimensionales en verde y sinterización.....	557
3.2.3. Sistema de impresión Inkjet.....	564
3.2.3.1. Desplazamiento del cabezal de impresión en el plano X-Y.....	566
3.2.3.2. Ajustes y otras particularidades del sistema de impresión Inkjet.....	569
3.2.3.3. Reproducción patrones bidimensionales a través del sistema Inkjet.....	573
3.2.4. Integración de los sistemas de impresión en 3D y 2D.....	576
3.2.4.1. Compatibilidad geométrica.....	578
3.2.4.2. Procesos de impresión del equipo híbrido multimaterial (Deposición de tintas sobre superficie fotopolimerizada).....	579
3.2.4.3. Aspectos constructivos del sistema.....	583
3.2.5. Múltiples sistemas de impresión integrados en un equipo híbrido multimaterial.....	593
4.1. INTRODUCCIÓN	599
4.2. DEMOSTRADORES	600
4.2.1. Reproducción de patrones e imágenes bidimensionales a través del sistema de deposición de materiales por tecnología Inkjet DOD del tipo PIJ.....	600
4.2.2. Reproducción de geometrías tridimensionales a través del sistema DLP.....	614
4.2.2.1. Sinterización de las barbotinas fotosensibles.....	616
4.2.3. Piezas y dispositivos impresos mediante la integración de los sistemas DLP e Inkjet en el equipo híbrido.....	636

4.2.3.1. Circuitos.....	636
4.2.3.2. Piezas Objetivo (sensores para el mundo automotor).....	653
4.3. CONCLUSIONES Y FUTURAS INVESTIGACIONES _____	666
4.3.1. Resumen final y conclusiones.....	666
4.3.2. Futuras investigaciones.....	672
4.4. CONCLUSIONS AND FUTURE RESEARCH _____	673
4.4.1. Final summary and conclusions.....	673
4.4.2. Future research.....	678
4.5. PUBLICACIONES EN EL AMBITO DE ESTUDIO _____	680
4.5.1. Artículos publicados.....	680
4.5.2. Artículos en revisión.....	680
4.5.3. Participaciones en congresos y ferias.....	681
4.5.4. Patentes registradas.....	683
4.6. LISTADO DE FIGURAS DEL VOLUMEN 2 _____	685
4.7. LISTADO DE TABLAS DEL VOLUMEN 2 _____	701
4.8. REFERENCIAS DEL VOLUMEN 2 _____	703

Capítulo 3

3.1. INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se abordan algunas de las peculiaridades del equipo de impresión híbrido desarrollado en el proyecto Nhibrid32D a modo de aportar contexto a la investigación desarrollada en la presente tesis.

La integración de múltiples tecnologías de impresión en un único sistema se lleva realizando desde hace algún tiempo. En este aspecto, en 2005 F. Medina et al. [1] llevaron a cabo la combinación de un sistema de estereolitografía junto con un sistema direct writing (DW) en un sistema de impresión híbrido. Dado el enorme potencial que ofrece la fabricación de geometrías complejas con circuitería embebida desde entonces se ha suscitado un interés notable en este campo. Más recientemente, avances en los métodos de dispensación de tinta han permitido que ésta tecnología sea atractiva para la fabricación de sistemas complejos 3D, multicapas y con una relativamente alta densidad de integración de componentes pasivos (resistencias, bobinas y condensadores) con los cuales y tras la colocación de componentes electrónicos activos (amplificadores operacionales, transistores, etc.) es posible proporcionar a los objetos reproducidos propiedades novedosas [2]–[4]. Por otra parte, los sistemas de impresión por tecnología FDM (Fused Deposition Modelling) también se han visto combinados con sistemas DW [5], [6], en este aspecto recientemente la empresa VOXEL8 spin-off de la Universidad de Harvard (EEUU) de la mano de la profesora Jennifer Lewis, ha sido la primera empresa en comercializar dicho sistema híbrido.

La integración por otro lado, de un sistema de impresión tridimensional por DLP (Digital Light Processing) con sistemas de deposición de tintas Inkjet, representa una novedad. Los sistemas DLP como hermana menor de los equipos estereolitográficos debido a que la energía suministrada es generada por capas y no por punto, en donde el material es añadido por capas, ofrece una mayor velocidad de construcción que su homólogo mayor, especialmente en la reproducción de formas complejas e intrincadas de grandes superficies. Los últimos avances en los dispositivos DMD (Digital Micromirror Devices) han convertido a los proyectores utilizados en esta tecnología en poderosas herramientas de bajo coste, capaces de controlar simultánea y dinámicamente la energía proyectada, generando imágenes precisas de alta resolución y en consecuencia objetos de gran fidelidad. Los sistemas Inkjet a su vez, por ser un sistema de impresión rápido, sencillo y de relativo bajo coste, en donde la deposición de los materiales se realiza sin contacto con el sustrato de deforma discreta y a voluntad, ofrecen una gran versatilidad. Los últimos avances en la miniaturización de los sistemas accionados por piezoeléctricos han aumentado aún más

dicha versatilidad permitiendo disminuir las limitaciones de la sustancia impresa, bases en la que se sustenta el resurgimiento de ésta tecnología, la cual a día de hoy domina el mercado de la micromanufactura dentro de la impresión funcional [7].

El sistema que aquí se expone sin embargo, representa un primer paso en el desarrollo de sistemas híbridos multimateriales en el cual se reproducen piezas bimaternal, pero abre la posibilidad de combinar un mayor número de materiales mediante el uso de múltiples depósitos de resinas y tintas. En este aspecto Maruo et al. [8] fue el primero en presentar un sistema SLA multimaterial a través del intercambio manual de las cubas, Wicker et al. [9]–[11] extendió el trabajo desarrollando un sistema de carrusel de cubas múltiple automatizando, incluyendo el proceso de construcción el ciclo de lavado, curado y secado entre las resinas de construcción y posteriormente Choi et al. [12] informó bajo el mismo principio de la fabricación de objetos a micro-escala. Por otra parte, en sistemas donde el aporte de energía se realiza por capa Zhou et al. [13] presento un sistema de impresión bimaternal similar utilizando la tecnología DLP.

Por otro lado, en relación a los sistemas Inkjet, al ser una tecnología de reproducción digital basada en la deposición discreta de gotas eyectadas a través de cabezales, al ser estos modulares al igual que en los sistemas de impresión convencionales basados en la cuatricromía CMYK, la implementación de múltiples cabezales en el carro de impresión abriría la posibilidad de combinar múltiples materiales y en distintas graduaciones. Al ser un sistema de deposición sin impacto, la deposición de éstos materiales puede llevarse a cabo sobre cualquier sustrato plano pudiendo ser éste generado aditivamente en una etapa anterior como es el presente caso. La combinación de múltiples materiales tanto en las cubas como en los sistemas Inkjet podrían aportar una gran versatilidad estos equipos híbridos.

3.2. EQUIPO DE IMPRESIÓN HÍBRIDA 3D-2D

La innovación tecnológica planteada a continuación consiste en la integración de un sistema de impresión tridimensional por tecnología DLP con un sistema de deposición de materiales por tecnología Inkjet y en concreto los del tipo DOD (Drop on demand) accionados por piezoeléctricos. Dicha tecnología no existe actualmente y representa un avance en la tecnología actual, proporcionando versatilidad, velocidad, precisión y repetitividad a bajos costes, dotando a estos equipos de la capacidad de reproducir elementos de mayor valor agregado.

Debido a las nuevas necesidades impuestas por la sociedad de la información y del conocimiento y siendo la fabricación aditiva uno de los máximos exponentes la revolución tecnológica a la que estamos expuestos, tanto en Europa como en todo el mundo, existe una gran expectación ante las posibilidades que el desarrollo de estas tecnologías puede ofrecer. Es por ello que los principales programas de financiación europeos en I+D tienen diferentes convocatorias abiertas en este tipo de tecnologías, demostrando así su potencialidad y el interés que suscita.

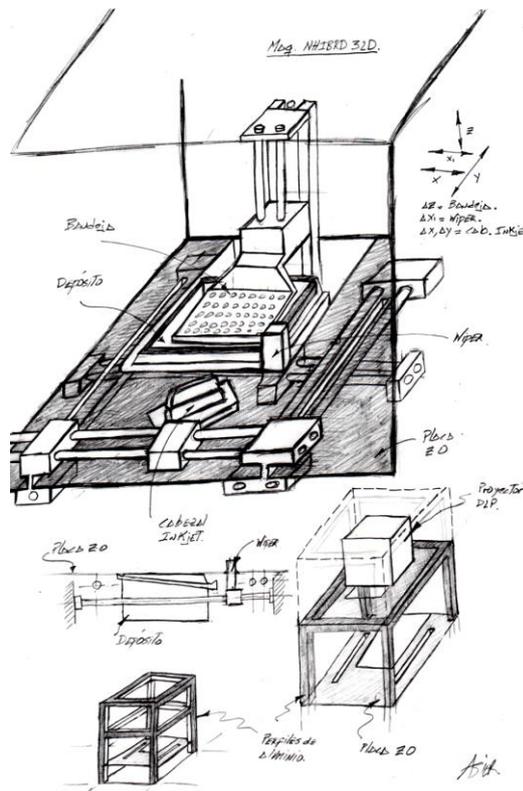


Figura 301: Boceto inicial de la máquina de impresión híbrida (noviembre 2015) [Fuente: Elaboración propia].

Como ya se ha comentado en el Capítulo 1, en la actualidad se comienzan a observar los primeros pasos en el desarrollo de equipos que, basados en las ventajas de la fabricación

digital buscan a través de la fabricación aditiva y la combinación de materiales, aprovechar sus potencialidades, de esta forma surge el proyecto de investigación Nhibrid32D (RTC-2015-3497-7).

Establecidos unos requisitos previos y tras una tormenta de ideas se empezó a conceptualizar el equipo de impresión híbrido, cuya concepción inicial se muestra a través del boceto de la Figura . Es en este punto donde es necesario definir algunas de las consideraciones previas tenidas en cuenta. Por otro lado, se ha de resaltar que en este proyecto se buscó generar conocimiento y contribuir al avance de las técnicas aditivas lo que en principio supone validar ideas y en consecuencia muchas de éstas no han sido por completo desarrolladas. Por este motivo, dicho equipo no muestra las sutilezas y los detalles de un producto desarrollado y mucho menos disponible, ya que en sí constituye un prototipo, germen de futuras máquinas híbridas.

3.2.1. Consideraciones previas.

Dado que básicamente existen dos tipos de configuraciones estándar para impresoras 3D de tipo DLP, la configuración Bottom Up y la Top Down, en el equipo híbrido desarrollado se ha considerado que la opción más eficiente es la configuración Top Down, es decir como ya se ha comentado anteriormente, consiste en un sistema donde el proyector se encuentra sobre el depósito y las imágenes son proyectadas sobre éste de arriba hacia abajo. Esta configuración facilita la adhesión de las tintas y/o materiales conductores sobre las capas construidas por fotopolimerización de las resinas que hacen de sustrato.

En cuanto a los sistemas de deposición de materiales por tecnología Inkjet, estos se han considerado que debían ser del tipo DOD y entre éstos los accionados por piezoeléctricos es decir, los de tecnología PIJ. De esta forma el rango de materiales susceptibles a eyectados y depositados sería mayor.

Posteriormente, para que la integración de ambos sistemas pueda ser llevados cabo, éstos han de estar referenciados a una base fija absoluta, cuyo origen hemos llamado cero máquina. En este aspecto el equipo en cuestión cuenta con 5 grados de libertad, en donde priorizando al sistema Inkjet éste cuenta con tres de ellos, dos traslaciones (x' , y' , ver Figura 302) y una rotación (λ'), todos ellos independientes y no coordinados. A través de estos grados de libertad el sistema de deposición de tintas es capaz de cubrir toda la superficie del plano de impresión, cuya base bidimensional móvil es referenciada al origen máquina a una cota vertical fija.

El sistema DLP por otro lado, cuenta con otras dos traslaciones (x'' , z'), a través de ellas es posible controlar la altura de la plataforma de construcción (elemento a través del cual se vincula ambos sistemas de impresión) y por otro lado el sistema DLP cuenta con el wiper como elemento nivelador de la resina. Ambos movimientos al igual que en el sistema Inkjet son independientes y no se realizan de forma coordinada.

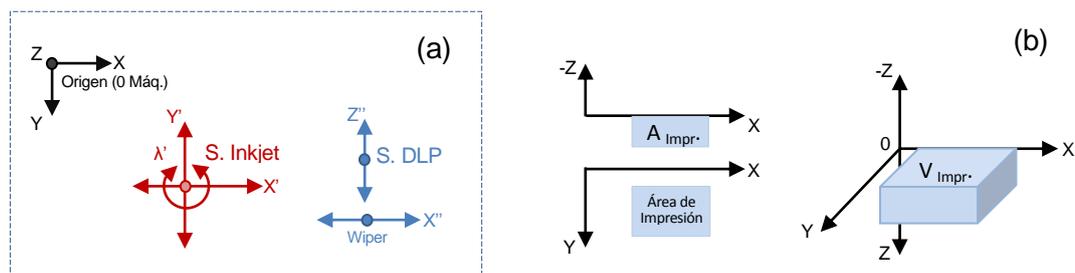


Figura 302: Grados de libertad y disposición conceptual de los ejes que constituyen a los distintos sistemas integrados en el equipo de impresión híbrido (a). Área y Volumen de impresión referenciada al origen absoluto o cero máquina (b) [Fuente: Elaboración propia].

Como se puede apreciar en la Figura 302.b, bajo la orientación de la base empleada, la construcción del elemento tridimensional se realiza sumergiendo la plataforma de construcción en la cuba de resina, pero la deposición de los materiales a través del sistema Inkjet se realiza a una cota superior a la superficie libre de ésta, por lo que en principio el volumen de impresión se representa en el cuadrante positivo.

Bajo esta conceptualización inicial el proceso de construcción de la geometría tridimensional se realiza generando un bucle en el que interviene el proyector, los desplazamientos discretos de la plataforma en sentido negativo y el dispositivo nivelador o wiper. Este proceso a su vez se ve alternado con la deposición discreta y sin contacto de las tintas, y en consecuencia la plataforma en donde se erige la pieza en construcción, ha de poder emerger del depósito de resina posicionándose a la cota positiva requerida para tal fin.

Debido a que la manipulación de las resinas requiere de ciertas consideraciones, se ha optado por alojar los elementos mecánicos de transmisión, así como los de control y accionamiento eléctrico, separados y protegidos ante posibles salpicaduras que puedan al solidificarse obstruir e imposibilitar el buen funcionamiento de éstos.

Por otra parte, los requisitos iniciales impuestos por los distintos integrantes del proyecto establecieron que el sistema híbrido en cuestión debía ser capaz de generar una estructura tridimensional con circuitería embebida, cuyas dimensiones de las piezas objetivo no serían superiores a 100x56,25x45 mm en principio y en cuanto a las pistas conductoras éstas estarían comprendidas entre las 50 a 300 μm de anchura. A tal fin se debían utilizar resinas fotosensibles dentro del espectro de luz visible y tintas conductoras, puesto que el sistema supone una innovación tanto el equipo, como el control del mismo debía ser desarrollado. En este aspecto el sistema debía funcionar como un elemento un periférico de salida capaz de reproducir los archivos digitales albergados en un ordenador externo.

Así pues, como el equipo reproductor se fundamenta en el uso de un sistema de impresión tridimensional por tecnología DLP es necesario que, aunque de forma superficial se aborde alguna de sus particularidades.

3.2.2. Sistema de impresión por tecnología DLP.

La tecnología DLP constituye la hermana menor de los sistemas estereolitográficos (por haber aparecido más recientemente). Es una tecnología donde la energía suministrada es generada por capa y no por punto, y donde el material se añade también por capa ofreciendo una mayor velocidad de construcción que su homóloga de mayor edad, especialmente en la reproducción de complejas formas o capas con grandes superficies. Mediante el control de los procesos de fotopolimerización de las resinas esta tecnología ofrece una alta fidelidad de reproducción en comparación a otras técnicas a un coste muy reducido.

En el corazón de cada sistema de proyección DLP como ya se ha comentado (Capítulo 1) hay un semiconductor óptico conocido como el chip DMD (Digital Micromirror Device), inventado por Texas Instruments en 1987. Dicho chip contiene una matriz rectangular dotada de decenas de millones de espejos microscópicos montados en bisagras (ver Figura 303) los cuales al inclinarse hacia una fuente de luz (encendido) y al alejarse (apagado) conforman un pixel claro u oscuro en la superficie de proyección. La profundidad de color se obtiene por frecuencia, e interponiendo ante la fuente de luz un disco con los tres colores primarios (rojo, verde, azul) colocados en secuencia, que al rotar y en coordinación con los múltiples espejos del chip DMD asociados a cada pixel proyectan las imágenes como una combinación de tres máscaras una de cada color a una frecuencia imperceptible a nuestros ojos.

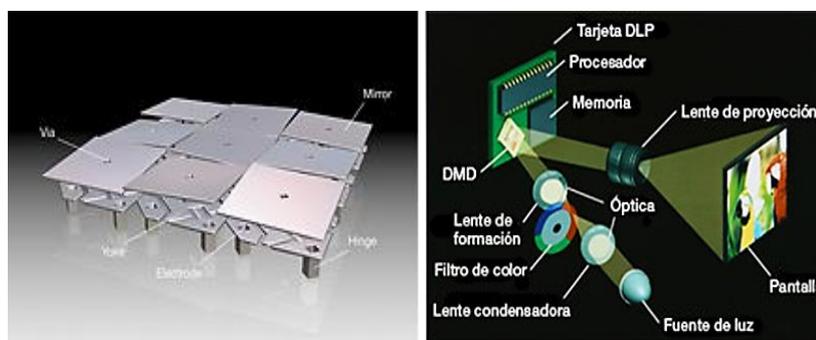


Figura 303: Imagen de la matriz de espejos contenido dentro del chip DMD [14], y esquema de funcionamiento de un proyector DLP [15].

Los proyectores DLP se caracterizan por ofrecer elevado contraste (negros profundos y blancos brillantes), la ausencia de remanencia en las imágenes, facilidad de reglajes y precisión de colores (más de mil millones de colores distintos). Por otro lado, el nivel de resolución de la imagen proyectada y las propiedades de la fuente iluminación (potencia y longitud de onda) condicionan su coste, la fuente de iluminación requiere de refrigeración forzada por lo que pueden llegar a ser ruidosos y en algunos casos requerir de mantenimiento.

3.2.2.1. Proyector.

Retornando al equipo híbrido, en el sistema de impresión DLP se ha utilizado un proyector Full-HD (1920x1080 píxeles) de la empresa Acer modelo H6510BD, con un índice de proyección o throw ratio (relación de la distancia de proyección respecto al ancho de la imagen) de 1,15:1 a 1,5:1, cuya fuente, una lámpara OSRAM de 210 W de halogenuros metálicos de alta densidad de descarga HID (High Intensity Discharge), es capaz de emitir una potencia lumínica de 3.000 lm dentro del espectro visible (longitud de onda de 400 a 700 nm). A continuación en la Figura 304 se muestra una imagen del espectro de emisión de una típica lámpara de halogenuros metálicos como la utilizada en dicho proyector.

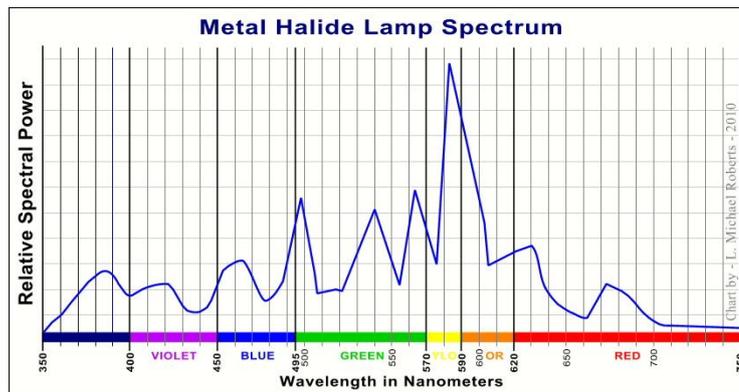


Figura 304: Potencia espectral emitida por una lámpara de haluro metálico típica en el uso de los proyectores DLP [16].

Los datos proporcionados por el fabricante se determinan que el ángulo de salida del haz de luz del proyector es de unos 12° , hecho que condiciona el posicionamiento del proyector en el interior del equipo híbrido. El proyector se encuentra sujeto dentro de una estructura ligera de perfiles de aluminio extruido, ubicada ligeramente destazado (fuera del centro), solidada a una placa con regulación vertical y de forma perpendicular a la superficie libre del depósito. Mediante el desplazamiento discreto de dicha placa en vertical, la imagen emitida por el proyector aumenta en superficie lo cual aporta flexibilidad al equipo, pero a su vez disminuye en resolución de la misma en el plano X-Y.

La mínima distancia a la que se encuentra el proyector respecto a la superficie libre del depósito es de 150 mm y la máxima de 250 mm, permitiendo un ajuste manual por incrementos de 50 mm (ver Figura 305). A esta distancia y tras ajustar el throw ratio el proyector emite imágenes de 122,5 mm de ancho lo que equivale a una resolución teórica XY máxima de $63,8 \mu\text{m}/\text{píxel}$. La resolución real por otra parte del sistema, es ligeramente inferior debido a la influencia de las distorsiones de la lente, la dispersión generada por los bloqueadores de la resina y las contracciones de éstas durante la polimerización.

Por otra parte, es importante resaltar que al sistema de sujeción del proyector se le ha dotado de una batería de 10 leds del fabricante ILS (modelo ILS-XR05-S385-0058-SC211-

W2) capaces de emitir luz UV-A con una potencia radiométrica mínima de 5000 mW/led. La función de esta batería de leds dispuestos en línea sobre el proyector y en perpendicular a la plataforma de construcción, es la de finalizar de curar la superficie de la resina antes de la deposición de los materiales por Inkjet. Así como también facilitar la evaporación de los solventes de las tintas facilitando la fijación de las mismas, afín de evitar la difusión de estas en la cuba de resina durante los distintos bucles de la impresión tridimensional.

Las dos placas de 5 leds fueron seleccionadas para la fijación de tintas y el curado de los fotopolímeros emitiendo luz a una longitud de onda del espectro electromagnético de 385-395 nm, con un ángulo de radiación de 65°.

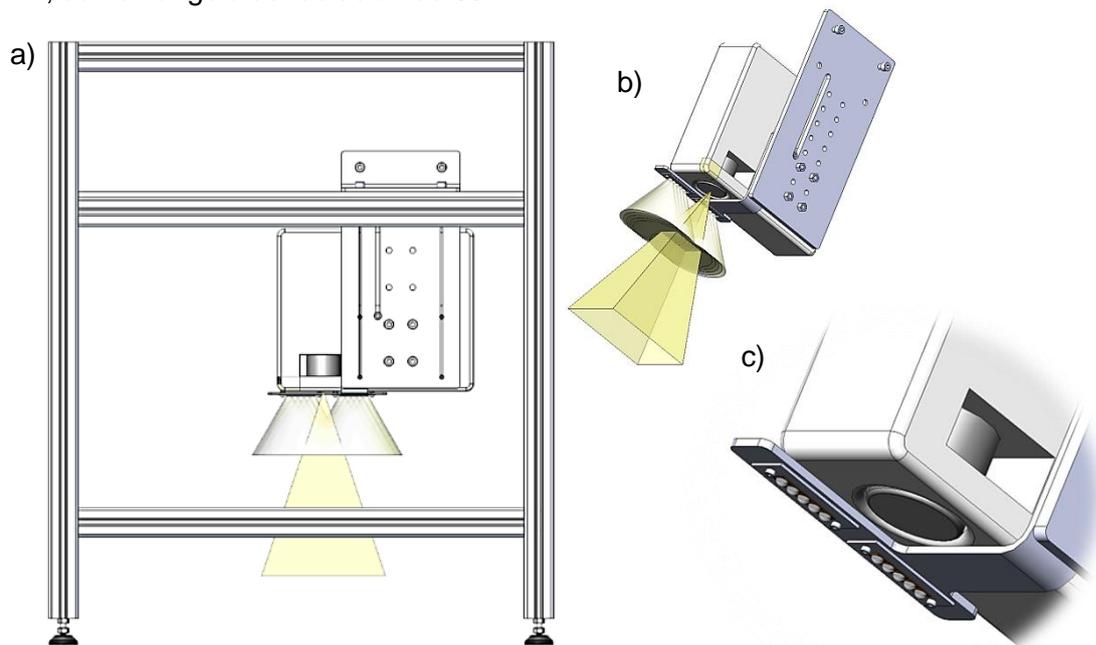


Figura 305: Ubicación del proyector en el interior del equipo(a). Vista del conjunto de proyección (b) y detalle de la ubicación y disposición de los leds UV-A (c) [Fuente: Elaboración propia].

El sistema de impresión por DLP se completa con el sistema de posicionamiento de la plataforma en el eje vertical conjunto que hemos llamado plataforma de construcción, así como también la cuba o depósito de resina y el sistema Wiper o nivelador.

3.2.2.2. Conjunto plataforma de construcción.

El conjunto plataforma de construcción es el responsable de regular la cota vertical (a través del eje Z) de la plataforma de construcción, elemento que sustenta el objeto a reproducir. Este conjunto está constituido por distintos elementos móviles en los que se destaca la propia plataforma la cual es removible en sentido horizontal, y a través del husillo principal accionado por un motor paso a paso, el movimiento vertical del elemento soporte plataforma.

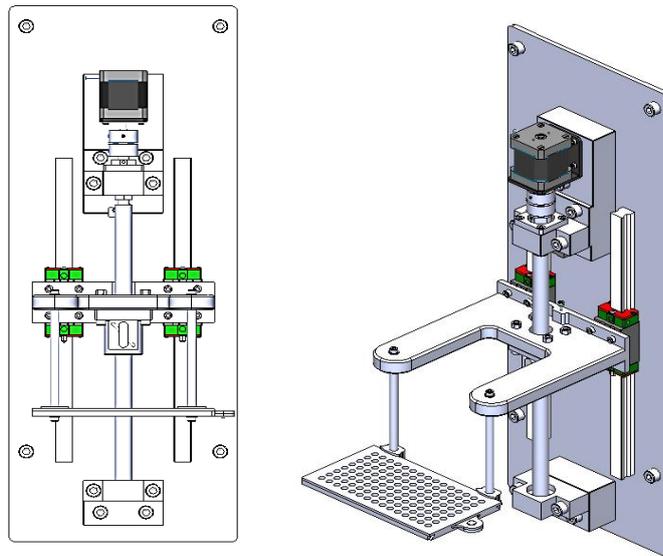


Figura 306: Conjunto plataforma de construcción vista en alzado y vista tridimensional [Fuente: Elaboración propia].

Como ya se ha comentado previamente en el movimiento vertical de eje Z de la plataforma de construcción se ha utilizado un motor paso a paso de $0,9^\circ/\text{step}$, un husillo rectificado de $350 \times 15 \times 5 \text{ mm}$ de longitud, diámetro y paso respectivamente con un grado de precisión C5, unidos mediante un coupling elástico de disco con muy poco *backlash* (juego) y guiados por sendos raíles rectificados unidos a patines lineales de bolas, afín de garantizar una perpendicularidad entre el sistema de guiado vertical y la superficie libre del depósito de resina. Por otro lado, la carga axial de husillo es despreciable debido a las diminutas dimensiones de las piezas objetivo. El motor empleado ofrece un par máximo de $0,44 \text{ N}\cdot\text{m}$ que excede en gran medida las solicitaciones impuestas.

La combinación de un husillo y motor con las características anteriores permite obtener una resolución mínima por capa de $12,5 \text{ micras}$ es decir, siendo ésta la altura o espesor mínimo teórico de las capas reproducidas, lo cual bajo la satisface las especificaciones previamente fijadas.

Plataforma de construcción.

La plataforma de construcción como tal, está constituida por dos elementos, uno fijo (plataforma) solidario al eje Z y por tanto capaz de desplazarse verticalmente, y el otro elemento, móvil, respecto a éste (plataforma de construcción). Este último ofrece la capacidad de ser fácilmente extraíble, de esta forma el elemento fijo en voladizo, no sufre durante el proceso de extracción de los objetos reproducidos, asegurándose así la continuidad de su paralelismo con respecto a la superficie libre del depósito durante un tiempo más prolongado, la unión de ambos elementos se realiza a través de un sistema de colas de milano fijas por un pasador (ver Figura 307).

Es importante resaltar que la plataforma de construcción (elemento móvil extraíble) dispone de un conjunto de agujeros pasantes dispuesto en forma matricial y perpendiculares a ésta. Éstos agujeros facilitan el proceso de sumergido, permitiendo que la resina fluya reduciendo las ondulaciones en la superficie libre del depósito. Por otro lado, también facilita el escurrido de la pieza cuando esta se dispone a recibir las tintas depositadas por el sistema Inkjet.

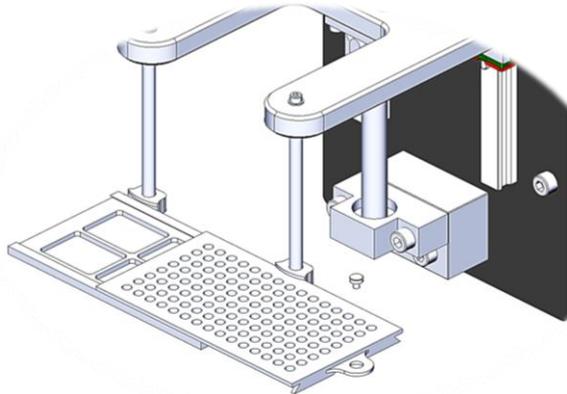


Figura 307: Representación esquemática de la plataforma de construcción [Fuente: Elaboración propia].

3.2.2.3. Depósito de resina.

En cuanto al depósito de resina, por ser un sistema DLP de configuración Top-down, ha de tener la suficiente profundidad para que permita la inmersión total de la plataforma más la pieza a construir. En este aspecto se han desarrollado múltiples cubas de distinta profundidad, pero afín de satisfacer los requisitos iniciales se ha utilizado una cuba de 212,50x122,50 mm con una profundidad de 30 mm.

Con el objetivo de controlar el nivel de la resina y mantener éste constante, y de esta forma no modificar la distancia del proyector a la superficie libre del depósito tras las sucesivas pérdidas de resina en la etapa de sumergido y escurrido de la plataforma de construcción durante el proceso de impresión, el depósito ha sido dotado de un sistema de bombeo que por exceso derrama la resina al canal que lo rodea. Para ello se ha utilizado una bomba peristáltica que, debido a sus pequeñas aportaciones de volumen de forma discreta, permite regular dicho nivel de resina. Por otro lado, cabe resaltar que el depósito ha sido diseñado para que éste pueda ser sustituido con facilidad. Es por ello que mediante el uso de pestañas y por simple gravedad, éste se aloja sobre el elemento llamado placa soporte depósito resina y el cual, a su vez se une de forma rígida a través de tornillos con la plaza Z0 (elemento de referencia). Como se puede apreciar en las imágenes de la Figura 308, donde el contorno que bordea al depósito posee una arista filosa con el fin de reducir la influencia de la tensión superficial durante el proceso de construcción facilitando la evacuación de la resina por rebose.

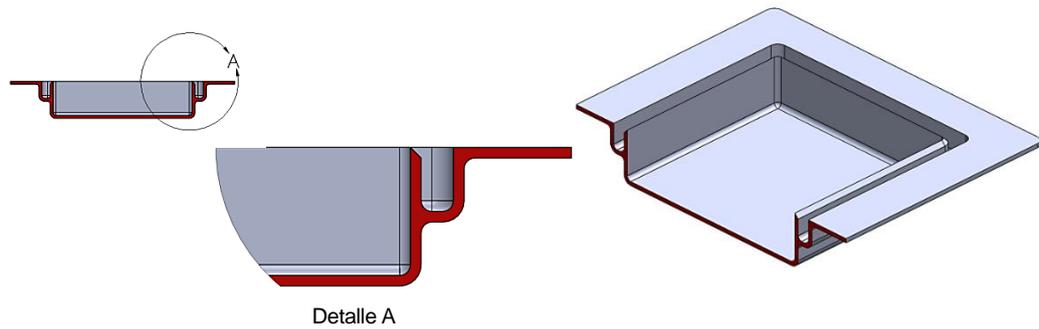


Figura 308: Imagen esquemática de la cuba o depósito de resina [Fuente: Elaboración propia].

Las columnas en las que sustenta el soporte de la plataforma de construcción por otro lado, al sumergir esta durante la impresión modifican el nivel de resina. Dicho incremento vertical teóricamente puede calcularse como:

$$A_{varillas} = 2 \frac{\pi \phi^2}{4} \rightarrow \Delta h_{resina} = \frac{A_{varillas}}{A_{depósito} - A_{varillas}}$$

De modo que, dado que las varillas son de 8 mm de diámetro y el depósito tiene unas dimensiones de 212,50x122,50 mm, el incremento del nivel de resina en el interior de la cuba es de 3,8769 μm por mm sumergido. A través del uso del Wiper dicho incremento en la altura de las capas se verá reducido tras su vertido en el canal que rodea a éste.

3.2.2.4. Wiper o nivelador.

El Wiper constituye un sistema activo que cumple dos funciones; en primer lugar, debido a que la plataforma de impresión se sumerge en la cuba de resina los pilares que soportan a ésta y lo vincula al eje Z, aumenta el nivel de la resina, así como también lo hace las aportaciones del sistema de bombeo. Por tanto, el Wiper, al ser un elemento móvil tiene la función de fomentar la evacuación de la resina en exceso dentro de la cuba, derramándola al canal que rodea a éste. En segundo lugar, el Wiper tiene la función de eliminar las posibles burbujas e imperfecciones superficiales que pueda ser aportadas a la pieza durante su construcción en la interface de la superficie libre de la cuba.

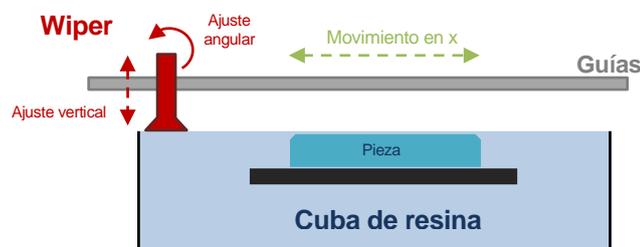


Figura 309: Esquema del nivelador o Wiper [Fuente: Elaboración propia].

El Wiper está constituido por múltiples piezas que en conjunto permiten dotar a la cuchilla (elemento en contacto con la pieza en construcción y la superficie libre de la resina) de tres

grados de libertad. Dos de ellos permiten el ajuste manual de su altura e inclinación a través de planos inclinados (ver Figura 310). Estos ajustes permiten garantizar el paralelismo entre la cuchilla y la superficie de la resina indistintamente de la inclinación de la máquina o de la plataforma de construcción. El tercer grado de libertad permite la traslación del Wiper a lo largo del depósito de resina fomentando la evacuación de la misma. Dicha traslación se lleva a cabo mediante un motor paso a paso ($0,9^\circ/\text{step}$) y una transmisión por correa dentada del tipo 2GT con sus correspondientes poleas, por otra parte dicho sistema móvil se encuentra guiado por un rail rectificado dispuesto en paralelo al depósito y asociado a con su correspondiente patín lineal de bolas. El sistema Wiper por otro lado se encuentra vinculado al elemento placa soporte depósito resina, afín de garantizar rigidez y precisión, y éste a su vez mantiene una unión rígida con la placa Z0 (elemento de referencia del equipo).

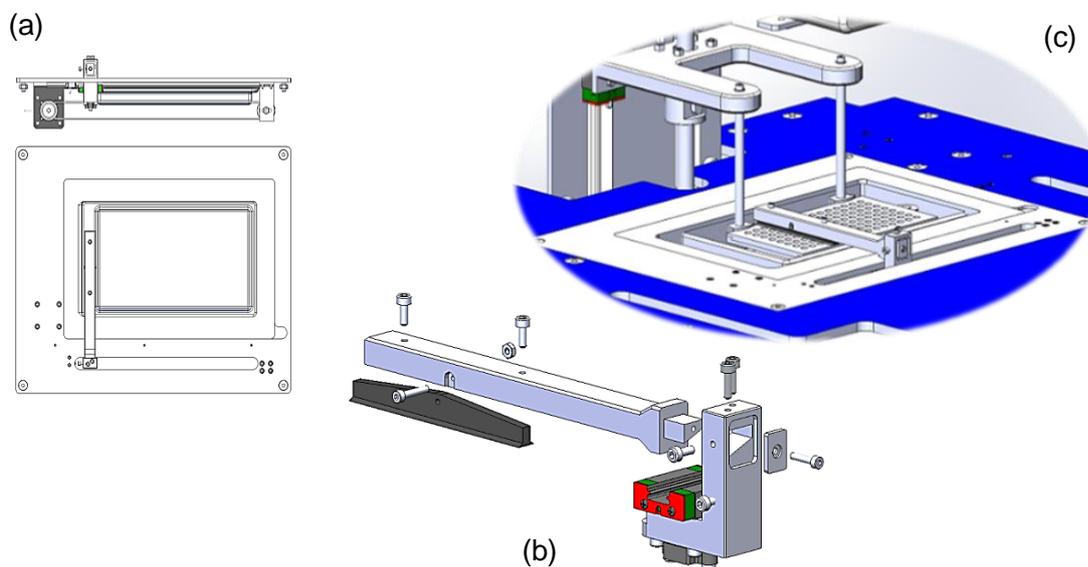


Figura 310: Vista en alzado y en planta del sistema activo nivelador o Wiper (a). Despiece y vista en detalle de los sistemas de ajuste del Wiper (aspecto clave para garantizar su correcto funcionamiento) (b). Integración del sistema de nivelación dentro de la placa soporte depósito de resina (c) [Fuente: Elaboración propia].

Finalmente, la integración de los distintos sistemas anteriormente descritos y que constituyen el equipo de impresión 3D por tecnología DLP de configuración Top-Down que integra al sistema híbrido de impresión multimaterial puede apreciarse en la imagen renderizada de a continuación (Figura 311). Estos sistemas, bajo una implementación secuenciada permiten reproducir a través de resinas y/o barbotinas fotosensibles geometrías tridimensionales a partir de un archivo digital.

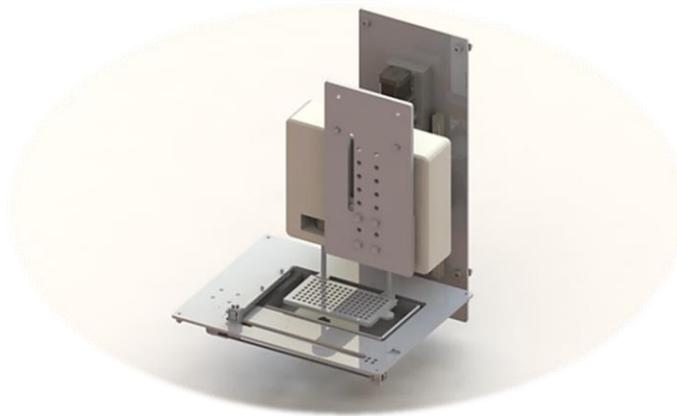


Figura 311: Vista renderizada de los distintos sistemas que constituyen al equipo de impresión 3D por tecnología DLP de configuración Top-Down que integran al sistema híbrido de impresión multimaterial [Fuente: Elaboración propia].

3.2.2.5. Estructura.

Como se ha podido apreciar en el boceto inicial, el equipo de impresión híbrido fue desde un inicio concebido como una máquina modular donde los distintos sistemas que lo constituyen debían ser de fácil acceso y por ser un prototipo ésta debía utilizar en la mayor medida posible elementos normalizados. Es por ello que en el diseño de la estructura se ha optado por utilizar perfiles de aluminio comerciales que mediante uniones rígidas aportan ligereza a la estructura facilitando su manipulación y transporte. Por otra parte, dicha estructura estará sometida a bajos esfuerzos, básicamente a su propio peso, y al de los componentes y materiales utilizados. Los efectos dinámicos por otra parte, en el comportamiento estructural se han considerado despreciables.

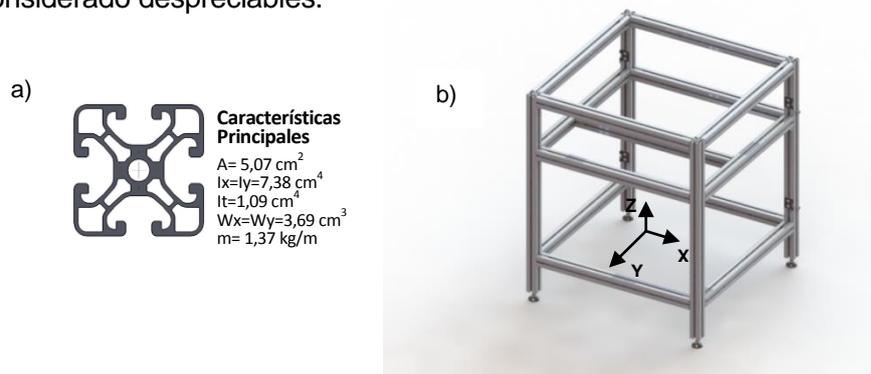


Figura 312: Vista en planta y algunas características del perfil de aluminio anodizado (Item 8 40x40 E) utilizado en la estructura (a), y disposición de éstos en el armazón que constituye a la estructura (b) [Fuente: Elaboración propia].

En las imágenes mostradas a través de la Figura 312 exponen las principales características de los perfiles utilizados: área (A), inercia a flexión (I_x , I_y), inercia a torsión (I_t), momentos resistentes a flexión (W_x , W_y) y peso propio lineal (m), así como también el diseño del armazón constituidos por la unión rígida de éstos perfiles, constituyendo un cubo de

680x680x780 mm, con un peso aproximado de 15 kg. Por otro lado, en ella se ha resaltado la orientación de la base fija de referencia en la integración de los distintos sistemas de impresión existente en éste equipo híbrido.

Es importante hacer un inciso y definir la placa Z0 ya que si bien la hemos nombrado anteriormente esta conforma la mesa de trabajo o el elemento de referencia en el eje Z (ahí su nombre). Ésta placa cumple una doble función por un lado constituye el nexo de unión entre la cuba, el sistema Wiper y el sistema Inkjet y por otro lado protege a los elementos de transmisión y accionamiento de las posibles salpicaduras de resina fotosensible.

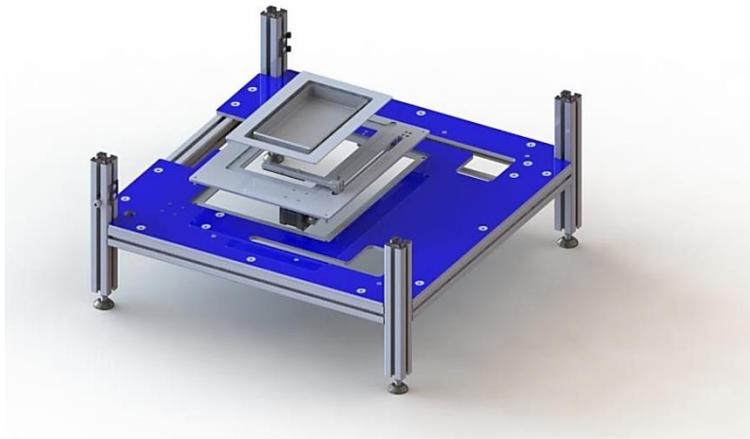


Figura 313: Superposición de la placa Z0 (en azul), la placa soporte del depósito de resina y de la cuba en (orden ascendente) [Fuente: Elaboración propia].

Como se puede apreciar en la representación esquemática anterior (Figura 313), el solapamiento de los distintos elementos sustentados en placas, permiten a través de la superposición de éstas generar una superficie plana y lisa que oculta y protege a los distintos elementos mecánicos de trasmisión, así como los de accionamiento, sensores de fines de carrera, etc. En este aspecto, la placa Z0 representada en azul, se encuentra unida de forma solidaria a la estructura mediante distintas uniones fijas aportando rigidez al conjunto. Ésta por otro lado, está dotada de dos regatas paralelas al eje Y por las que se desplaza la estructura móvil del sistema Inkjet.

La estructura finalmente se completa mediante la incorporación de la placa Z electrónica. Este elemento tiene como finalidad fijar al conjunto proyector sobre el armazón y alojar los distintos componentes electrónicos necesarios para el control de equipo (fuente de energía, pololus, microprocesadores, etc.) separados de los elementos mecánicos siendo éstos dispuestos en zona superior del equipo con el fin de facilitar el acceso a ellos. Por otro lado, la incorporación de esta nueva placa al conjunto también de aluminio y unida al armazón aporta, al igual que la anterior, mayor rigidez al conjunto.

El armazón, junto con las placas Z0 y Z electrónica, constituye la estructura del equipo de impresión híbrido multimaterial. Es importante resaltar que con el objetivo de garantizar la planitud y paralelismo entre dichas placas, éstas fueron analizadas por elementos finitos a

través del software ANSYS V15.0 teniendo en cuenta el peso propio de los elementos así como el peso de la barbotina de una densidad media de $3,5 \text{ gr/cm}^3$.

3.2.2.6. Proceso de impresión mediante la tecnología de DLP.

El control de los motores se realiza mediante una placa Arduino Due (microcontrolador 32-bits de capacidad y una velocidad de 84MHz) con 54 entradas/salidas digitales y 12 analógicas, junto con Pololus DRV 8825 como drivers de los motores con los cuales controlar los pasos de éstos a través de los flancos de subida de la señal de control.

El accionamiento del motor del eje Z se realiza a full step (pasos completos de $0,9^\circ$) afin de garantizar una mejor precisión en el posicionamiento de la plataforma de construcción, ya que si bien la activación de los motores en microstepping (Motor del Wiper, eje auxiliar X) permite disminuir el ángulo de los pasos, suavizando el desplazamiento y disminuyendo posibles vibraciones a bajas revoluciones, también reduce la velocidad del desplazamiento pudiendo inducir errores acumulativos en la posición al no ser estados de equilibrio propios del motor.

Como ya se ha comentado anteriormente (Capítulo 1), la superposición de imágenes de máscara proyectadas a través del chip DMD del sobre la superficie libre de las resinas líquidas coordinadas con el desplazamiento discreto de la plataforma de construcción en sentido vertical negativo previo al barrido del sistema nivelador o Wiper, produce la fotopolimerización selectiva de capas sólidas de espesor constante y en consecuencia tras repetir el proceso en bucle la reproducción de una estructura tridimensional deseada.

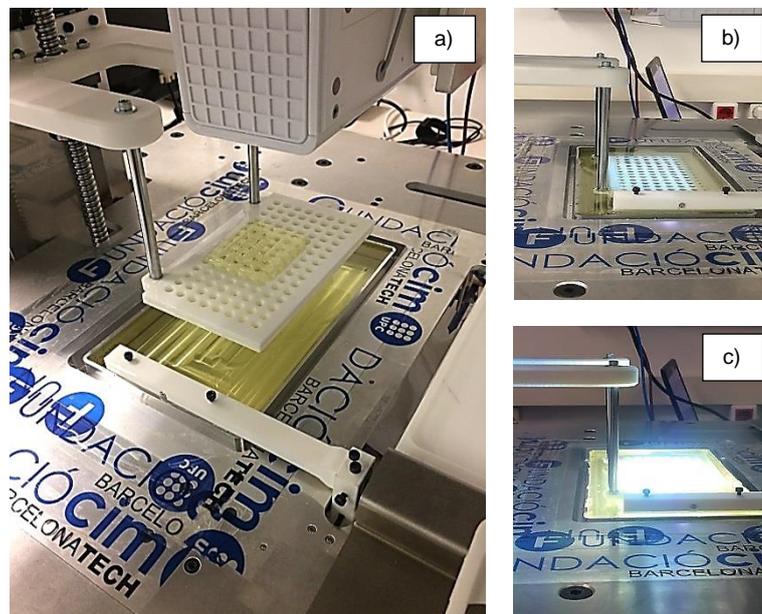


Figura 314: Imagen del sistema DLP del equipo híbrido multimaterial con piezas impresas por FDM, tras culminar la reproducción de una pieza de prueba (a). Inicio del barrido del Wiper durante el proceso de impresión (b) y proceso de fotopolimerización (c) [Fuente: Elaboración propia].

Por otra parte, previo dicho proceso de impresión, los archivos digitales (modelos CAD del elemento a reproducir) son tratados y subdivididos en una secuencia de imágenes bidimensionales, siendo el número de éstas función del espesor de las capas y la altura del elemento a reproducir, proceso que se realiza a partir de un archivo de extensión STL.

Los archivos o ficheros de extensión STL hacen referencia a Stereolithography aunque posteriormente se le han dado otros nombres como Standard Triangle Language. Fueron desarrollados originalmente por la empresa 3D Systems siendo extensamente para el prototipo rápido (RP). La fabricación aditiva (AM) y la fabricación asistida por computadora (CAM). Los archivos CAD son transformados en archivos STL los cuales sólo describen la geometría de la superficie de un objeto tridimensional sin ninguna representación de color, textura, material u otros atributos comunes del modelo CAD.

Existen dos formatos para los documentos STL, los de texto (también llamados ASCII STL, por el nombre del formato de texto usado) y los binarios. Aunque los primeros casi no se usan, por ocupar mucho más espacio que los segundos, sin hacer grandes aportaciones, aunque resultan muy prácticos a la hora de entenderlos.

Los documentos STL básicamente están formados por una estructura que define (a través de un encabezado inicial) el nombre del sólido y el número de triángulos existentes, para posteriormente se listar la ubicación de los puntos que constituyen las aristas o vértices que conforman a los triángulos (elemento discretizador). A través de cada grupo de tres vértices precedido por un vector que indica la normal de dicho triángulo y calculado mediante la numeración de los vértices y la regla de la mano derecha, define a su vez cual es la cara exterior de dicha superficie triangular y mediante a unión de éstas una superficie u geometría tridimensional (ver Figura 315).

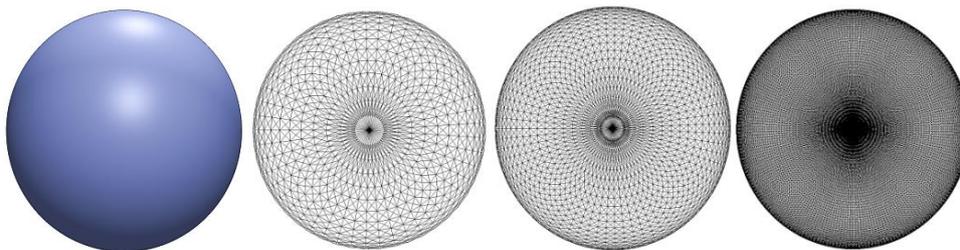


Figura 315: Representación de una esfera de forma vectorial (CAD) y discretización del mismo a través de un mallado triangular con distintas resoluciones [Fuente: Elaboración propia].

Como se puede apreciar en las imágenes mostradas en la figura anterior, la fidelidad la reproducción dependerá del grado en el que esta se encuentre definida aunque en este caso las dimensiones del archivo pueden aumentar con gran facilidad más no en la misma proporción su definición, en este aspecto la idea de traer a colación un diagrama de Pareto podría aportar claridad a dicha fenomenología evidenciándose la necesidad

de establecer una relación de compromiso entre el número de elementos necesarios (tamaño del archivo) y resolución deseada. Por otro lado, cabe destacar que los softwares actuales permiten la utilización de elementos triangulares variables afín de reducir el número de estos en la definición de una geometría compleja.

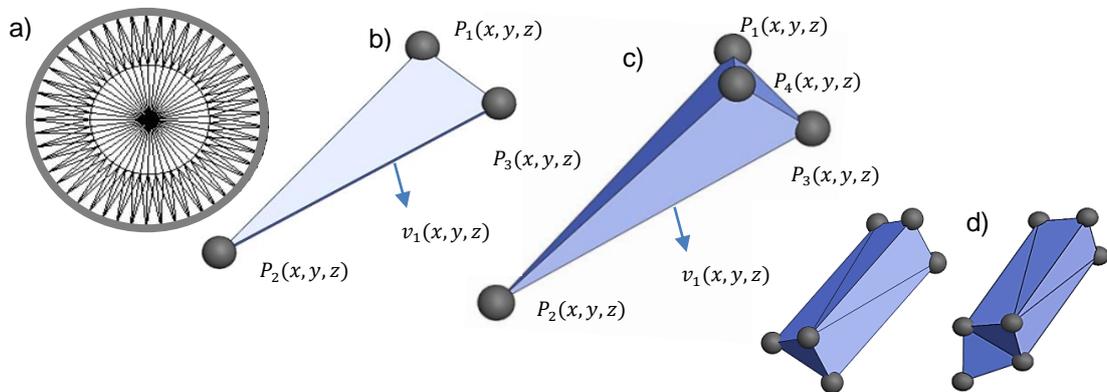


Figura 316: Vista en planta de la esfera anterior seccionada a una cota vertical próxima al extremo superior de dicha geometría a una resolución baja (a), representación esquemática de la superficie triangular a partir de sus vértices (b) y representación de un tetraedro (elemento discreto tridimensional) a partir de la combinación de cuatro caras con vértices comunes (c), finalmente mediante la asociación de tetraedros, dos geometrías cualesquiera (d) [Fuente: Elaboración propia].

De modo que, mediante la asociación de superficies triangulares a través de vértices comunes donde la cara exterior de éstas han sido identificados previamente, es posible definir a través de un sistema binario la geometría del objeto a reproducir a partir de un archivo CAD referenciado a una base fija (ver Figura 316).

Por otra parte, los archivos STL solo describen la información de la geometría del objeto tridimensional, obviando la información de otros atributos afín de reducir el tamaño de los archivos y de esta forma requerir menos recursos en el procesamiento, transmisión y almacenamiento de éstos. Finalmente, la generación de un archivo STL, puede ser llevado a cabo no solo a partir de un archivo CAD sino también a partir del tratamiento de una nube de puntos (proceso utilizado en la ingeniería inversa).

El proceso de rebanar una geometría tridimensional definida por un archivo STL se realiza a través de un software propio, implementado a través de la herramienta de matemática MATLAB. Dicho programa al cual hemos llamado Slicer se fundamenta en el establecimiento de un volumen cuadrado cuya superficie en planta se ve delimitada por el área de proyección (superficie máxima abarcada por el proyector), éste a su vez subdividido en vóxeles cuyas dimensiones vienen impuestas por la resolución del proyector (el número de píxeles definirán las dimensiones de los mismos) y por la altura de capa que se desea reproducir (Saltos discretos del eje Z).

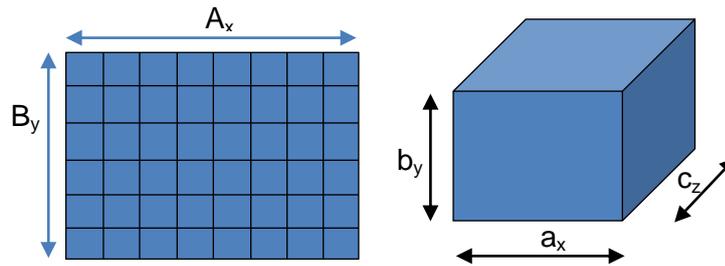


Figura 317: Representación esquemática del área de impresión pixelizada en función de la resolución del proyector (a) y su equivalente tridimensional a través de la voxelización del dominio de impresión, dimensiones del vóxel (b) [Fuente: Elaboración propia].

Tras definir el tamaño de los píxeles (área de proyección/número de píxeles) y la altura de las capas, el objeto tridimensional definido a través de un archivo STL y en consecuencia a través un conjunto de puntos numerados y vectores, es ubicado en el interior del dominio constituido por la agrupación de vóxeles cúbicos (ver Figura 317). Una vez centrado el objeto a reproducir, la arista de menor cota vertical se ubica sobre el plano X-Y o lo que es lo mismo sobre la plataforma de construcción y posteriormente se procede a una pixelización de la imagen en planta del objeto seccionado a distintas cotas verticales equiespaciadas.

De modo que, dicha discretización se lleva a cabo bajo el principio establecido en el capítulo 1, si bien un camino puede definirse como una sucesión de elementos discretos en donde en su interior de cada elemento contienen al menos dos puntos comunes a camino a reproducir. En nuestro caso, tomando como ejemplo una estructura cristalina cúbica centrada en el cuerpo (BBC), si el punto central del vóxel pertenece al dominio descrito por el objeto, entonces dicho elemento (pixel desde el punto de vista del proyector) existe, luego ha de mantenerse activo o iluminado y por lo tanto en binario representará un 1.

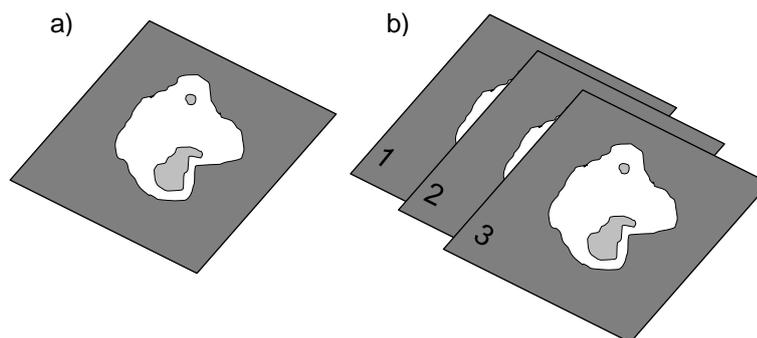


Figura 318: Representación esquemática de una imagen bidimensional pixelada proyectada a máxima intensidad sin graduaciones cromáticas (a) y tras la superposición de éstas secuenciadas el equivalente a elemento tridimensional (b) [Fuente: Elaboración propia].

De manera que, tras generar un archivo CAD y convertirlo en STL el algoritmo Slicer implementado a través de la herramienta matemática MATLAB, discretiza la geometría de previamente definida por el archivo STL en un conjunto de imágenes. Imágenes que tras ser

secuenciadas se envían por un puerto HDMI (High-Definition Multimedia Interface) a un proyector, el cual emite las imágenes sobre la superficie libre de la cuba donde se encuentra sumergida la plataforma de construcción. La secuenciación entre las imágenes y la inmersión de la plataforma permiten la reproducción del objeto. Por tanto, en dicho proceso se requiere la coordinación del desplazamiento discreto de la plataforma de construcción a través del control eje Z junto con el barrido del Wiper y la proyección de las imágenes durante un tiempo preestablecido. La generación de dicha secuencia en bucle se controla a través del microcontrolador Arduino Due.

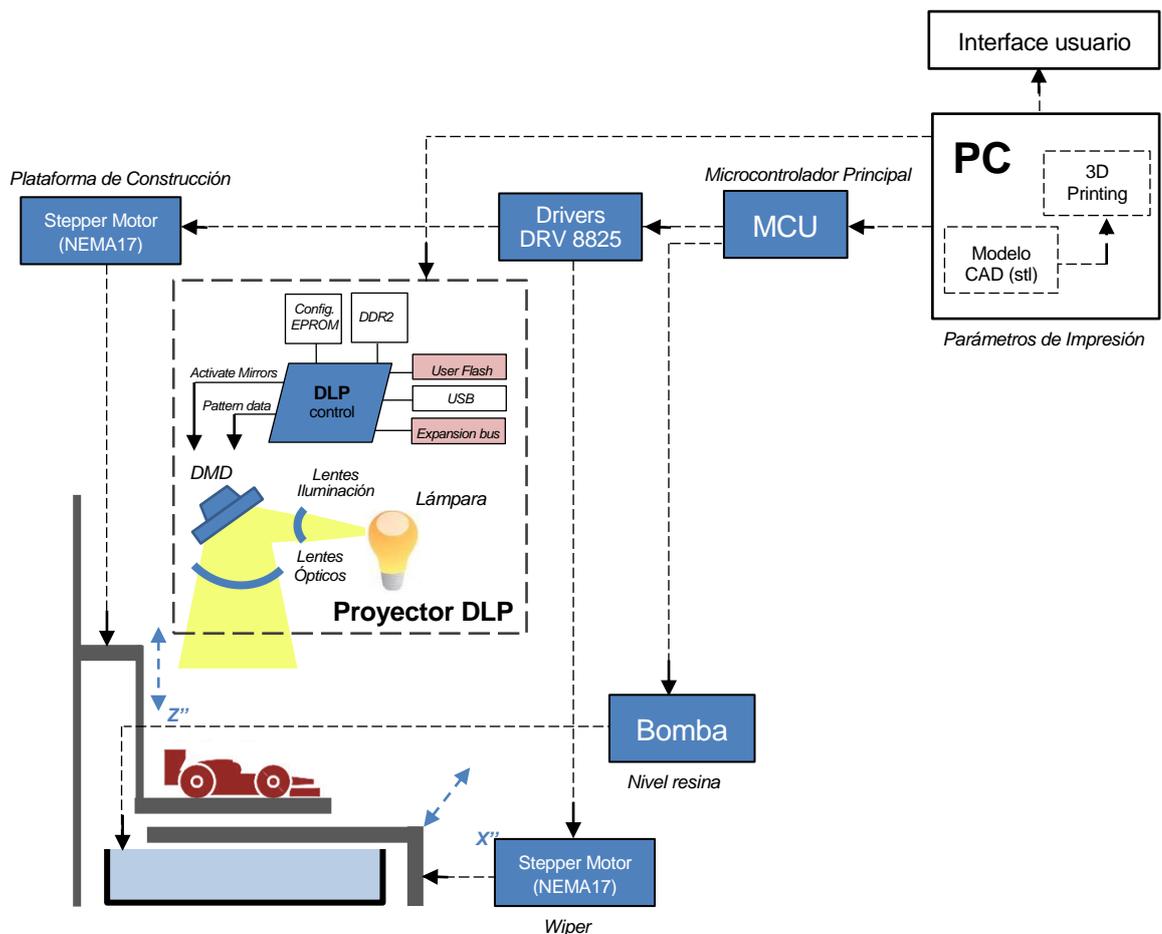


Figura 319: Diagrama del sistema de impresión por DLP desarrollado para el equipo de impresión híbrido multimaterial [Fuente: Elaboración propia].

3.2.2.7. Fotopolimerización.

La polimerización es una reacción química por la cual los reactivos, monómeros (compuestos de bajo peso molecular), forman enlaces químicos entre sí, para dar lugar a una molécula de gran peso molecular (macromolécula), ya sea esta de cadena lineal o de estructura tridimensional, denominada polímero. Cuando esta reacción química no se realiza por calor o por la acción de un agente químico sino a través un iniciador fotosensible, se dice que nos encontramos ante un fotopolímero. En este caso, la polimerización se lleva a

cabo a través de los fotoiniciadores sensibles a longitudes de onda específicas del espectro electromagnético, en el caso que nos ocupa sensibles al espectro visible ($400 < \lambda < 700$ nm), convirtiendo la energía física de la luz en energía química, formando reactivos intermedios que darán origen a las cadenas poliméricas y en consecuencia a la fotopolimerización del mismo, habiendo una diferenciación física entre las zonas expuestas a la luz y las no expuestas.

De modo que, si un polímero se constituye por macromoléculas producto de la unión de mucho monómeros pudiendo ser estos de un tipo o de varios, la fotopolimerización de una resina consiste en la unión de los oligómeros y monómeros que lo constituyen en una matriz polimérica tras ser expuesto a una radiación lumínica. Al material constituido por dos o más monómeros diferentes se le conoce como copolímero y sus propiedades físicas están condicionadas tanto por éstos como por las uniones que establece [17].

Por otra parte, puesto que el desencadenante de dicha reacción físico-química que experimentan las resinas durante el proceso de reproducción de los objetos tridimensionales es la luz, es necesario abordar algunas de sus características.

Llamamos luz a una zona del campo de la radiación electromagnética que puede ser percibida por el ojo humano, es decir desde los 400 nm hasta los 700 nm de longitud de onda aproximadamente, o desde el violeta hasta el rojo. Es importante resaltar que cada color que percibimos del espectro electromagnético, equivale a una longitud de onda particular y que luz blanca equivale a la superposición de todos los colores. Por tanto, interpretando a la luz como una energía radiante transportada por fotones y transmitida por un campo ondulatorio cuya velocidad de propagación varía en función de las propiedades del medio, es el flujo luminoso (parte de la energía radiante emitida por la lámpara del proyector por unidad de tiempo) es el parámetro que definirá el grado de polimerización de las resinas fotosensibles condicionando el proceso de impresión.

A la energía radiante emitida por la lámpara del proyector y redireccionada por los microespejos del mismo sobre la cuba de resina por unidad de tiempo, se le conoce como potencia radiante o flujo radiante, y debido a que solo una pequeña proporción de esta potencia radiante se encuentra dentro del espectro de la sensibilidad del fotoiniciador (espectro visible) a ésta se le conoce como flujo luminoso (F). Dicho flujo luminoso es el desencadenante de la fotopolimerización y su magnitud en unidades del sistema internacional es el Lumen (lm).

El lux por otro lado, como unidad fotométrica toma en cuenta la superficie sobre la que el flujo luminoso se distribuye ($\text{lux} = \text{lm}/\text{m}^2$) esta unidad define la iluminancia o nivel de iluminación. Su correspondiente unidad radiométrica que mide o define su irradiancia (Potencia física) es el W/m^2 . El factor de conversión por otra parte, que relaciona a las unidades fotométricas (lux) con las unidades radiométricas (W/m^2) es diferente para cada

longitud de onda por lo que no es posible realizar dicha conversión a menos que se conozca la composición espectral de la luz emitida (ver Figura 304), es decir:

$$F = 683,002 \int_{\lambda_{visible}} \Phi(\lambda) V(\lambda) d\lambda \quad 2.1$$

Donde F es el flujo luminoso y Φ , V representan la potencia radiante espectral y la sensibilidad luminosa en función de la longitud de onda de λ . En el caso de utilizar luz monocromática de una longitud de onda de 555 nm (correspondiente al color verde, máxima sensibilidad del ojo humano) la irradiancia necesaria para producir un lux es de 1,464 mW/m² o lo que es lo mismo, la máxima iluminancia lámpara del proyector emite 683,002 Lúmenes por watio a esta longitud de onda.

De forma que, en una luz blanca constituida principalmente por una combinación de luz verde con abundancia de luz roja y azul menos sensible al ojo humano (sistemas RGB, nuestro caso particular), implica una relación de lúmenes por watio inferior a los 683,002 lm/W anteriores. Por lo general y en el caso de la lámpara OSRAM utilizada por el proyector empleado, ronda el 2% de eficiencia luminosa, relación a través de la cual establecemos la energía luminosa máxima percibida por la resina y capaz de irradiar la lámpara del proyector por unidad de tiempo.

En el equipo Nhibrid32D el proyector utilizado (ACER H6510BD) ofrece un flujo luminoso máximo de 3000 lúmenes y en las condiciones de impresión se ha considerado que dicho proyector emite una potencia lumínica útil por unidad de superficie a máxima intensidad de 52 mW/cm². Esto significa que, a una distancia de la superficie del depósito de resina de 150 mm y considerando a la imagen proyectada como monocromática la cual a través del semiconductor óptico DMD del proyector las imágenes pixeladas de 122,5 mm de ancho máximo con una relación de aspecto de 9:16 y en escala de grises con una profundidad de color de 2⁸, las imágenes son emitidas a máxima intensidad en dicha escala de 0 a 255.

Así pues, el desencadenante de la reacción físico-química que experimenta las resinas y que permite la reproducción de objetos tridimensionales mediante la superposición de capas polimerizadas en un sistema DLP es la luz. Desde un punto de vista lumínico, los parámetros que estrictamente entran en juego en la fotopolimerización de las resinas son; el flujo luminoso, la intensidad de éste y el tiempo de emisión. En este aspecto a continuación se aborda de forma superficial la modelización de dicho fenómeno en el cual se sustenta el control del sistema de impresión DLP del equipo Nhibrid32D.

3.2.2.7.1. Modelización del grado de conversión por fotopolimerización.

Desde el momento en el que la luz entra en contacto y penetra en la resina líquida, ésta por su carácter fotosensible comienza a experimentar cambios físicos y químicos. Los fotoiniciadores son los encargados de iniciar dicha transformación, la cual evoluciona con el

tiempo de exposición hasta llegar a un valor crítico a partir del cual los monómeros inician el proceso de polimerización. Desde este momento y hasta que la exposición a la radiación se detenga, se desarrolla la etapa denominada propagación, en donde los monómeros y oligómeros siguiendo la dirección de la energía recibida establecen uniones estabilizando las macromoléculas. A éste proceso se le conoce como foto-polimerización frontal (FPP) [18] y es el causante de altas velocidades de polimerización de forma focalizada permitiendo la reproducción de capas de forma precisa y en consecuencia la reproducción de objetos tridimensionales.

Como ya se ha comentado, en el presente proceso de impresión tridimensional el espesor de las capas polimerizadas viene definido por la magnitud del desplazamiento vertical de la plataforma de construcción al sumergirse en la cuba de resina. Pero, es importante resaltar que ante un sistema no limitado por una barrera física como es la plataforma, el espesor de la capa polimerizada se extiende hasta un valor definido por las propiedades del material y las condiciones de impresión (energía recibida). En este aspecto y haciendo uso del modelo desarrollado por Cabral et al.[18] en el cual se describe la evolución del proceso de fotopolimerización a partir del grado de conversión al que se encuentra el material $\phi(z, t)$, el cual es proporcional a la intensidad lumínica que recibe $I(z, t)$ [J/m^2] y del material en sí, a través de su tasa de conversión $K[\text{m}^2/\text{Js}]$, es posible expresar la evolución de la fotopolimerización de un medio se define como:

$$\frac{\partial \phi(z, t)}{\partial t} = K[1 - \phi(z, t)]I(z, t) \quad 2.2$$

Donde el termino $[1 - \phi(z, t)]$ define la cantidad de resina que queda por polimerizar, es decir, una vez iniciado el proceso de polimerización se considera a este como un sistema de dos componentes con distintos coeficientes de atenuación, siendo μ_0 el coeficiente de atenuación para la resina sin convertir y μ_∞ para la resina 100% convertida o completamente polimerizada, de manera que el coeficiente de atenuación puede ser promediado en función de la posición y el tiempo de exposición como:

$$\mu(z, t) = \mu_0[1 - \phi(z, t)] + \mu_\infty \phi(z, t) \quad 2.3$$

Donde $\mu(z, t)$ representa la transmisión o evolución del perfil de intensidad lumínica que a su vez puede definirse como:

$$\frac{\partial I(z, t)}{\partial z} = -\mu(z, t)I(z, t) \quad 2.4$$

Finalmente, cabe destacar la existencia de un grado de conversión crítico ϕ_c a partir del cual la resina irradiada pasa de un estado gelatinoso a un estado sólido, dicho punto crítico establece el frente de conversión, el cual como se ha podido observar evoluciona en el espacio y en el tiempo. La evolución de dicho frente de conversión en dirección normal a la superficie libre del depósito puede modelizarse haciendo uso del sistema de ecuaciones

diferenciales constituido por las expresiones 2. 2 y 2. 4. Sin embargo se ha de resaltar que considerando la atenuación como constante y por tanto: $I(z) = I_0 e^{-\mu z}$ en esta modelización se desprecia la existencia e interacción de los distintos elementos que constituyen a las resinas fotosensibles como son: la presencia de aditivos, impurezas, pigmentos y/o partículas de cualquier tipo. Además, alguno de estos elementos pueden formarse durante el proceso de fotopolimerización haciendo del mismo, un proceso más simple que requiere de la experimentación para ajustar los parámetros del modelo.

Bajo la hipótesis donde $\mu_0 = \mu_\infty > 0$ (modelo foto-invariante) y conocidas las características del material y de la lámpara del proyector, la evolución del frente de conversión puede aproximarse a:

$$\phi(z, t) = 1 - e^{-K(I_0 e^{-\mu z})t} \quad 2.5$$

De manera que, a través de la expresión anterior es posible modelizar el desplazamiento del espesor de resina curada en el interior de la cuba, tras superarse el límite crítico y como consecuencia de la exposición de la misma a una intensidad lumínica I_0 durante un tiempo t y donde los valores de μ y K al ser propios del material son obtenidos bajo experimentación ($\mu = 0,6643 \text{ mm}^{-1}$ $K = 0,002 \text{ m}^2/\text{Js}$ para la resina base empleada sin pigmentos, y $\mu = 2,733 \text{ mm}^{-1}$ $K = 0,0052 \text{ m}^2/\text{Js}$ con pigmentos al 2%).

El proceso de impresión por tanto, se lleva a cabo como un proceso iterativo en donde, conocida la evolución del frente de polimerización, es posible establecer las condiciones necesarias para que la capa j de espesor constante polimerice tras verse expuesta a una intensidad lumínica durante un tiempo dado. De forma que, afín de reproducir una geometría tridimensional es necesaria la coordinación del desplazamiento discreto de la plataforma de construcción y la energía emitida a través de las imágenes proyectadas por proyector. En este aspecto, la profundidad de curado viene definido a raíz de la expresión anterior como:

$$Z_f = \frac{\ln(t/\tau)}{\mu} ; \quad \tau = \frac{\ln\left(\frac{1}{1-\phi_c}\right)}{KI_0} \quad 2.6$$

Si bien otros autores han tenido en cuenta los efectos térmicos de la reacción exotérmica de la polimerización [19] así como también el efecto inhibitorio que produce el oxígeno del aire sobre la superficie libre de la resina durante la polimerización de la misma [20], en esta modelización dichos efectos sean obviado.

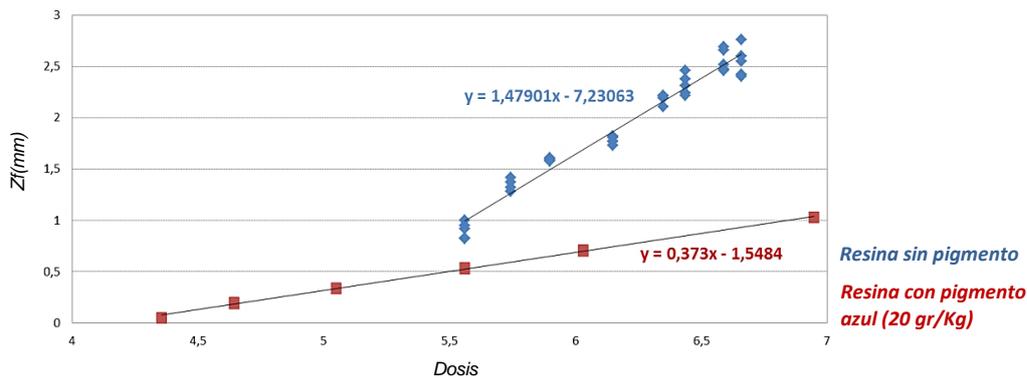


Figura 320: Profundidad de curado en función de la dosis recibida siendo dosis $d = I_0 t$ para una resina con y sin pigmento [21].

A través de la Figura 320 se puede apreciar la dosis mínima requerida (d_c) para que la resina supere el grado de conversión crítico y solidifique. Por otra parte, dicho grado de conversión crítico se obtuvo mediante un análisis de espectrometría infrarroja con transformada de Fourier (FTIR) estableciéndose a: $\phi_c = 0.3$ para la resina base empleada en la mayoría de las pruebas la SPOT-HT de spot-A materials. Por otra parte, se puede apreciar como la presencia de pigmentos al 2% de concentración en peso reduce la profundidad de curado al modificar los parámetros del material (μ, K) lo cual se traduce en un aumento de la capacidad del equipo, es decir, en su resolución.

Por último, cabe destacar la heterogeneidad del grado de conversión de una pieza constituida por un conjunto de capas superpuestas ya que por ser la impresión DLP un proceso de fotopolimerización frontal, las capas iniciales reciben más dosis energéticas que las últimas capas y por tanto en un sistema con atenuación invariante estas últimas presentan una polimerización inferior a las iniciales, es decir:

$$\Delta d_j = d_0 e^{-\mu \Delta z_j} \quad 2.7$$

Por tanto el acumulado de dosis en las capas iniciales es muy superior a las finales (ver esquema de la Figura 321) dicho fenómeno sin embargo no tiene una gran influencia en aquellos casos donde el coeficiente de atenuación μ sea grande por ejemplo cuando las resinas son fuertemente aditivadas.

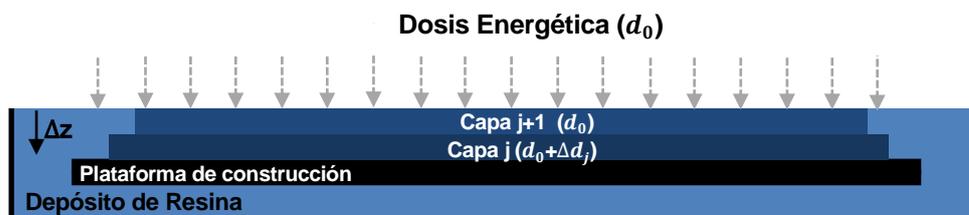


Figura 321: Representación esquemática del proceso de reproducción de objetos tridimensionales a través de un proceso de impresión 3D basada en la fotopolimerización frontal con bajos coeficientes invariantes de atenuación [Fuente: Elaboración propia].

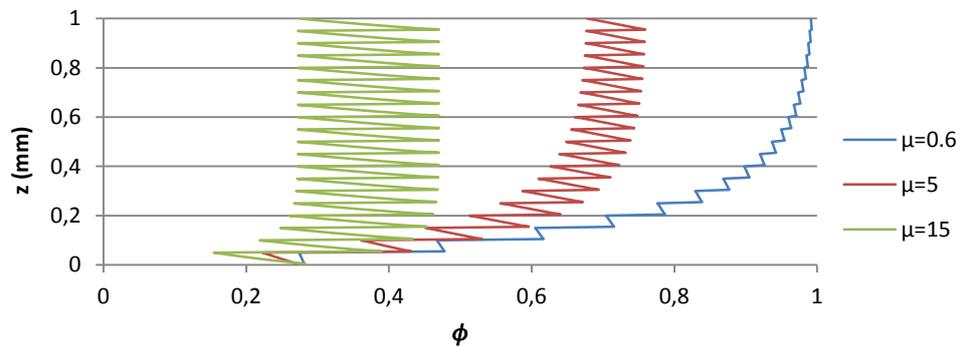


Figura 322: Grado de conversión teórico en capas de 50 μm con distintos coeficientes de atenuación [Fuente: Elaboración propia].

A través del gráfico mostrado en la Figura 322 se puede observar el grado de conversión teórico de una pieza de 1 mm de altura impresa con capas de 50 μm de espesor. Es decir, muestra la evolución del grado de polimerización teniendo en cuenta la profundidad de curado a unas condiciones de impresión constante (energía y tiempo) y en función de las características del material (atenuación y tasa de conversión).

Como puede apreciarse, mientras mayor sea el grado de atenuación de la resina (μ) mayor es el gradiente interno de polimerización en cada capa j (lo que da origen propiedades mecánicas resistentes diferentes en función de z , a contracciones irregulares y un perfil de la pieza irregular a escala microscópica si la viésemos lateralmente), pero a su vez, fruto de ésta atenuación, la dosis energética acumulada que reciben las capas iniciales es menor que en aquellos casos donde la atenuación posea una menor magnitud y en cuyo caso al ser la penetración de la luz mayor la capacidad del equipo en cuanto a resolución vertical es menor.

3.2.2.8. Reproducción de piezas tridimensionales en verde y sinterización.

Las técnicas de fabricación aditiva desde sus inicios se han utilizado con éxito en la reproducción de prototipos cuyas complejas geometrías cumplen una función estructural, sin embargo, a menudo las limitaciones impuestas por los materiales imprimibles imposibilitan que dichos objetos reproducidos cumplan con las solicitaciones mecánicas de un producto final. Es por ello que afín de generar un elemento más resistente y/o con propiedades más acordes a su funcionalidad, en el proyecto de investigación Nhibrid32D no solo se buscó reproducir geometrías tridimensionales con circuitos electrónicos, sino que también se buscó dotar a dichas estructuras tridimensionales de nuevas propiedades físicas optando por cargar a las resinas fotosensibles de partículas como por ejemplo de cerámicas o metálicas. En este aspecto, la reproducción de las geometrías tridimensionales se llevan a cabo en verde, es decir, en donde las resinas generan una matriz polimérica que aglutina las

partículas que tras un ciclo térmico se sinterizan generando una estructura cerámica monolítica rígida impresa tridimensionalmente.

3.2.2.8.1. Resinas fotosensibles

Como hemos visto en la impresión tridimensional por DLP las imágenes de máscara procedentes del proyector se proyectan sobre una resina que constitutivamente están compuestas por: fotoiniciadores, monómeros y bloqueadores.

Los fotoiniciadores, sensibles a longitudes de onda específicas del espectro electromagnético, convierten la energía física de la luz en energía química en la forma de reactivos intermedios, estas especies o radicales libres interactúan con los enlaces acrílicos o especies catiónicas reactivas iniciado la polimerización en las moléculas epoxi. En este aspecto, la formulación de las resinas determina las propiedades de las piezas a reproducir y condicionan el proceso de reproducción existiendo una fuerte relación entre el espesor de las capas y la composición de las resinas. Cuanto más bloqueador, mayor atenuación (μ) y capas más delgadas pueden ser construidas, lo que aumenta la capacidad resolutive del sistema. Cuanto más iniciador, más rápida es la reacción (K), menor es el tiempo de exposición y más rápida la fabricación del objeto, pero cuanto menor sea el peso molecular, menor será la densidad de reticulación y las propiedades mecánicas de la pieza reproducida.

Por otra parte, hay otros aspectos que influyen en el proceso de fotopolimerización y en consecuencia en la reproducción del objeto tridimensional. Por ejemplo, la resolución del proyector y el tamaño de la imagen proyectada (función de la lejanía del proyector) definen la exactitud y la fidelidad de las capas bidimensionales del objeto impreso (plano X-Y), aunque el encogimiento durante la polimerización puede causar una cierta imprecisión. Dado que el índice de refracción de un sistema de lentes es dependiente de la longitud de onda, el enfoque diferirá para las longitudes de onda inferiores y para las superiores, por lo tanto, cuanto más monocromática sea la luz, mejor será el enfoque. La proyección de luz monocromática a la longitud de onda del pico de absorción del fotoiniciador optimizará la intensidad lumínica emitida por el proyector y transferirá una menor cantidad de esa energía en forma de calor debido a la absorbancia de pigmentos y bloqueadores. La luz bloqueada se convierte directamente en calor, además de ser la reacción de fotopolimerización ya de por sí, exotérmica. De modo que la temperatura del proceso también juega un papel importante, cuanto mayor sea ésta, mayor es la tasa de polimerización, pero también mayor es la cantidad de contracción. La influencia de la temperatura es mucho más fuerte que la influencia de la concentración del fotoiniciador [22]. Para aplicaciones de impresión tridimensional, el encogimiento es indeseado, por lo que la temperatura de la resina y la concentración del fotoiniciador no deben ser demasiado altas. Finalmente el oxígeno puede inhibir la fotorreacción ya que consume radicales libres [23]. La presencia en la atmosfera de éste y en contacto con la superficie libre de la resina en configuraciones top-down como es

nuestro caso influye en función de los monómeros acrílicos utilizados en el proceso de reproducción [24] prolongando los tiempos de exposición requeridos para alcanzar una conversión completa de la resina.

De modo que, aunque la gama de resinas comercialmente disponibles es muy amplia, todas ellas fundamentalmente están constituidas por monómeros y oligómeros, un fotoiniciador a menudo múltiples de ellos mezclados afín de ofrecer una gama más amplia de longitudes de ondas y un elemento bloqueador. La fotopolimerización por otro lado, se lleva a cabo a través de dos mecanismos de polimerización o de entrecruzamiento: por radicales libres y por especies catiónicas. Como se ha comentado anteriormente, la primera se lleva a cabo en acrilatos y poliésteres insaturados, y la última en resinas epoxi y vinil éteres.

En la impresión tridimensional se emplean resinas a base de epoxis y acrilatos. Las primeras tienden a ser más precisas y resistentes que las conformadas con los acrilatos, pero son a su vez más frágiles, es por ello que en las formulaciones de éstas suelen recurrir a la adición de las segundas. Además, se diferencian en la contracción y en las velocidades de polimerización siendo las resinas epoxis las que presentan una menor contracción y a su vez una menor velocidad de polimerización.

De mera que, la fotopolimerización, se desarrolla como una polimerización térmica con la particularidad de ofrecer una alta tasa de polimerización a velocidades muy elevadas logrando un cambio de fase de líquido a sólido en segundos de forma localizada, es decir, allí donde reciba la radiación lumínica y por tanto con una alta resolución espacial. A través de la adición de distintos elementos y por tanto a través de la modificación de su formulación, es posible dotar a los materiales con los cuales se reproduce la estructura tridimensional y en consecuencia al objeto, de propiedades diseñadas a medida, lógicamente dentro de unas limitaciones (Ver Figura 323).



Figura 323: Representación conceptual de probetas reproducidas a través de resinas acrílicas que junto con los bloqueadores han sido aditivadas con distintos pigmentos,

evidenciado la posibilidad de dotar al objeto reproducido de atributos ópticos como coloración y la opacidad [Fuente: Elaboración propia].

Los bloqueadores por otro lado, son los encargados de bloquear el paso de la luz. Sin la presencia de estos elementos inhibidores, la luz penetraría libremente a través de la resina llegando a polimerizar profundidades muy elevadas. Ya sean por absorción o por refracción (cambio en la dirección y velocidad de la luz al atravesar distintos medios) estos aditivos permiten la reproducción de capas de pequeños espesores al regular la penetración de la luz y por tanto la impresión de una estructura tridimensional.

Es importante resaltar que la refracción produce a su vez la dispersión de la luz y en consecuencia reduce la capacidad de impresión al disminuir la resolución en el plano XY. En el caso más extremo, el bloqueo de la luz por otro lado, generaría calor y en consecuencia fomentaría la polimerización por calor y la contracción excesiva de las capas. Por otra parte, al igual que los fotoiniciadores, los bloqueadores presentan una curva de absorción en función del espectro de la energía irradiada presentado un pico de máxima absorción, el uso de una luz monocromática dentro del espectro de máxima absorción permitiría reducir la presencia de estos dentro de la formulación de las resinas. Por último, los pigmentos como los representados en la figura anterior permiten dotar a las resinas de distintos colores en diferentes tonalidades aunque a su vez cumple la función de bloqueadores, de modo que mediante la graduación estos junto con los inhibidores las resinas inicialmente translúcidas pueden ser opacadas y coloreadas (ver Figura 324).



Figura 324: *Representación conceptual de las probetas anteriores reproducidas a través de resinas acrílicas translúcidas ligeramente pigmentadas [Fuente: Elaboración propia].*

3.2.2.8.2. Resinas cargadas de partículas cerámicas (barbotinas o slurries).

Además de los fotoiniciadores, monómeros y bloqueadores que fundamentalmente constituyen las resinas acrílicas empleadas, como ya se ha comentado afín de aumentar las propiedades físicas de las piezas impresas, éstas han sido cargadas con distintas partículas generando una barbotina fotosensible con las que generar geometrías tridimensionales en verde.

Las cerámicas se consideran a menudo como uno de los materiales del futuro debido a sus excelentes propiedades: alta resistencia a la temperatura, corrosión, al desgaste, elevada

densidad y dureza, baja dilatación térmica, excelente biocompatibilidad, propiedades aislantes eléctricas y térmicas, etc. Estas propiedades hacen de estos materiales una fuente constante investigación cuyas aplicaciones crecen en variedad e importancia. Si bien la utilización de cerámicas en sistemas de impresión tridimensionales no son una novedad existiendo múltiples precedentes en sistemas de microestrusión, o adaptaciones de sistemas de tape casting con estereolitografía, incluso recientemente la spin-off de la universidad tecnológica de Viena LITHOZ ha comenzado a comercializar un sistema por DLP. En el presente caso al ser un sistema híbrido que difiere en múltiples aspectos de éste último, la posibilidad de combinar un sistema Inkjet en un mismo dispositivo aporta una gran versatilidad al equipo.

Por estos motivos, las resinas fotosensibles han sido aditivadas o cargadas con partículas inicialmente cerámicas. Desde un punto de vista constructivo, como puede apreciarse en el capítulo 4, distintas barbotinas y formulaciones fueron desarrolladas con el objetivo de obtener estructuras tridimensionales monolíticas tras un proceso térmico. De modo que ahora, el proceso de reproducción de las piezas está constituido por dos fases: una primera fase de impresión tridimensional y una segunda fase de sinterización.

En cuanto a la primera fase, la cual tiene lugar en el equipo Nhibrid32D, la inclusión de las partículas cerámicas en la resina incrementa la densidad y viscosidad de la sustancia fotosensible. El incremento de esta última propiedad pese al uso de dispersantes, dificulta la reproducción de superficies planas, así como también la evacuación de la misma en un paso previo a la deposición de las tintas a través del sistema Inkjet. Por otra parte, pese a que la profundidad de curado se reduce drásticamente, ya que las partículas o granos de cerámica incrementan el coeficiente de atenuación (μ), al ser un sistema bifásico con distintos índices de refracción, mientras el índice de refracción de las partículas cerámicas sea mayor que el de la resina mayor serán los efectos de light scattering (dispersión de la luz) y en consecuencia menor será la capacidad resolutive del sistema. Dicho fenómeno se ve representado en la Figura 325 donde los distintos índices de refracción se han designado como: n_1 y n_2 siendo el primero el de la resina y el segundo el de las partículas cerámicas. Por otro lado, en la práctica se pudo comprobar dichos efectos en la reproducción de probetas en verde con barbotina de HTCC (ver capítulo 4), en donde el índice de refracción de las partículas de alúmina al ser muy superior al de la resina y en consecuencia al absorber menos cantidad de luz, ésta al dispersarse junto con las demás partículas adyacentes imposibilitaban la polimerización de las capas y la delimitación precisa de sus contornos.

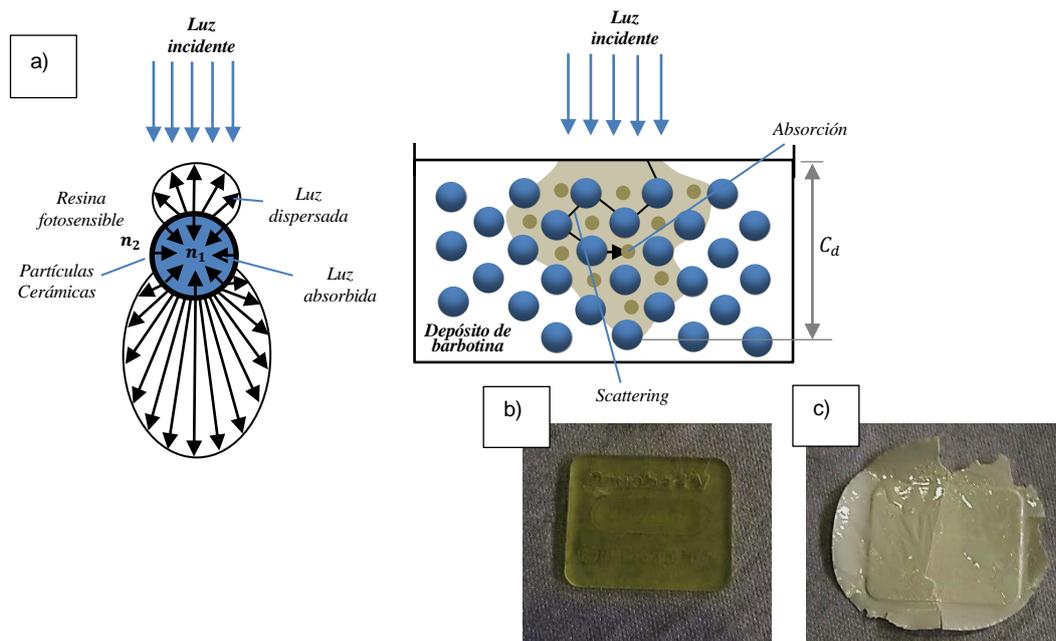


Figura 325: Interacción de las partículas cerámicas inmersas en la resina fotosensible con la luz [25] (a). Pieza de prueba impresa con resina fotosensible sin cargar (b) y pieza impresa con resina cargada con partículas de Alúmina (c) [Fuente: Elaboración propia].

Como puede apreciarse en las imágenes anteriores (Figura 325), las partículas cerámicas dispersan la luz en el interior de la resina, cambiando la dirección de ésta y en consecuencia modificando la polimerización de la misma. Por tanto, el modelo de fotopolimerización frontal desarrollado anteriormente deja de ser válido en aquellos casos donde el índice de refracción de las partículas es superior al de la resina en la que se encuentran inmersas. Como solución para solventar dicho fenómeno, en las formulaciones de las barbotinas se recurre a incrementar el índice de refracción de las resinas base, haciéndola lo más parecida al de las partículas cerámicas, ya que de esta forma los efectos del scattering se reducen. En este sentido, Griffith y Halloran [26] propusieron una relación a través de la cual se puede modelizar los efectos del scattering en la profundidad de curado en función del tamaño medio de las partículas, es decir: haciendo uso de la ley de Beer-Lambert (expresión 2.6) ésta puede reescribirse como:

$$Z_f \propto \frac{d}{Q\phi} \ln \left(\frac{KI_0 t}{\ln \left(\frac{1}{1-\phi_c} \right)} \right) ; \quad Q = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1} \right)^2 \left(\frac{d}{\lambda} \right)^2 \quad 2.8$$

Donde ahora la profundidad de curado (Z_f) no depende de la inversa del coeficiente de atenuación (μ) sino del diámetro medio de las partículas (d), de su proporción en la barbotina (ϕ) y del parámetro Q el cual a su vez depende de los índices de refracción ($n_i, i = 1,2$) y de la longitud de onda de la luz (λ).

Pese a dichas aportaciones cabe resaltar que, en la reproducción de las piezas, demostradores y otras geometrías tridimensionales con el equipo Nhibrid32D se recurrió al ensayo y error afín de ajustar los parámetros de atenuación de las distintas barbotinas y a la igualación de los índices de refracción a fin de evitar los fenómenos de scattering.

Por otra parte, y continuando con las fases de fabricación, la segunda fase del proceso de reproducción de las piezas se lleva a cabo fuera del equipo de impresión híbrido, en donde se somete a las piezas a un tratamiento térmico de sinterización. Dicho tratamiento térmico principalmente tiene dos etapas relevantes: la primera tiene lugar a una temperatura superior a los 240°C en donde la matriz polimérica aun es estable, tras un incremento gradual de la temperatura es calcinada, proceso que tiene lugar hasta los 460°C aproximadamente según la resina que se utilice. Cabe destacar la importancia en el control de la velocidad de la descomposición de la materia orgánica de las piezas impresas en verde, ya que en la mayoría de los casos es la desencadenante de las fisuras y grietas en la pieza, por otra parte, la evacuación de los gases durante dicho proceso también pueden llegar a destruir las pistas conductoras impresas en el interior de las mismas.

Tras alcanzar la temperatura de calcinación y mantener la pieza a dicha temperatura durante un intervalo de tiempo determinado afín de asegurar la inexistencia de resina en el elemento impreso, el ciclo térmico continúa incrementando la temperatura hasta el punto de sinterización de las partículas cerámicas. En este punto la pieza permanece hasta que las partículas se unen aumentando las propiedades mecánicas del objeto reproducido, para finalmente ser enfriada de forma gradual hasta alcanzar la temperatura ambiente.



Figura 326: Representación renderizada de probetas impresas con distintas barbotinas cargadas tanto de partículas cerámicas como metálicas pudiendo también ser fibras

[Fuente: Elaboración propia].

3.2.2.8.3. Resinas cargadas de partículas metálicas.

Por otro lado, los resultados prometedores de las pruebas iniciales con barbotinas cerámicas nos alentaron a probar con otros materiales, estas se realizaron al margen de los intereses del proyecto de investigación Nhibrid32D afín de validar la posibilidad de la misma y/o en consecuencia verificar la posibilidad de sujetar otras partículas en el interior de las

matrices poliméricas impresas tridimensionalmente. En este aspecto, la utilización fibras o partículas metálicas suspendidas en un medio fotosensible, plantea cuestiones muy interesantes en cuanto a la posibilidad de la alineación interna de las partículas metálicas, y ya sea por ultrasonidos o a través de campos magnéticos la generación de composites heterogéneos a voluntad, y con patrones y formas preestablecidas con antelación.

Dichas pruebas iniciales y rudimentarias, pueden apreciarse en la imagen de la Figura 327, en donde se recurrió al uso de polvo ferromagnético con la finalidad de conferir a las probetas impresas propiedades magnéticas.



Figura 327: Piezas de prueba impresas con resina Spot-LV, sin partículas ferromagnéticas y dotada de partículas ferromagnéticas respectivamente [Fuente: Elaboración propia].

Como puede apreciarse en la figura anterior, el bajo índice refracción de las partículas ferromagnéticas alejó la posibilidad de que los efectos del fenómeno del light-scattering afectaran la reproductibilidad de las capas y en consecuencia de las probetas. Por otra parte, la basteza de las partículas metálicas y la alta densidad de éstas respecto al medio que les rodea, fue la causa por la cual ésta suspensión presentara una altísima sedimentación, y a su vez la causante de la heterogeneidad de la dispersión de las misma en el interior de la probeta impresa. Pese a ello, su alta concentración hizo de la misma un elemento sensible a los campos magnéticos como puede apreciarse en el capítulo 4.

Cabe destacar que el desarrollo de dicha prueba experimental incita y/o alienta a una investigación más rigurosa y detallada de los materiales susceptibles a ser impresos por sistemas de fotopolimerización.

3.2.3. Sistema de impresión Inkjet.

La tecnología Inkjet como se ha podido apreciar en el capítulo anterior, supone un sistema de reproducción sin contacto con el sustrato en donde se depositan gotas de forma discreta en régimen de eyección, Éstas gotas son expulsadas por una serie de orificios dispuestos matricialmente, las cuales tras desarrollar una trayectoria parabólica mientras el carro se desplaza impactan en una posición específica sobre la superficie donde se reproduce un

punto, una línea o en conjunto una serie de patrones que constituirán una imagen bidimensional.

En la tecnología de inyección de tinta, las gotas se pueden generar por dos mecanismos diferentes: de forma continua con recirculación (CIJ) o de forma discreta a voluntad (DOD). En nuestro caso hemos utilizados los segundos y dentro de éstos, los accionados por piezoeléctricos (PIJ). Dentro de esta tecnología, a su vez, el modo en el que se deforman los actuadores piezocerámicos, definen la tecnología utilizada. En el presente equipo híbrido se ha recurrido al uso de cartuchos pertenecientes a la clasificación de los del tipo Bend.

Así pues como se pudo apreciar en el capítulo anterior, los sistemas de impresión de chorro de tinta DOD y accionados por piezoeléctricos (PIJ) del tipo bend, a pesar de operar a velocidades de generación de gotas inferiores a los CIJ y ofrecer menores niveles de miniaturización que los ampliamente utilizados en aplicaciones domésticas: los sistemas térmicos (TIJ), sí ofrecen la posibilidad de utilizar un mayor rango de materiales, reduciendo los condicionantes y las limitaciones impuestos por estos sistemas a las tintas y materiales a depositar y fundamentales en las aplicaciones de la impresión funcional.

La integración del sistema de deposición de materiales a través de la tecnología Inkjet con el sistema de reproducción tridimensional por DLP se ha podido llevar a cabo gracias a ser éste un sistema de no impacto, en donde la deposición de los materiales se lleva a cabo sin contacto entre el cabezal y el sustrato. Por otro lado, cabe destacar que los sistemas convencionales de impresión bidimensionales reproducen las imágenes a partir de archivos digitales mediante la deposición de gotas aisladas, produciendo una imagen pixelada a partir de la superposición de tramas basadas en el modelo sustractivo, generalmente a través de la cuatricromía CMYK. En nuestro caso, debido a que la deposición del material cumple una función más allá de lo estético, es decir, para que las imágenes reproducidas a partir de gotas sean eléctricamente conductoras, éstas han de estar parcialmente solapadas formando cordones continuos y particularizando el sistema de impresión bidimensional.

Así pues, en nuestro caso, los materiales de la impresión funcional requieren la superposición de gotitas para formar cordones continuos. Por tanto, el comportamiento y la interacción de éstas (las gotitas), depositadas de forma más o menos dispersas sobre el sustrato, condiciona la estabilidad de dichos patrones y en consecuencia la reproducibilidad de imágenes bidimensionales más complejas sobre el mismo, sin embargo, en el capítulo 2 se aborda dichos fenómenos. La superposición de las capas depositadas daría origen a una estructura tridimensional o en nuestro caso, mediante la sobreimpresión alternada de capas de tinta funcional con láminas de resinas o barbotinas fotopolimerizadas, permite la reproducción de una estructura tridimensional dotada de materiales funcionales embebidos en su interior.

3.2.3.1. Desplazamiento del cabezal de impresión en el plano X-Y.

Como ya se ha comentado, para que el sistema Inkjet pueda reproducir una imagen sobre un sustrato plano mediante la deposición discreta de gotas en régimen de eyección, el cabezal repositorio del o de los cartuchos intercambiables en nuestro caso, han de poder desplazarse sobre dicho plano X-Y a fin de cubrir la superficie delimitada como área de impresión. En este aspecto, el sistema de impresión Inkjet diseñado para el equipo de híbrido multimaterial cuenta con tres grados de libertad (ver Figura 302), dos de traslación automatizados y uno de ajuste manual a través de un nonius que permite la rotación del cartucho.

El movimiento del carro de impresión se realiza a través de una traslación continua horizontal en dirección al eje X, movimiento que se combina de forma independiente mas no coordinada con los saltos discretos en dirección al eje Y, constituyendo éste el segundo movimiento de traslación. De forma que, el cabezal de impresión es capaz de reproducir las imágenes bidimensionales dentro del área de impresión.

El equipo híbrido diseñado dispone de un sistema de movimiento en el plano X-Y para el correcto posicionamiento y funcionamiento del cabezal Inkjet. Las especificaciones iniciales impuestas por el consorcio establecieron una precisión en el posicionamiento de las gotas de 50 micras, precisión que posteriormente fue superada, las pruebas de impresión observable en el capítulo 4 dan fe de ello.

3.2.3.1.1. Movimiento eje X.

Desde un principio se estableció en las especificaciones del equipo que el sistema Inkjet debía ofrecer una capacidad de posicionar el cabezal Inkjet con una precisión de al menos 50 μm . Posicionamiento que en realidad no se lleva a cabo nunca ya que la deposición de los materiales se realiza cuando éste se describe una trayectoria lineal de velocidad constante. Aun así, se utilizó este requerimiento como elemento condicionante en la selección de los elementos mecánicos de transmisión y accionamiento. En este aspecto la traslación en sentido horizontal del cabezal Inkjet se realiza a través de los siguientes componentes: en cuanto al accionamiento éste se lleva a cabo a través de un motor paso a paso de 0,9°/step dotado un reductor de con una relación de transmisión 1/10, la cinética proporcionada por éste es transmitido por un sistema de correa dentada y poleas al carro de impresión, el cual se desplaza solidario a cuatro rodamientos a través de sendas guías cilíndricas rectificadas y paralelas, unidas de forma rígida a dos pilares contrapuestos ubicados a ambos extremos en lo que constituye al elemento; conjunto estructura Inkjet.

Se ha de justificar que la decisión de usar correa como elemento transmisor a diferencia de un sistema a través husillos pese a poder ofrecer una mayor precisión, ha sido condicionada por la poca inercia existente en el cabeza y la velocidad de avance del mismo.

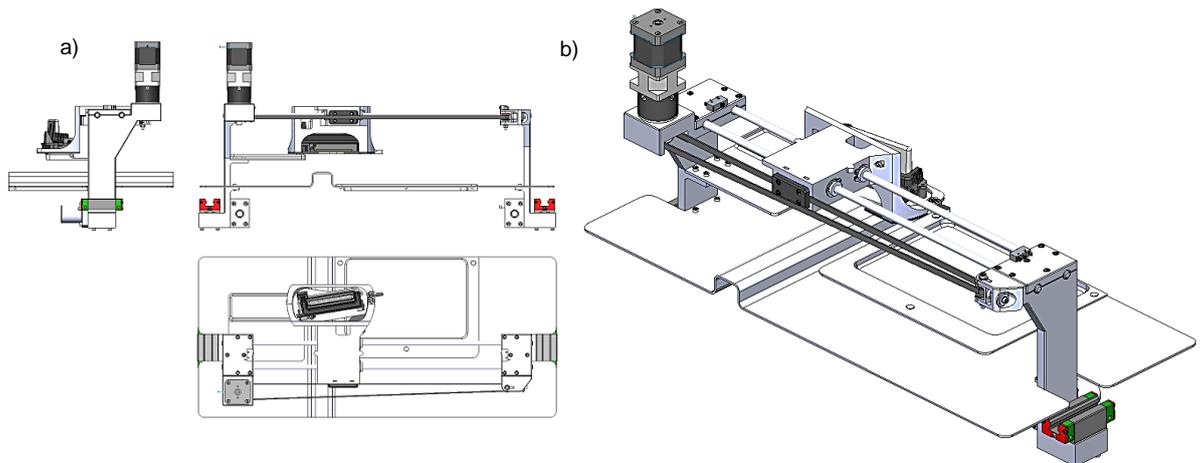


Figura 328: Representación esquemática del elemento conjunto estructura Inkjet, vistas en perfil, alzado y planta conjunta (a) y vista tridimensional del mismo (b) [Fuente: Elaboración propia].

Por otro lado y como se puede apreciar en las imágenes que constituyen a la Figura 328, el elemento móvil en el conjunto estructura Inkjet es el cabezal, el cual se traslada horizontalmente entre los dos sensores final de carrera alojados sobre los pilares de soporte. El conjunto, por otra parte, se encuentra constituido por otros elementos, tal es el caso del depósito de purga y la placa protectora de luz, elemento que por su importancia será abordado posteriormente. Dicho elemento además de contener un segundo depósito (de escurrido) aporte rigidez al conjunto reduciendo al mínimo los posibles efectos dinámicos durante el proceso de impresión Inkjet. Por último, la unión rígida entre las guías cilíndricas y los pilares se llevan a cabo por presión pudiendo como ya se ha comentado ser sustituibles o intercambiables con facilidad dotando al sistema de una mayor flexibilidad.

De modo que en cuanto a precisión de los desplazamientos, el moto-reductor seleccionado ofrece un juego (o backlash) máximo de $0,25^\circ$ y una relación de transmisión de $1/10$ con lo cual en conjunto tenemos una capacidad de $0,09$ grados por paso (a full step). La polea conductora dispone de 40 dientes y un diámetro efectivo de $25,46$ mm, de modo que haciendo uso de la expresión de a continuación podemos establecer una capacidad de posicionamiento teórica del sistema de $20 \mu\text{m}$ en el eje horizontal o eje x.

$$R_x = \alpha_{Step} \cdot N_{reductor} \cdot \varnothing_{Polea} \cdot \frac{\pi}{360^\circ} \quad 2.9$$

Otro parámetro relevante en el diseño del sistema de impresión es la velocidad de la traslación en sentido X factor indispensable en la determinación de la frecuencia de eyección de las gotas, afín de a su vez, determinaran la separación de éstas (drop spacing en X) condicionando la continuidad eléctrica de los cordones y en consecuencia de los patrones o imágenes reproducidas. La velocidad de avance de cabezal Inkjet o carro de impresión en dirección X se ha determinado a través de la siguiente expresión:

$$v_x(mm/s) = rpm_{motor} \cdot N_{reductor} \cdot \emptyset_{Polea} \cdot \frac{\pi}{60} \quad 2.10$$

3.2.3.1.2. Movimiento eje Y.

El movimiento vertical en el plano X-Y por otro lado, se lleva a cabo de distinta forma. En primer lugar, se ha de decir que el desplazamiento en sentido positivo y en dirección Y respecto a la base fija y absoluta de referencia común a ambos sistemas de impresión se lleva a cabo cuando el movimiento horizontal descrito anteriormente ha finalizado, es decir, cuando se ha depositado una primera franja de puntos y el cabezal se detiene sobre el depósito de purga. Tras detenerse el carro de impresión, todo el elemento conjunto estructura Inkjet mostrado en la Figura 328 procede a desplazarse una distancia preestablecida. De modo que, ésta se posiciona a una cota distinta a la anterior realizando un desplazamiento discreto, mediante la adición en sentido vertical de múltiples franjas constituidas por un conjunto de gotas depositadas en una ubicación concreta, los patrones que constituirán a la imagen a reproducir se van conformando.

Dicho posicionamiento del elemento conjunto Inkjet en el dirección al eje Y se lleva a cabo gracias a dos motores paso a paso dispuesto en paralelo de $0,9^\circ/\text{step}$. Mediante el uso de dos husillos rectificadas de $450 \times 12 \times 5$ mm de longitud, diámetro y paso respectivamente, con un grado de precisión C5 unidos a éstos por couplings del tipo slit y con un *backlash* casi nulo. A fin de garantizar el paralelismo de dicho desplazamiento con el eje en cuestión, ambos pilares del elemento conjunto Inkjet se encuentran unidos de forma solidaria a dos patines lineales de bolas los cuales permiten el desplazamiento del sistema guiados a través railes dispuesto en paralelo y fijados a la placa Z0 en su cara inferior. Dichos elementos mecánicos de transmisión y guiado se encuentran protegidos y aislados del área de impresión tridimensional y a su vez se ven cubiertos por la placa protectora de luz solidaria a dicho conjunto móvil.

Se ha de decir también que el accionamiento de ambos motores se lleva a cabo de forma simultánea a fin de evitar problemas en el sincronizado de ambos, y por otro lado, la combinación de ambos motores con sus respectivos husillos permiten alcanzar una precisión en el posicionamiento vertical en el plano X-Y teórico del cabezal de impresión de $12,5 \mu\text{m}$ tal y como puede apreciarse a través de la relación siguiente:

$$R_y = \alpha_{Step} \frac{P_{Husillos}}{360^\circ} \quad 2.11$$

A continuación, se muestra una representación esquemática de los sistemas que permiten el desplazamiento y posicionamiento del cabeza de impresión en sentido positivo y en la dirección al eje Y, de la base fija preestablecida anteriormente.

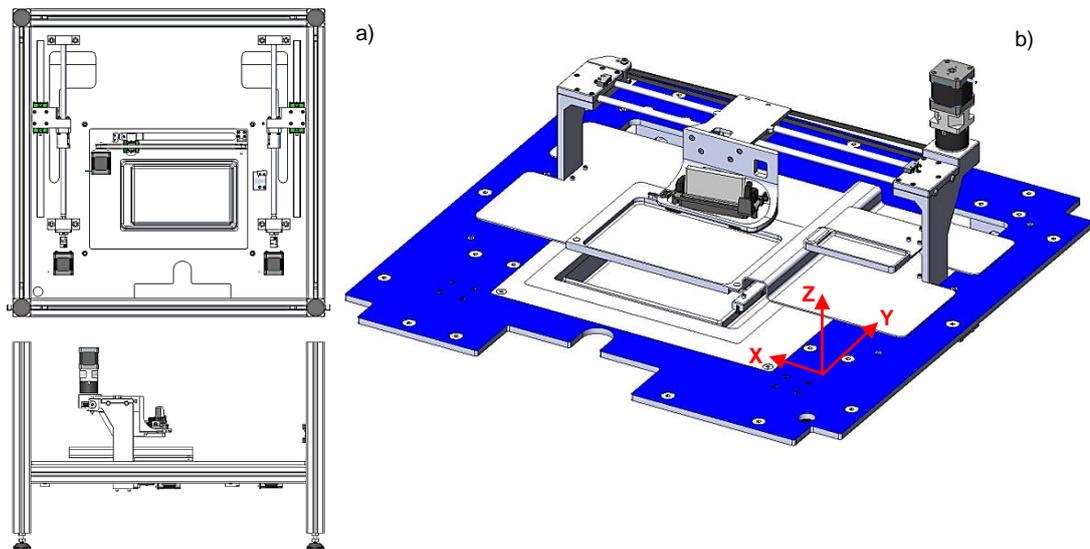


Figura 329: Vista de perfil y proyectada de los sistema que permite el desplazamiento y posicionamiento del cabezal Inkjet en el eje Y (a). Disposición de dichos sistemas sobre y por debajo del elemento placa Z0 y detalle de la base fija de referencia común a ambos sistemas de impresión existentes (b) [Fuente: Elaboración propia].

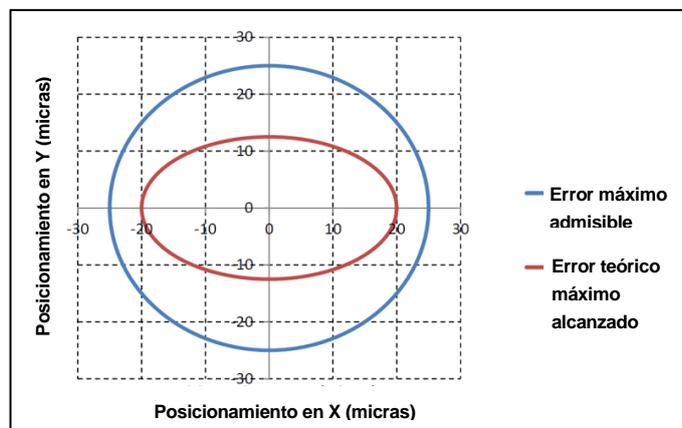


Figura 330: Comparativa entre el error de posicionamiento admisible (fijado en los requerimientos) y el error de posicionamiento teórico máximo alcanzado en el plano X-Y [Fuente: Elaboración propia].

3.2.3.2. Ajustes y otras particularidades del sistema de impresión Inkjet.

El sistema de deposición de materiales mediante la eyección de gotas de forma discreta, se ve completado gracias a la rotación del cartucho en el interior del carro de impresión, pero antes de abordar dicha particularidad se ha de aclarar que dicha deposición se lleva a cabo gracias a la adaptación de un cartucho Fujifilm Dimatix DMC-11610. Dicho cartucho va alojado en un equipo de impresión concebido como herramienta para laboratorios de impresión funcional, en donde con una productividad limitada, pero con grandes resoluciones investigadores, científicos e ingenieros pueden evaluar y optimizar tanto sus

diseños como sus tintas, nos referimos al equipo Fujifilm Dimatix DMP-2800. Por otro lado, se ha de resaltar que tanto el control del mismo como el software utilizado en el proceso de impreso bidimensional han sido desarrollados por completo y adaptado al funcionamiento del equipo de impresión híbrida que aquí se expone.

En cuanto a las particularidades de dicho cartucho, abordadas en profundidad en el capítulo 2, cabría decir que se basa en un sistema DOD accionado por piezoeléctricos el cual consta de 16 orificios de salida o nozzles, dispuesto en forma lineal separados a $254\ \mu\text{m}$ y capaces de eyectar gotas de 10 pl. Dicho cartucho por otra parte, se encuentra dotado de un sistema calefactor afín de mejorar la reología de las tintas facilitando su eyectabilidad. Son totalmente intercambiables y poseen un depósito presurizado desechable en el cual se almacenan las distintas formulaciones de tinta.



Figura 331: Imagen del cartucho utilizado (Fujifilm Dimatix DMC-11610) constituido por el módulo de almacenamiento (depósito presurizado translucido y desechable) y el módulo de Eyección (Cabezal del cartucho) [27].

Entre los requisitos establecidos a inicios del proyecto de investigación Nhibrid32D, se determinó que el sistema de impresión debía ser capaz de imprimir pistas conductoras de entre 100 y $300\ \mu\text{m}$ de anchura, y estas debían ser en principio reproducidas mediante la deposición de tintas conductoras. En este aspecto una de las tintas utilizadas en la reproducción de dichas pistas eléctricamente conductoras ha sido una suspensión de nano partículas de plata de la empresa coreana ANP (Advanced Nano Products Co., Ltd). Por otro lado, afín de alcanzar la capacidad de imprimir bidimensionalmente a unas resoluciones inferiores de los 1000 puntos por pulgadas (DPI) con dichos cartuchos se ha dotado al sistema de impresión de la capacidad de rotar a éste sobre un eje perpendicular al plano X-Y.

La rotación del cartucho en el interior del cabezal de impresión busca una ligera inclinación de los nozzles dispuestos en línea recta con el fin de reducir la distancia de los nozzles en sentido perpendicular al desplazamiento del carro y por tanto de aumentar la resolución del sistema de impresión. Dicha rotación se realiza de forma manual y en donde a través de un nonius se ha preestablecido algunos ángulos de rotación. Puesto que el sistema de desplazamiento vertical permite un posicionamiento con una precisión de $12,5\ \mu\text{m}$, la

distancia máxima entre nozzles en sentido vertical (eje Y del plano XY) función del ángulo de rotación es ajustada a través de dichos ángulos a múltiplos de 12,5 μm .

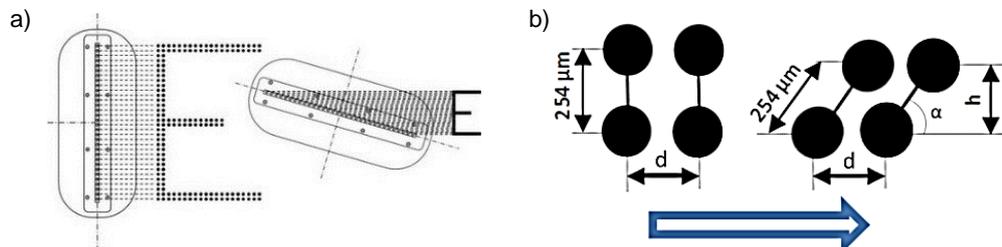


Figura 332: a) Representación esquemática del sistema de ajuste de la resolución de impresión a través de la rotación del cartucho de impresión. Cabezal a 90° y tras ser rotado un ángulo α con desplazamiento horizontal. b) Relación entre resolución y giro del cabezal con desplazamiento horizontal del cabezal [Fuente: Elaboración propia].

A través de la representación anterior se puede apreciar que cuando el cabezal se encuentra en posición perpendicular al desplazamiento (90°) el distanciamiento entre gotas en vertical es de 254 μm (distancia entre nozzle y nozzle) y a medida que inclinamos el cabezal esta distancia se reduce a razón de:

$$h = 254 \sin(\alpha) \quad 2.12$$

Por otro lado, se ha de destacar que a 0° de inclinación, es decir, con los nozzles dispuestos en paralelo al desplazamiento del cabezal, solo sería posible la reproducción de un circuito mediante las gotas eyectadas a través de un único nozzles puesto que el uso de más de un nozzle produciría el solapamiento de las gotas. De modo que, debido a que la resolución máxima establecida por los sistemas mecánicos en dirección al eje Y es de 12,5 micras a través de ésta condición se han establecido los siguientes ángulos de rotación; 0°, 2,82°, 5,65°, 8,49°, 11,35°, 14,24°, los cuales como se puede apreciar en la tabla de a continuación, representan un distanciamiento de los nozzles alineados en el interior de cartucho de impresión en sentido vertical múltiplos de dicha resolución máxima.

Ángulos Preestablecidos (α)	Distanciamiento de los nozzles en Y	Relación con el error máximo de posicionamiento en Y	Distanciamiento de los nozzles en X	Relación con el error máximo de posicionamiento en x
0°	0,0	0	254,0	12,70
2,8208°	12,5	1	253,7	12,68
5,6485°	25,0	2	252,8	12,64
8,4901°	37,4	3	251,2	12,56
11,3528°	49,7	4	249,1	12,45
14,2447°	61,9	5	246,3	12,32

Tabla 10: Distanciamiento de los nozzles en sentido vertical y horizontal en función del ángulo de inclinación α y su relación con el error máximo de posicionamiento asumible

[Fuente: Elaboración propia].

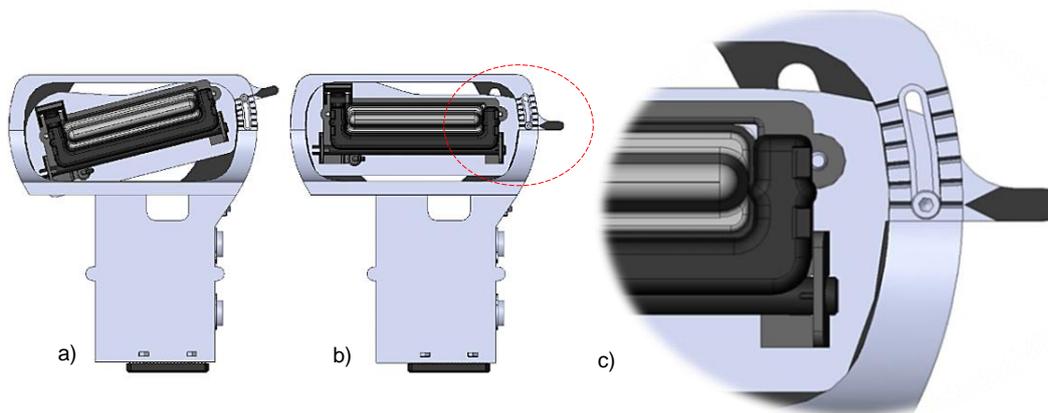


Figura 333: Cabezal de impresión a máxima resolución y a mínima resolución tras el giro del cartucho vista en planta (a, b respectivamente). Detalle del nonius y los ángulos de giro preestablecidos (c) [Fuente: Elaboración propia].

Por último, destacar que el sistema que permite la rotación del cartucho en el interior del cabezal de impresión se basa en la superposición de dos elementos cónicos, los cuales hacen de función de una doble guía por colas de milano. Como puede apreciarse en la representación esquemática de la Figura 334, el elemento soporte cabezal de impresión (en elemento en forma de herradura) se ve unido de forma solidaria al carro de impresión (elemento móvil), dicho soporte a su vez se encuentra unido a sendas láminas concéntricas cuyo interior achaflanado a 45° hace las funciones de guía y soporte al elemento guía cabezal Inkjet permitiendo a este girar respecto a un eje perpendicular al plano de impresión en el interior de lo que constituye al cabezal de impresión. Dicho elemento guía Cabezal Inkjet a su vez, sustenta de forma fija al sistema de fijación del cartucho en el cual se aloja el cartucho de impresión Fujifilm Dimatix DMC-11610, la regleta de conexiones de control y la conexión hidráulica de presurización del módulo de almacenamiento de dicho cartucho.

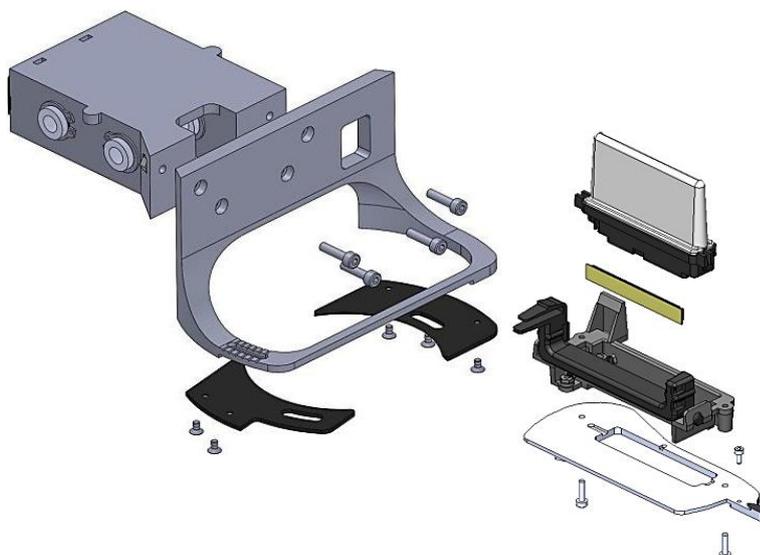


Figura 334: Imagen en conjunto del cabezal de impresión explosionado, distintos elementos constitutivos y en detalle el sistema de ajuste por rotación [Fuente: Elaboración propia].

Por otra parte, el sistema de impresión desarrollado permite el intercambio de los cartuchos Fujifilm Dimatix DMC-11610, proceso que se lleva a cabo en el cabezal de impresión tras fijar éste. En la secuencia de imágenes que se muestra a continuación en la Figura 335 puede apreciarse la incorporación de un nuevo cartucho al sistema de impresión Inkjet proceso similar al de sustituido del mismo, y tras incorporar éste se procede en la secuencia mostrada a ajustar la resolución del sistema mediante el ajuste de su inclinación.

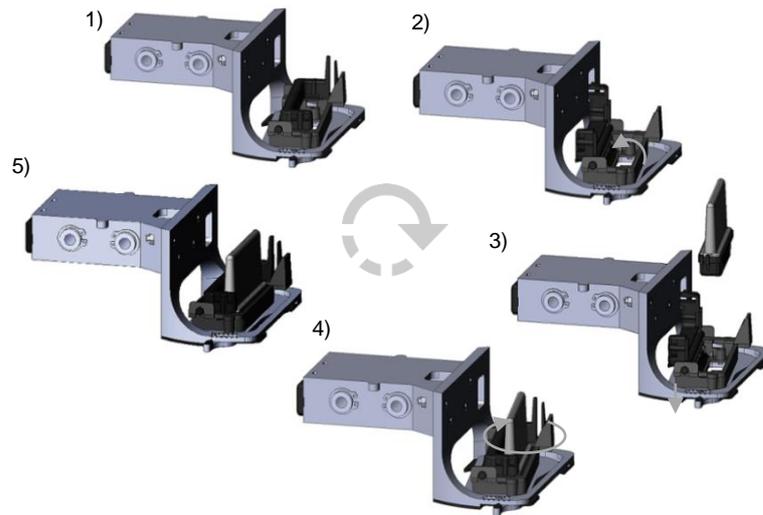


Figura 335: Secuencia de imágenes que describe la incorporación de un cartucho de impresión y el ajuste de la resolución del sistema. (1) Cabezal vacío, (2) apertura del sistema de sujeción del cartucho, (3) incorporación del nuevo cartucho, (4) fijación del cartucho a través del sistema de sujeción, (5) ajuste manual de la resolución a través del nonius
[Fuente: Elaboración propia].

3.2.3.3. Reproducción patrones bidimensionales a través del sistema Inkjet.

La reproducción de los patrones mediante la deposición materiales en forma de gotas eyectadas sobre un sustrato de forma discreta y a voluntad, y que en conjunto constituirán las imágenes a bidimensionales reproducidas con una funcionalidad específica, se llevan a cabo mediante la secuenciación de un conjunto de etapas coordinadas. Dichas etapas pueden verse descritas como: En primer lugar, la introducción del cartucho, posteriormente el sistema de impresión se posiciona en la base fija de referencia realizando la calibración de los ejes y procede a la habilitación del cartucho es decir, mediante los sistemas de calefacción y presurización del módulo de almacenamiento para finalizar con un purga del cartucho afín de evitar posibles obstrucciones en los nozzles.

En una siguiente fase, el sistema de impresión procede a la discretización de las imágenes o pixelización de las mismas a través de pixeles redondos los cuales hacen alusión a las gotas que constituirán la imagen, este paso se lleva a cabo gracias al establecimiento previo de los drop spacing (distanciamiento de las gotas en sentido X e Y) el cual condicionará la

imagen y su resolución (DPI), y a través de el solapamiento de las gotas su continuidad y la estabilidad de los cordones que constituirán a la imagen reproducida antes de dar comienzo a los procesos de formación de los depósitos y cambio de fase de las tintas.

Existe sin embargo una etapa intermedia a estos pasos o fases, en donde se establecen las condiciones en las que se produce la eyección de las gotas y en consecuencia definen el funcionamiento del cartucho de impresión. En este aspecto la deposición de las gotas se lleva a cabo en cuatro subfases las cuales se pueden resumir como: Eyección, vuelo (trayectoria parabólica descrita por las gotas tras la eyección), impacto e interacción con el sustrato hasta su fijación (mojado y/o otros efectos capilares hasta su cambio de fase). De modo que, en el control de la eyección de los materiales se realiza a través del modo en el que el cartucho eyecta las gotas. En este aspecto, el cartucho *FUJIFILM Dimatix DMC-11610* es controlado mediante tres señales coordinadas: una de excitación de los piezoeléctricos y por tanto de eyección, otra de calefacción y una tercera señal de menisco la cual mantiene vibrando a éste cuando no se encuentra activo, afín evitar la obturación de los nozzles ante la posible evaporación de los solventes de las tintas. De forma que, estas tres señales de control se ven condicionadas por la reología de las tintas y deben ser preestablecidas con anterioridad en función del material a depositar, proceso que se lleva a cabo a través del generador de señales pudiendo éstas ser visualizadas a través del microcontrolador auxiliar en un display.

Por otro lado, se ha de aclarar que el drop spacing horizontal (eje x') se verá condicionado por la velocidad de desplazamiento del cabezal de impresión y la frecuencia de eyección de las gotas en las cuales se ha de tener en cuenta la frecuencia de resonancia del sistema de bombeo y las posibles cavitaciones a altas frecuencias de eyección puedan llegar a ocurrir procesos de controla el microcontrolador principal.

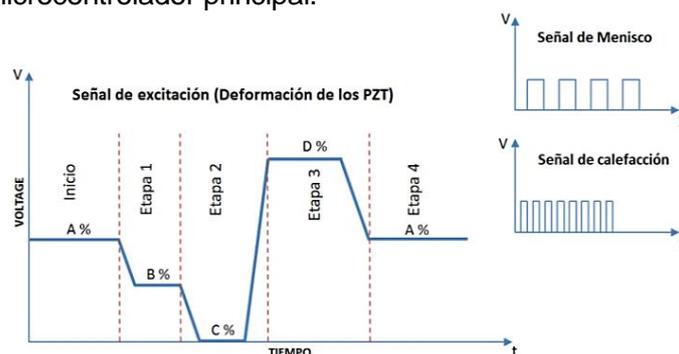


Figura 336: Representación de las señales que controlan el correcto funcionamiento del cartucho *FUJIFILM Dimatix DMC-11610* y diseñadas en función de la reología del material eyeccionado [Fuente: Elaboración propia].

Debido a que las particularidades y fenomenologías asociadas al proceso de ruptura de los chorros (eyección de las gotas de forma discreta y a voluntad a través de piezoeléctricos)

han sido abordadas en mayor profundidad en el capítulo dos se ha considerado innecesario ahondar más en dicho aspecto del proceso de reproducción.

Finalmente, el proceso de impresión en una tercera fase, transmite los datos de la imagen discretizada en bloques al microcontrolador principal, el cual conmuta entre las señales de excitación y menisco generando la eyección de las gotas de forma discreta y a voluntad.

Se ha de decir también que debido a que el sistema calefactor del cartucho se basa en un sistema resistencia/termistor y por tanto ante una consigna requiere establecer un bucle de control de lazo cerrado, es por ello que en el diagrama mostrado en la Figura 337 donde expone un esquema conceptual del sistema Inkjet dicha señal de accionamiento térmico se ha representado bidireccional. Finalmente cabe decir que, el microcontrolador principal es el encargado al igual que en el sistema DLP del desplazamiento y posicionamiento del cabezal de impresión integrando de este modo todos los elementos móviles del equipo de impresión híbrido multimaterial.

Por otro lado, tras la reproducción de forma bidimensional del archivo digital a través de la deposición de gotas, entran en juego los procesos de fijación de los depósitos, es decir, del curado de las tintas, en nuestro caso dicho curado se realiza por radiación lumínica a través de múltiples led UV-A dispuestos en el conjunto de proyección como anteriormente se ha comentado de forma lineal y suspendidos sobre el área de impresión.

En la Figura 337 se muestra de forma esquematizada un diagrama que describe el sistema de impresión funcional Inkjet DOD accionado por piezoeléctricos desarrollado para el equipo de impresión híbrido multimaterial Nhibrid32D, aunque en ella se han obviado la representación de los distintos sensores de final de carrera. Por otro lado, como se puede apreciar, el esquema que define el funcionamiento del sistema Inkjet se ha solapado al del sistema DLP, aunque este último con menor contraste y saturación de color afín de relegar su protagonismo. De modo, nos encontramos ante un sistema en el que participan tres actuadores eléctricos (motores paso a paso) en el posicionamiento del cabezal de impresión, junto con un sistema presurizador y de ajuste angular dispuesto en dicho cabezal el cartucho intercambiable asume las condiciones de eyección. Dichas condiciones vienen impuestas por tres señales; temperatura, menisco y eyección, las cuales a su vez viene condicionadas por la reología de las tintas y siendo estas generadas por un sistema anexo en el que a través de la electrónica de potencia y un segundo microcontrolador se generan dichas señales de control. Desde el microcontrolador principal además del posicionamiento y desplazamiento del cabezal se gestiona y coordina el funcionamiento del cartucho a través del control de dichas señales, en las cuales en este caso vienen condicionadas por el elemento a reproducir, el drop spacing (resolución) y la relación tinta sustrato. Finalmente, el sistema se completa con el control también a través del microcontrolador principal de la batería de leds UV-A dispuestos sobre la plataforma de construcción y solidarios al conjunto

de proyección, con los cuales se establece la fijación de los depósitos generados por las tintas sobre el sustrato polimerizado previamente por el sistema DLP.

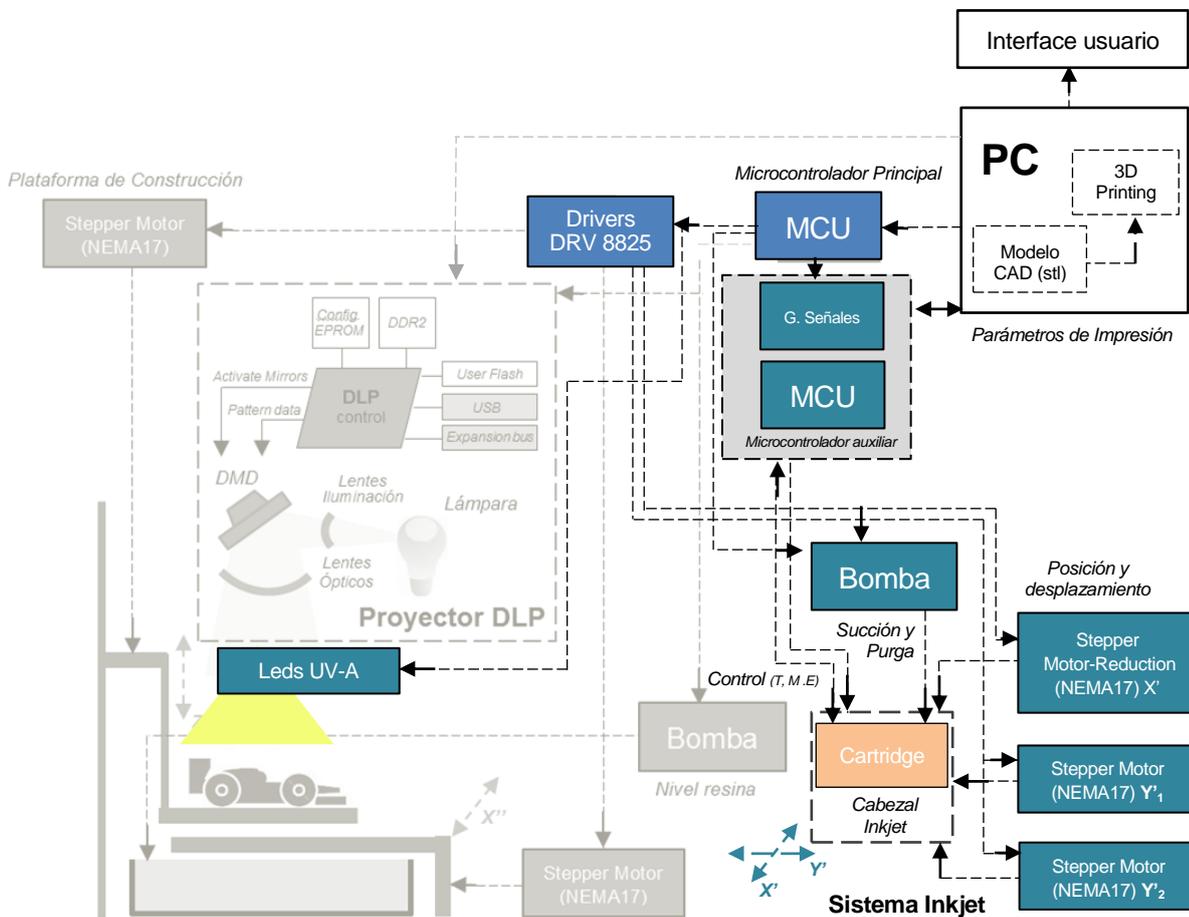


Figura 337: Diagrama del sistema de impresión por Inkjet desarrollado para el equipo de impresión híbrido multimaterial [Fuente: Elaboración propia].

3.2.4. Integración de los sistemas de impresión en 3D y 2D.

La integración ambos sistemas de impresión en un único equipo ha sido posible gracias a que el sistema Inkjet es un proceso de deposición de materiales sin contacto, es por ello que la reproducción de patrones bidimensionales puede llevarse a cabo sobre cualquier tipo de sustrato incluso uno previamente fotopolimerizado que gracias al solapamiento de capas de espesor constante genere una geometría tridimensional.

Entre los elementos que han permitido la integración de ambos sistemas destacan: la plataforma de construcción removible y capaz de alcanzar una cota elevada sobre la superficie libre de la resina de la cuba muy próxima a los sistemas de deposición Inkjet y de esta forma facilita la reproducción de imágenes bidimensionales a cualquier altura respecto a dicho elemento móvil (la plataforma de construcción). Por otra parte, otro de los elementos que permiten dicha integración es la placa protectora de luz (elemento solidario a los pilares

del conjunto estructura Inkjet). Dicho elemento además de proporcionar al conjunto estructura Inkjet un mayor resistencia y rigidez evitando posibles deformaciones y con ello desalineaciones a consecuencia de los efectos dinámicos producidos en la impresión, permite aislar el depósito de resina fotosensible protegiéndolo de las radiaciones utilizadas durante el proceso de curado de las tintas, a su vez éste elemento permite ocultar al sistema nivelador (Wiper) y mediante el subdepósito alojado sobre éste y ubicado debajo de la plataforma de construcción permite a su vez recoger las resinas que gotean de ésta última durante el escurrido de la misma previo a la deposición de las tintas sobre la capa recién polimerizada, cabe resaltar además que al estar la placa protectora de luz solidaria a la estructura cabezal Inkjet y por tanto en conjunto constituir un elemento móvil supone el ahorro de un sexto motor que proporcione la ocultación del depósito de resina y por tanto en movimiento de dicho placa de protección de luz .

En la imagen de a continuación (mostrada en la Figura 338) se pueden apreciar dichos elementos integradores. En dicha imagen se aprecia al equipo en una de las fases de la construcción del mismo, en donde algunos sus elementos constitutivos, al encontrarse susceptibles a cambios (bucles depurativos del proceso de diseño) se encontraban fabricados o impresos en PLA (Poliéster alifático termoplástico constituido por moléculas de ácido láctico obtenidos a partir del almidón de maíz) por la tecnología de deposición de hilo fundido FDM.

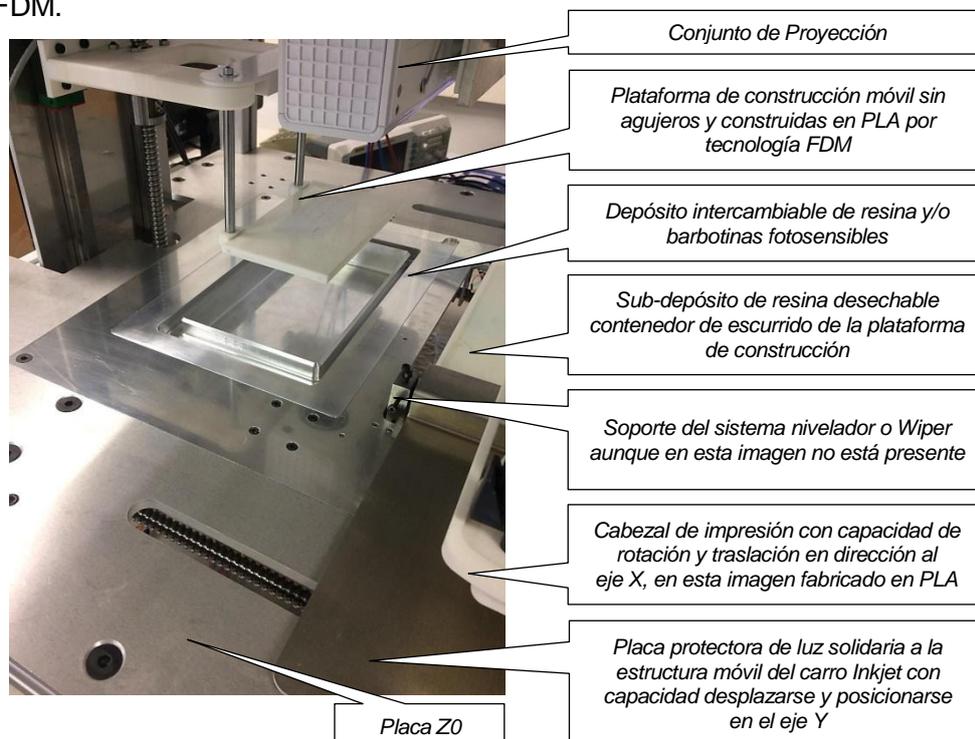


Figura 338: Imágenes de los distintos elementos integradores de ambas tecnologías de reproducción (DLP e Inkjet) existentes e integradas en el equipo de impresión híbrido multimaterial descrito en la presente tesis [Fuente: Elaboración propia].

3.2.4.1. Compatibilidad geométrica.

Para que los distintos elementos móviles que constituyen al elemento reproductor híbrido no se obstaculicen o peor aún interfieran entre sí, se ha tenido que idear una configuración geométrica que permitiera la integración de todos sus sistemas móviles es decir, de sus 5 grados de libertad expuestos en la Figura 302.

La coordinación de los distintos elementos móviles que integran al equipo reproductor híbrido se han dispuesto a distintas cotas conformando distintos planos de trabajo. En éste sentido, el elemento nivelador constituye el primer plano de trabajo coincidente con la superficie por la placa Z0 en donde se ha ubicado la base fija de referencia de la máquina. Los ejes X e Y de dicha base absoluta describen el plano en el que actúa el Wiper en su traslación horizontal, siendo a su vez el plano de referencia del sistema DLP en donde se proyectan las imágenes emitidas por el proyector durante la fotopolimerización de las resinas y/o barbotinas. Por otro lado, dicho desplazamiento horizontal es compartido con el cabezal de impresión, aunque éste trabaje en una fase distinta del proceso de impresión anterior. La necesidad de ubicar ambos sistemas a distintas cotas se hace evidente para que estos no se obstaculicen y puesto que la plataforma construcción es el elemento móvil capaz de desplazarse en sentido vertical, es éste, el que permite la integración de ambos planos de trabajo.

Así pues, junto con el desplazamiento en sentido horizontal (eje X) del cabezal de impresión y en conjunto toda la estructura móvil del Inkjet en dirección al eje Y, el segundo plano de trabajo se completa definiendo el área de impresión del segundo sistema reproductor a través de la deposición de gotas. El posicionamiento del cabezal de impresión en dirección al eje Y por otro lado, se lleva a cabo gracias a las guías dispuestas en la placa Z0 las cuales gracias a dos ranuras paralelas dispuestas en ésta, los pilares de dicha estructura móvil Inkjet, pueden desplazarse y posicionarse, a rodeando los elementos móviles descritos anteriormente. Cabe destacar también que el plano descrito por el sistema Inkjet supone la cota máxima a la que puede ascender la plataforma de construcción limitando su ascenso y así evitando que interfiera con el carro de impresión Inkjet, en este aspecto el cartucho Inkjet ha de estar posicionado a una distancia vertical de entre 0,3 y 1,7 mm para una correcta deposición de material. En el capítulo 4 se abordan algunas de las pruebas y problemáticas que se han tenido que solventar al respecto, durante la construcción y desarrollo de dicho equipo híbrido.

La placa protectora de luz por otra parte, como elemento solidario a la estructura móvil del sistema Inkjet y por tanto móvil a su vez, al estar a una cota próxima a la placa Z0 y en consecuencia en su desplazamiento en sentido al eje Y interfiere con el Wiper, recurre a su geometría especialmente diseñada para evitar al mismo, ocultándolo cuando éste se encuentra en estado de reposo.

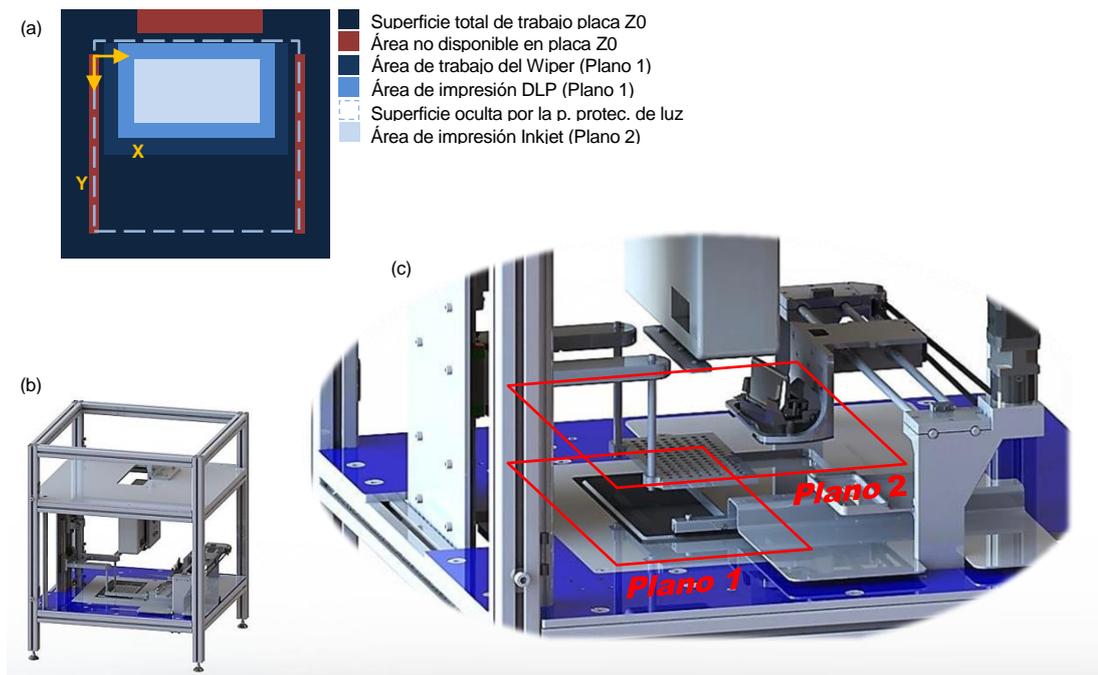


Figura 339: Vista en planta de las distintas áreas de impresión y su integración (a), imagen general de equipo de impresión híbrido multimaterial (b) y vista en detalle de los distintos planos de trabajo dispuestos en dicho equipo (c) [Fuente: Elaboración propia].

Cabría añadir que como se puede apreciar en la imagen de la Figura 339c, el sistema nivelador o Wiper se ubica a la izquierda de recorrido (Y''_{\min}) siendo esta su posición de descanso permitiendo la fácil extracción del depósito, el ascenso y descenso de la plataforma de construcción y su ocultación gracias a la placa protectora de la luz, la cual a su vez en posición de descanso junto al cabezal Inkjet y la plataforma de construcción se ubicarán respecto a los ejes absolutos en X_{\min} , Y_{\min} y Z_{\max} .

3.2.4.2. Procesos de impresión del equipo híbrido multimaterial (Deposición de tintas sobre superficie fotopolimerizada).

En los apartados anteriores se ha descrito el funcionamiento de los sistemas integrados en el equipo de impresión híbrido multimaterial Nhibrid32D por separado, pero el funcionamiento real de éste equipo reproductor de archivos digitales en tres dimensiones y que en realidad lo distingue de otros, se lleva a cabo integrando ambos sistemas: el DLP por un lado alternado con la deposición Inkjet por otro. En este aspecto en el diagrama de flujo expuesto a continuación (Figura 340) se describe los pasos a través de los cuales dicha reproducción se lleva a cabo.

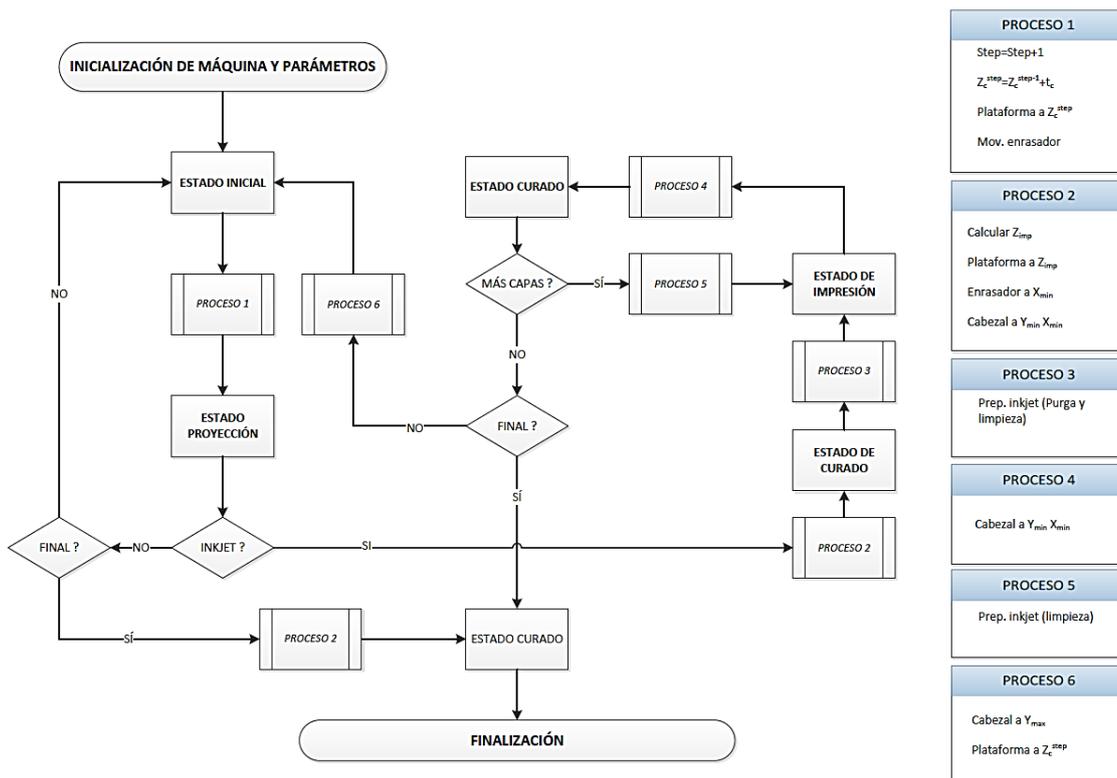


Figura 340: Diagrama de flujo del funcionamiento del equipo híbrido [Fuente: Elaboración propia].

Como puede apreciarse a través del diagrama anterior el proceso de reproducción de un objeto tridimensional con pistas conductoras embebidas en la geometría tridimensional se lleva a cabo a través de tres bucles. En un primer bucle se genera la geometría tridimensional del objeto mediante la superposición de capas de espesor constante fotopolimerizadas por el sistema DLP alternados por el paso del Wiper. Durante dicho proceso enumerado como 1 y tras la proyección de la imagen antes de realizar siguiente capa o iteración se decide si ésta última recién polimerizada es susceptible a llevar circuitaría, de ser así la plataforma asciende en lo que constituye el proceso 2, y tras el escurrido de la misma comienza un segundo bucle en donde se realiza un curado previo del sustrato, en este caso, de la capa recién polimerizada afín de evitar cualquier humedad o falta de conversión restante. Posteriormente se realiza el ajuste de los sistemas de impresión (proceso 3) y se procede a depositar los materiales de forma patronizada a través del sistema Inkjet y se procede a un segundo curado, aunque en este caso de las tintas (proceso 4) afín de fijar éstas al sustrato (una vez fijadas éstas no contaminarán al depósito de resina en sucesivas inmersiones).

Posteriormente, tras la finalización de la preparación, deposición y fijación de los materiales conductores en lo que constituye una primera iteración del segundo bucle, el equipo decide si es o no requerido una siguiente capa de deposición de tinta, de ser así el proceso 5

similar al proceso 3 realiza el ajuste de los sistemas Inkjet y bucle de deposición de tinta se reinicia en una nueva iteración sin el curado previo del sustrato. En caso contrario el sistema vuelve a decidir si se ha culminado la reproducción o no, en caso de ser afirmativo la plataforma asciende al plano de impresión Inkjet (proceso 2) y recibe una última radiación UV-A de polimerizado final y la reproducción concluye. En caso contrario entra en juego el tercer bucle, la plataforma desciende (proceso 6) y se sumerge en la cuba de resina para dar inicio a la polimerización de la siguiente capa, volviendo al bucle inicial.

En conjunto el elemento reproducido constituirá una especie de sándwich de capas de resina o barbotina fotopolimerizada alternadas de capas de tinta, constituyendo una especie de composite de un material en principio dieléctrico con agrupaciones de elementos eléctricamente conductores en su interior de forma localizada constituyendo pistas y en conjunto circuitos multicapa conectados.

Dicho proceso ha sido representado de forma esquemática a través de una secuencia de imágenes mostradas en la Figura 341 en donde se muestran las etapas de fotopolimerización a través del sistema DLP y a través del sistema de deposición Inkjet, la etapa de preparación, deposición y fijación de los materiales conductores sobre los sustratos previamente foto-polimerizados.

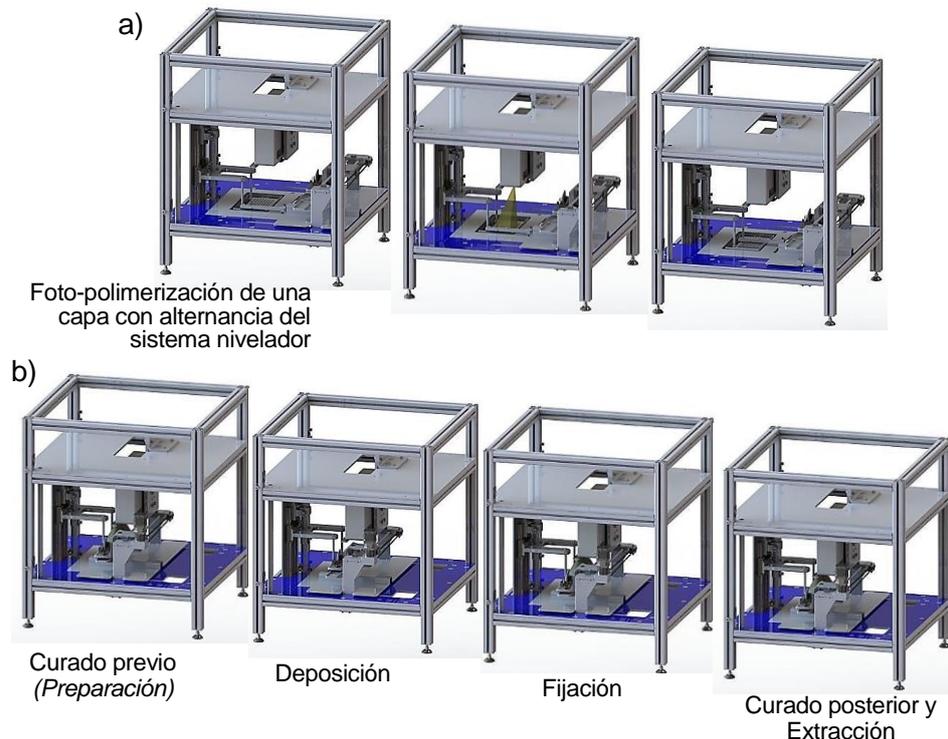


Figura 341: Representación esquemática de los procesos llevados a cabo en el primer bucle (impresión tridimensional por tecnología DLP) (a), y en el segundo bucle la deposición de las tintas a través del sistema Inkjet (b) [Fuente: Elaboración propia].

Finamente cabe destacar que, pese a que las imágenes expuestas anteriormente muestran una máquina abierta ésta se encuentra cubierta y protegida del entorno. Dicha dispositivo reproductor en este aspecto fue concebido como una máquina de sobre mesa cuyo destino sería una sala blanca, por tanto la protección que la cubierta exterior proporciona, no será solo para proteger ésta de la luz exterior sino que también de proteger a las personas del exterior de la radiación ultravioleta generada por los leds UV-A durante el proceso de impresión, el aspecto final de la maquina por tanto puede apreciarse en las imágenes renderizadas de la Figura 342.

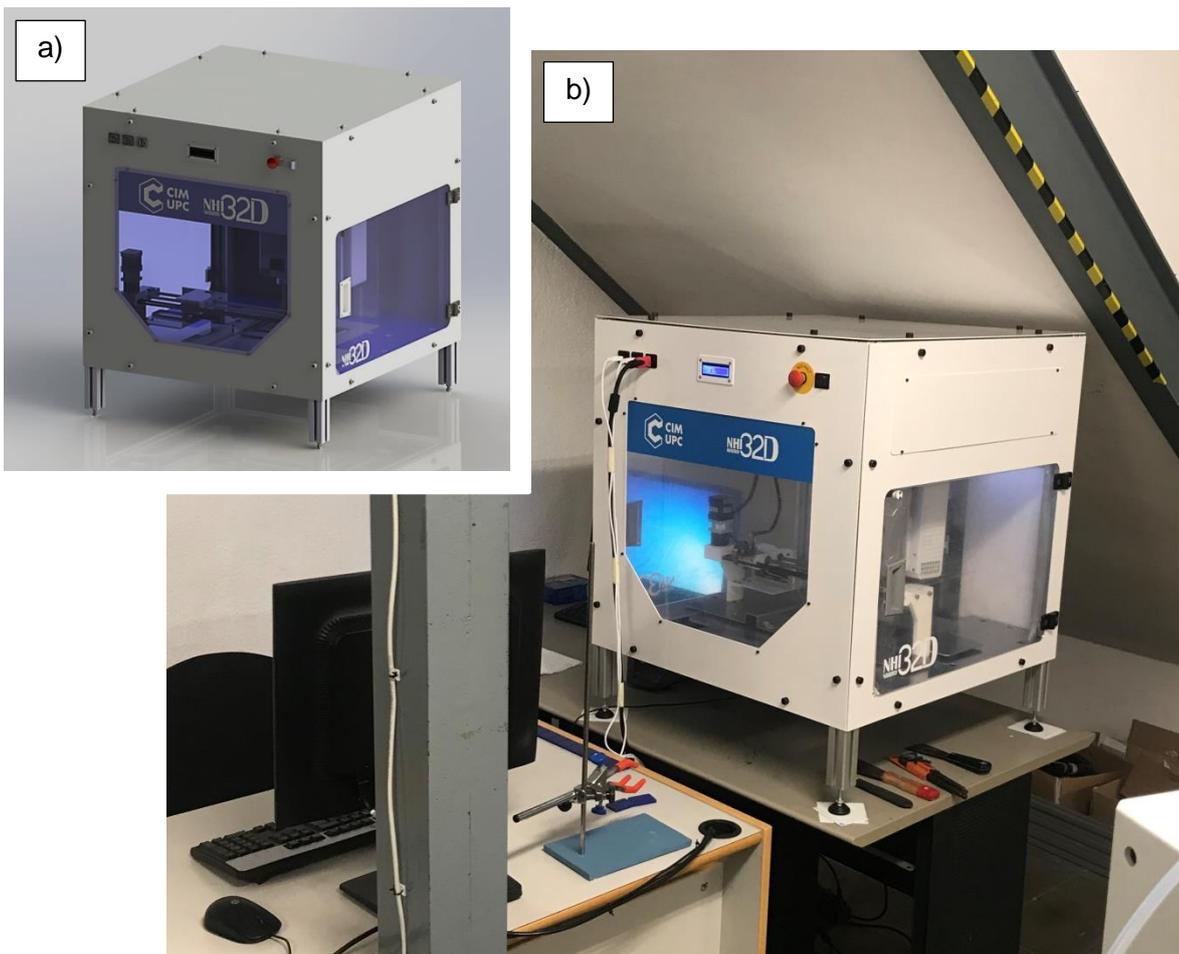


Figura 342: a) Imagen renderizada del equipo diseñado y b) tras su construcción
[Fuente: Elaboración propia].

A continuación, por otro lado, siguiendo con línea descriptiva de la máquina se muestra con el fin de proporcionar claridad y un mejor entendimiento de como se ha llevado a cabo la integración de ambos sistemas de impresión en un mismo equipo, un diagrama conceptual sencillo en el que se expone como ambos sistemas se ven conectados, aunque en él se han obviado los distintos sensores finales de carrera.

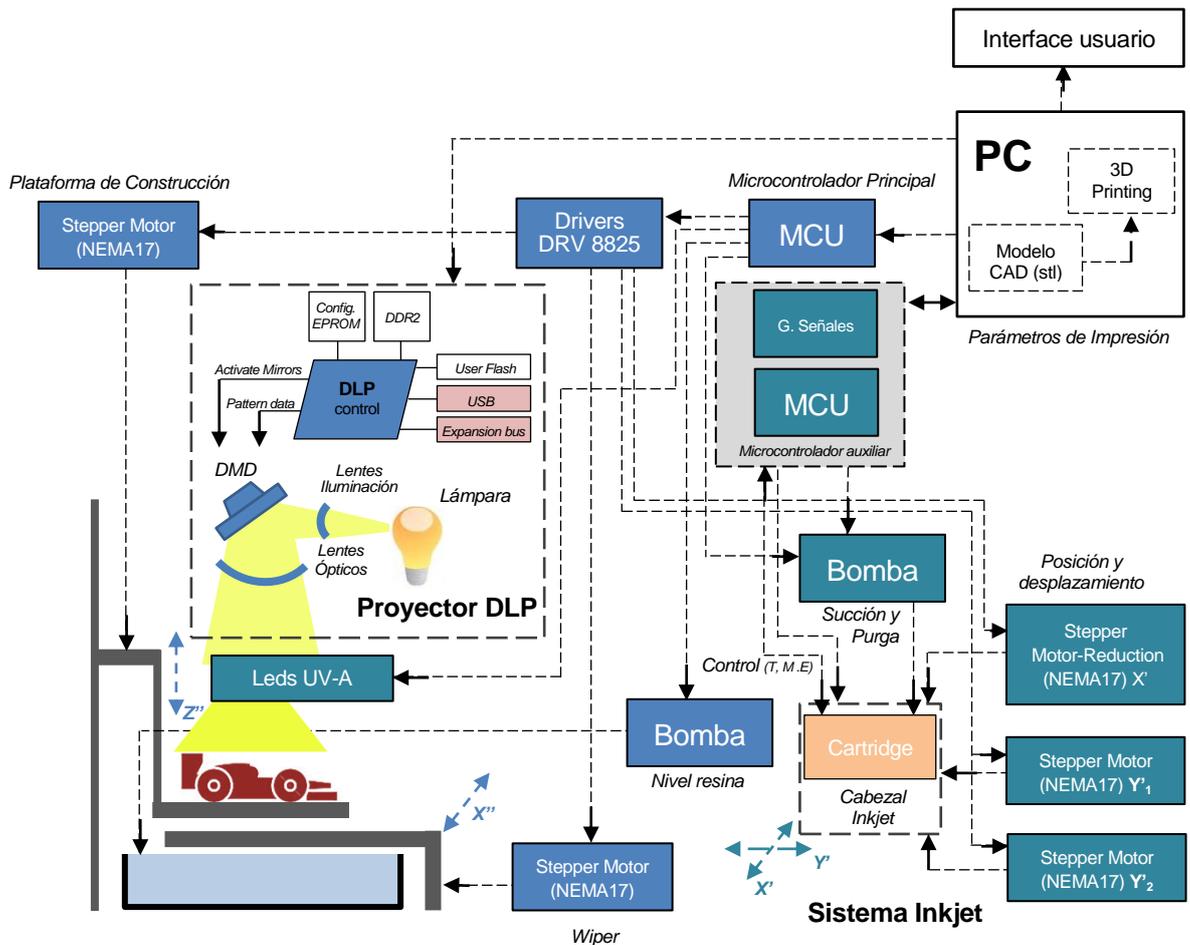


Figura 343: Diagrama completo del equipo impresión híbrido multimaterial con todos sus sistemas integrados [Fuente: Elaboración propia].

3.2.4.3. Aspectos constructivos del sistema.

Como en todo proyecto en el que a través de una secuencia de fases se lleva a término un conjunto de acciones con el fin de alcanzar un objetivo, en el desarrollo del equipo de impresión híbrida multimaterial expuesto en el presente capítulo se siguieron un conjunto de pautas en las cuales tras una primera fase creativa, se idealizó y conceptualizó un dispositivo capaz de validar un concepto, y de esta forma abrir una línea de investigación con el potencial de aportar una posible solución a una problemática externa particular o al menos en su meta más primaria, contribuir en dicho afán.

Entre los aspectos constructivos del equipo de impresión híbrida cabe destacar que tras dicha primera fase creativa en donde atendiendo a las solicitudes y requerimientos impuestos exteriormente, se ideó, trazó y en definitiva se conceptualizó un equipo, un plan y se identificó los medios requeridos para llevar a términos dicho plan y en consecuencia la

ejecución de dicha solución. En la Figura 344 se puede apreciar en un diagrama sencillo los pasos seguidos en la construcción de dicho equipo.

De forma que, tras conceptualización se pasó a la fase de diseño y selección de los distintos elementos constitutivos del equipo (elementos de accionamiento, transmisión, control, así como también elementos normalizados, de protección, etc.) tras la integración de estos en un modelo CAD y a través del análisis de los correspondientes, cálculos y simulaciones CAE, se procedió a la construcción del equipo en lo que constituyó una tercera fase. En paralelo a dicha fase los demás integrantes del proyecto Nhibrid32D comenzaron sus investigaciones sobre las tintas, resinas y barbotinas fotosensibles a utilizar en la reproducción de piezas objetivo que validen al equipo reproductor y en consecuencia al concepto de máquina híbrida, capaz de imprimir circuitería inmersa en una geometría tridimensional.

Puesto que el desarrollo de dicho dispositivo se llevó a cabo mientras se estudiaba, analizaba e investigaba en los fundamentos que posteriormente permitirían su funcionamiento, inicialmente se recurrió a la fabricación aditiva en la construcción de las piezas y elementos no normalizados requeridos en la integración de los distintos sistemas del equipo, puestos que éstos estaban sujetos a modificaciones. En concreto se utilizó la tecnología de impresión tridimensional FDM, a través de la cual, y con un mínimo de inversión permitió obtener el andamiaje mecánico donde validar el conjunto de instrucciones que nos permitiría controlar los movimientos del mismo y en consecuencia su programación, proceso que se llevó a cabo a través de varios bucles depurativos.

Por otro lado, estos bucles depurativos permitieron definir la configuración geométrica del equipo en un estado muy próximo al actual. Por otra parte, tras la entrada en juego de las primeras formulaciones de los materiales a utilizar y las primeras pruebas de reproducción de los equipos por separado, la evolución de equipo se vio acelerada.

Finalmente tras alcanzar unas condiciones satisfactorias en el funcionamiento del equipo, teniendo en cuenta que la suma de errores y las imprecisiones inducidas por la falta de tolerancias estrictas de los elementos impresos suponían una barrera infranqueable en el desarrollo del equipo, se procedió a la mecanización de muchos de sus elementos no normalizados exceptuando aquellos aún susceptibles a cambios, proceso que requirió el rediseño de los mismos ahora centrados en los métodos de fabricación convencionales. Así pues, tras la selección de materiales, tolerancias y procesos, se realizaron los correspondientes, hojas de proceso, de ruta, planos y especificaciones necesarios para la correcta manufactura de los mismos.

La mejoría en la formulación de los materiales ya más optimizados y evolucionados junto con un mayor desarrollo del equipo y un mayor conocimiento de la fenomenología asociada a los procesos de reproducción involucrados, sustentados en parte en el ensayo y error,

permitió la evolución del equipo a su estado actual, aunque éste sufrió algunas modificaciones por el camino, en lo que a su vez constituyó un segundo bucle iterativo.

Finalmente, cabría añadir como última fase la de reproducción de piezas objetivo capaces de validar la viabilidad del equipo y en consecuencia del concepto que representa. Dicha fase hace alusión a la explotación del mismo cuyo principal objetivo es el de contribuir al desarrollo de la tecnología de la fabricación aditiva y el de su transferencia.

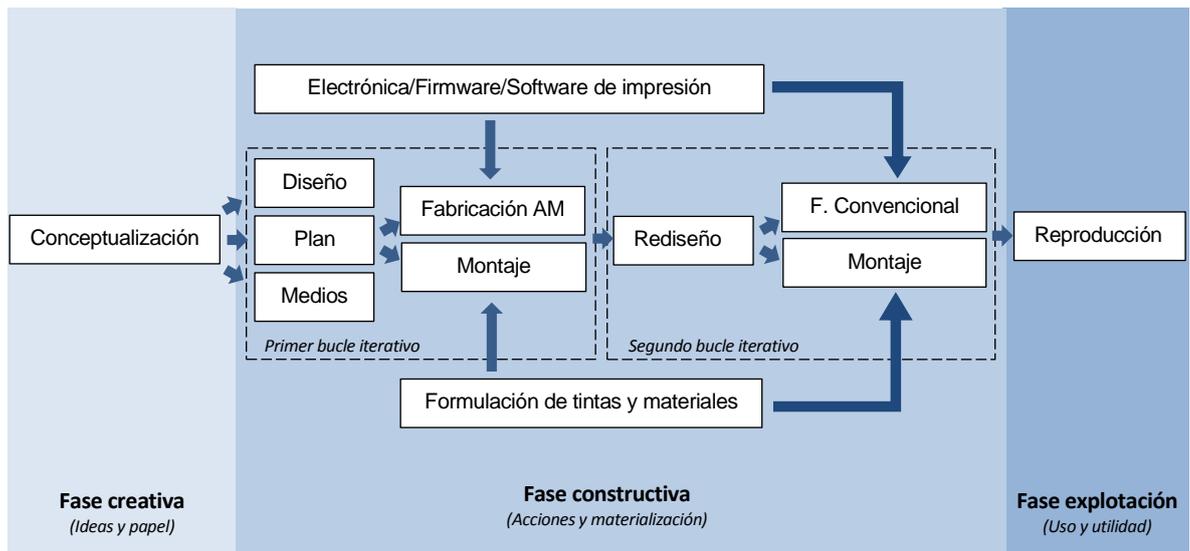


Figura 344: Diagrama de los pasos seguidos en el desarrollo del equipo de impresión multimaterial híbrido de forma cronológica llevado a cabo en el proyecto de investigación Nhibrid32D [Fuente: Elaboración propia].

Cabe destacar que, a parte de estos bucles depurativos mostrados en la figura anterior propios de la construcción y desarrollo del equipo, en paralelo se han llevado a cabo muchos otros; como los realizados en el desarrollo de las formulaciones de los materiales empleados, así como los llevados a cabo en el desarrollo del Firmware (software integrado en el equipo y necesario para controlar un hardware) y software de impresión, la electrónica de accionamiento y de gobierno, etc. Los cuales, a su vez, han realimentado el proceso cronológico mostrado anteriormente, estando presentes en distintas etapas del mismo.

3.2.4.3.1 Electrónica y sistemas de control.

El control de los desplazamientos requeridos por el equipo Nhibrid32D se ha realizado mediante el empleo de un microcontrolador Arduino y múltiples motores paso a paso dotados de sus respectivos drivers.

Motores paso a paso.

Los motores paso a paso o también llamados stepper por su precio y baja complejidad son cada vez más utilizados tanto en la industria como en el mundo maker. Son los dispositivos electromagnéticos capaces de convertir un impulso eléctrico en movimientos mecánicos de

rotación. De manera que, estos actuadores se mueven un paso, por cada impulso que reciben del microcontrolador. Se caracterizan por ofrecer una alta precisión permitiendo quedar fijos en una posición como un servomotor y también girar libremente en ambos sentidos.

Fundamentalmente, la circulación de una corriente por las bobinas del estator crea un campo magnético generando polos norte-sur en los mismos. Luego la orientación sur-norte de los polos del rotor dará origen al movimiento equilibrándose magnéticamente en una posición fija. La alternancia en la orientación de los polos del estator a través de un pulso periódico dará origen al movimiento giratorio permanente del eje en donde el ángulo del paso depende de la relación entre el número de polos magnéticos del estator y el del rotor.

Por otra parte, cabe destacar que según sea el bobinado del estator, los motores pueden ser unipolares o bipolares. En nuestro caso se ha empleado los segundos donde el sentido de giro depende de la dirección del flujo de corriente por las bobinas.

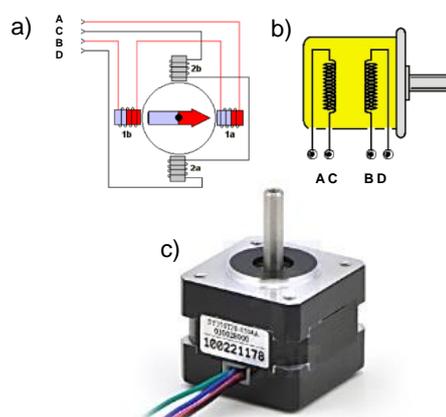


Figura 345: Representación esquemática de los motores bipolares empleados. Conexiones del bobinado del estator (a,b) e imagen típica de un motor Nema 17 bipolar (c) [Fuente: Elaboración propia].

Cabe destacar por último que los motores ante una solicitud de torque superior a su par máximo o par de detención pueden perder pasos por vuelta, haciéndolos imprecisos siendo, el par ofrecido por estos motores superiores ante su funcionamiento en fullstep.

Drivers DRV8825.

En el control de dichos motores se ha recurrido al uso de una placa soporte o placa de arranque. A través de este elemento es posible modificar la dirección de giro del motor, el número de pasos y la aceleración del mismo, ajustando el amperaje de salida a través de un potenciómetro ofreciendo también una protección térmica ante exceso de temperatura.

A continuación, se muestra un esquema o diagrama de cableado para la conexión de un microcontrolador cualquiera pongamos un Arduino con el cual controlar un motor paso a paso bipolar, recurriendo al uso de una driver DRV8825 de la marca Pololu.

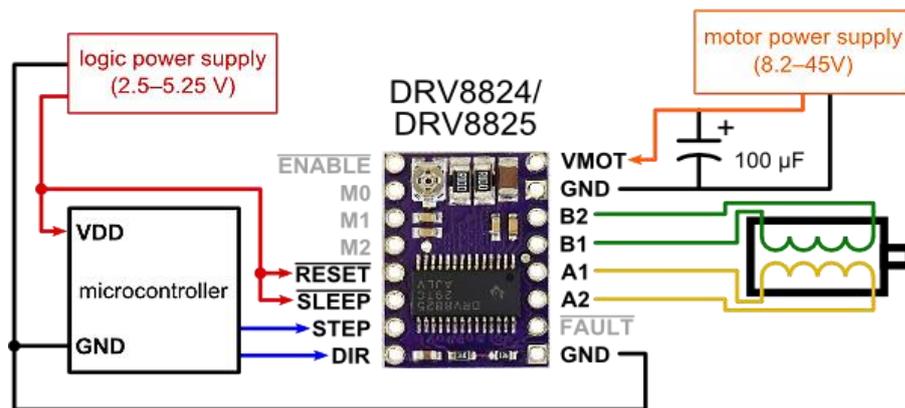


Figura 346: Esquema o diagrama de cableado para la conexión de un microcontrolador a un motor paso a paso bipolar a través de un driver DRV8825 [28].

Como se puede apreciar a través de la imagen de la figura anterior el driver DRV8825 cuenta con 16 pines entre inputs y outputs. Entre las conexiones requeridas para el funcionamiento de los motores paso a paso tenemos: las conexiones de potencia que involucra a los pines VMOT y GND en donde se emplea un condensador en paralelo por motivos de seguridad ante picos de tensión que puedan dañar la placa en nuestro caso de 100 μ F. Por otro lado, tenemos las conexiones del motor (B2, B1, A1, A2), el tamaño de los pasos (M0, M1, M2) y finalmente el control del motor propiamente dicho (ENABLE, STEP DIR).

Conexiones del motor.

El controlador empleado es capaz de conducir motores paso a paso de cuatro, seis y ocho derivaciones. En nuestro caso por tratarse de motores paso a paso bipolares, estos al poseer 4 derivaciones (ver esquema de la Figura 345), la conexiones de control del motor se realizan mediante las derivaciones A, C las cuales se conectan las salidas del controlador A1, A2 y mediante las derivaciones B, D las cuales se conectan a las salidas B1, B2 de la placa o driver de control como se puede apreciar en la Figura 346.

Tamaño de paso (microstepping)

Los motores paso a paso suelen tener un tamaño de paso específico, comúnmente; 1.8° o 200 pasos por revolución. Mediante el empleo de un driver, como el empleado, el control de los mismos puede realizarse en microstepping, permitiendo una mayor resolución en el equipo. Un mayor número de pasos por revolución del motor permite un posicionamiento más preciso del mismo (por ejemplo controlando un motor de 0,9° pasos por rev. como es nuestro caso en microstepping a $\frac{1}{4}$ de paso tendríamos 1600 pasos por revolución). Dicho control se realiza mediante una energización de las bobinas del motor con corrientes intermedias. Cabe resaltar sin embargo que, si bien el posicionamiento es más preciso en microstepping, dichos pasos intermedios son inestables ante el desbloqueo del mismo.

Teniendo en cuenta la Figura 346 a continuación se muestra la resolución máxima alcanzable mediante los distintos modos de microstepping que ofrece los drivers DRV8825, es decir mediante la conexión de los pines ubicados en la esquina superior izquierda (M0, M1, M2);

MODE0 (M0)	MODE1 (M1)	MODE2 (M2)	Microstep Resolution
Low	Low	Low	Full step
High	Low	Low	Half step
Low	High	Low	1/4 step
High	High	Low	1/8 step
Low	Low	High	1/16 step
High	Low	High	1/32 step
Low	High	High	1/32 step
High	High	High	1/32 step

Tabla 11: Distintos modos de control de los motores paso a paso [Fuente: Elaboración propia].

De manera que, el control de los motores pasos a paso mediante el empleo de estos drivers de la marca Pololu permite variar la resolución de los motores desde full step (un paso completo 400 por revolución) hasta 1/32 steps, es decir en microstepping (12800 por revolución).

Control de los impulsos.

El control completo de los motores como ya se ha comentado se realiza a través del microcontrolador (Arduino Due), en donde cada pulso aplicado por el mismo corresponde a un paso del motor o un microstep según esté éste conectado al driver. Por otra parte, la dirección es también seleccionada mediante la aplicación de un pulso al pin DIR del driver. De manera que, el control de los motores se realiza mediante dos salidas digitales del Arduino pines 9 y 8 por ejemplo.

Por otro lado, el driver cuenta con otros tres diferentes inputs en la esquina superior izquierda con los cuales es posible controlar sus estados de energía, es decir: el ENABLE que permite habilitar o deshabilitar el motor (high = motor activo eje bloqueado, low = eje libre). El RESET el cual permite resetear el driver y finalmente, el SLEEP el cual generalmente va conectado al pin del reset.

Así pues, para el control de estos actuadores tenemos que: la frecuencia de los pulsos generado por el microcontrolador por una de sus salidas digitales (9) que entra en la placa de arranque del motor por el pin STEP determinará la velocidad de giro del motor, mientras que el sentido del giro vendrá determinado por la salida 8 del microcontrolador que entra por el pin DIR del driver.

Microcontroladores (Arduino).

Los Arduino son una plataforma de código abierto utilizada para la construcción de proyectos de electrónica. Arduino consiste en una placa de circuito programable física (a menudo denominada microcontrolador) y una pieza de software, o IDE (Entorno de desarrollo integrado) que se ejecuta en un ordenador y que se usa para escribir y cargar los códigos de un programa en la placa física.

La plataforma Arduino se ha vuelto muy popular entre la comunidad makers en los últimos años, donde los programas escritos en una versión simplificada de C++ se cargan directamente en la placa. En este aspecto en el equipo Nhibrid32D se ha utilizado dos placas de Arduino, aunque en el microcontrolador principal o Arduino Due (ver Figura 348) recae el control total del equipo, siendo el segundo controlador o Arduino Uno un microcontrolador auxiliar empleado únicamente para visualizar a través de un display la temperatura de funcionamiento del cartucho Inkjet.

A modo de ejemplo y pese a que en el recurrimos a un Arduino uno, a continuación se muestran esquemáticamente las conexiones empleadas para el control de los motores involucrados en el sistema DLP del equipo Nhibrid32D, es decir, los responsables del movimiento coordinado de los elementos Wiper y plataforma de construcción correspondientes a los ejes X'' y Z'' respectivamente.

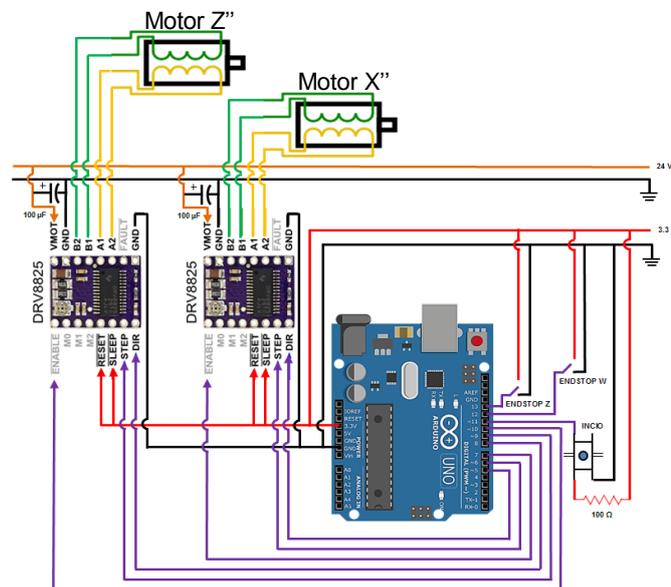


Figura 347: Representación esquemática sistema de control empleado para el sistema DLP del equipo Nhibrid32D [Fuente: Elaboración propia].

En la imagen de a continuación (Figura 348) se puede apreciar parte de la electrónica responsable del accionamiento y control de los elementos actuadores capaces de proporcionar movimiento al equipo a través del microprocesador del equipo de impresión híbrido (Arduino Due). La conexión de los distintos elementos empleados como son los

motores paso a paso y sus correspondientes drivers fueron llevados a cabo inicialmente en un protoboard para posteriormente constituir las placas electrónicas correspondientes.

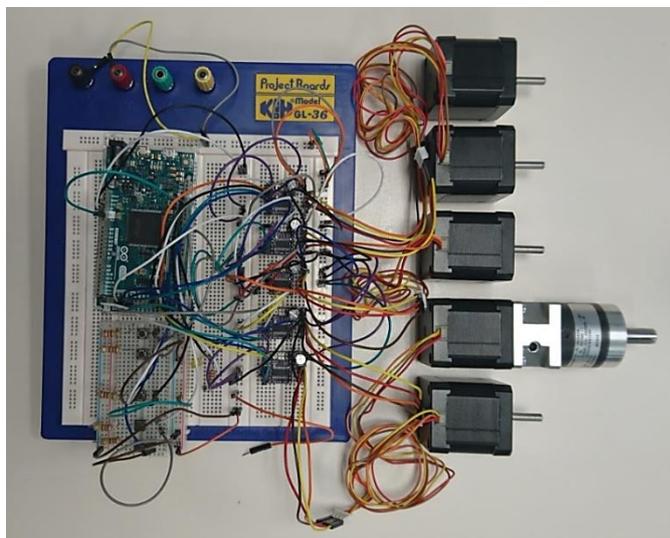


Figura 348: Protoboard responsable del control de los motores paso a paso del equipo Nhibrid32D [Fuente: Elaboración propia].

Como puede apreciarse en la imagen de la figura anterior el equipo Nhibrid32D está constituido por 5 motores siendo todos iguales excepto el del carro Inkjet, es decir, todos motores paso a paso NEMA 17 de 0.9° de giro por paso proporcionados por la empresa NANOTEC en concreto el modelo ST4209L1204. El motor del carro Inkjet por otro lado, capaz de proporcionar al sistema la posibilidad de desplazarse en dirección al eje X, se encuentra provisto de un sistema reductor, con una relación de transmisión de 1/10 es decir, motor NEMA 17 ST4209L1204 unido al reductor GPLE40-1S-10.

De manera que, el control de los mismos se ha llevado a cabo como si en realidad fuesen 4 motores independientes ya que, como ya se ha comentado, el desplazamiento del carro de impresión en dirección al eje Y se realiza mediante dos motores acoplados a sendos husillos en paralelo y por tanto, ambos son síncronos y dependientes.

A continuación, se resume por movimiento los elementos constructivos del equipo:

Eje X (Wiper):

- Nema 17 ST4209L1204 (Nanotec).
- Driver Drv 8825 (Pololu).
- Condensador 50V 100 μ F.
- Endstop.
- Correa 2GT (6 mm ancho).
- Poleas GPA32GT2060 AP5 (Misumi).
- Patín MGN 12C (Hiwin) con rail de L300 mm.

Eje Z (Plataforma de construcción):

- Nema 17 ST4209L1204 (Nanotec).
- Driver Drv 8825 (Pololu).
- Condensador 50V 100 μ F.

- Endstop.
- Patín RGH15CA con rail de 300 mm. (Tecnopower)
- Husillo BSS1505 (Longitud 350, diámetro 15 y paso 5 mm) (Misumi).
- Soportes C-BSW12 SET (Misumi)
- Coupling GCPS26 5-10 (Misumi)

Movimiento eje X (Carro de impresión):

- Nema 17 ST4209L1204 (Nanotec).
- Driver Drv 8825 (Pololu).
- Condensador 50V 100 μ F.
- Endstop.
- Reductor GPLE40-1S-10 (Nanotec).
- Correa 2GT (6 mm ancho).
- Polea GPA40GT2060 A-N10 (Misumi).
- 2 Ejes de 8 mm.
- 4 Linear bearing de 8 mm de diámetro.

Movimiento Eje Y (Carro de impresión):

- 2 Nema 17 ST4209L1204 (Nanotec).
- Driver Drv 8825 (Pololu)
- Condensador 50V 100 μ F
- Endstop.
- 2 Patín RGH15CA con rail RGR15T de 390 mm. (Tecnopower)
- 2 Husillo BSS1205-RLC (Longitud 450, diámetro 12 y paso 5 mm) (Misumi).
- 2 Soportes C-BSW10 SET (Misumi)
- 2 Coupling GSACL16 5-8 (Misumi)

Volviendo al control del equipo, en cuanto al sistema Inkjet, el control del sistema DOD se ha realizado mediante la generación de tres señales de control, es decir; como se puede apreciar en el capítulo 2 donde se abordan en detalle. Estas son: la de eyección, de menisco y de calefacción. La señal de eyección cuya forma de onda es diseñada en función de la reología del fluido se genera mediante el empleo de secuenciadores LTC6993.

Los secuenciadores generan en su salida un pulso a partir de un flanco de subida de entrada (en el caso de LTC6993-1) o de bajada (en el caso de LTC6993-3). Los secuenciadores se encuentran conectados en cascada, es decir, la salida de uno se conecta a la entrada del siguiente, produciéndose un tren de pulsos de amplitud 5V.

Para generar el primer pulso del tren se ha conectado un temporizador NE555 en la entrada del primer secuenciador (LTC6993-1). Este temporizador genera pulsos con un ancho y una frecuencia regulables e iniciará un tren de pulsos en cada flanco de subida, de manera periódica. De forma que, a través de éste, podemos regular el drop spacing bajo el supuesto de tener una velocidad de desplazamiento del carro Inkjet constante. El flanco de bajada del primer pulso generará la activación del segundo secuenciador (LTC6993-3) y el flanco de bajada de éste generará la activación del tercero y así sucesivamente. El nivel del último pulso se mantendrá hasta el siguiente tren de pulsos, el cual será solicitado por el algoritmo de control y tendrá lugar cuando el temporizador lo permita.

La duración de los pulsos de cada secuenciador es regulable, la anchura de los mismos se controla mediante una resistencia conectada al pin SET de cada secuenciador los cuales

tienen una amplitud de 5V. La salida de cada secuenciador se amplificará mediante dos transistores 2N7002, que suministrará una fuente de tensión regulable, y que determinará la amplitud de cada uno de los pulsos que constituyen la señal de eyección (la magnitud de los mismos define el nivel de deformación de los actuadores piezoeléctricos existente en las correspondientes cámaras de bombeo). Finalmente, en el sistema de control de los cartuchos Dimatix DMC-11610 empleados se ha conectado un amplificador operacional LT1210 como seguidor para adecuar la señal de control a la salida de la carga y compensar la impedancia de los mismos. En la Figura 349 (a) se muestra el esquema del circuito comentado.

En la Figura 349 (b) se muestra el resultado de la simulación del circuito mediante el simulador “LTspice”, representándose la salida del circuito (V00) en un único ciclo y con una forma de onda aleatoria (distinta a la empleada). En dicha simulación se ha considerado la carga producida por los 16 actuadores piezoeléctricos como 16 condensadores (de 1nF) en paralelo, conectados a una resistencia de 1 Ohm en serie. Comprobándose que la conexión de la carga con la forma del tren de pulsos no presenta deformación gracias al amplificador operacional previamente resaltado.

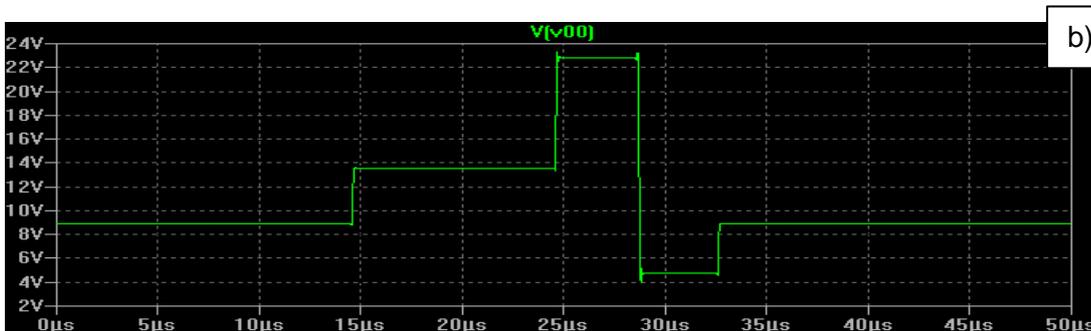
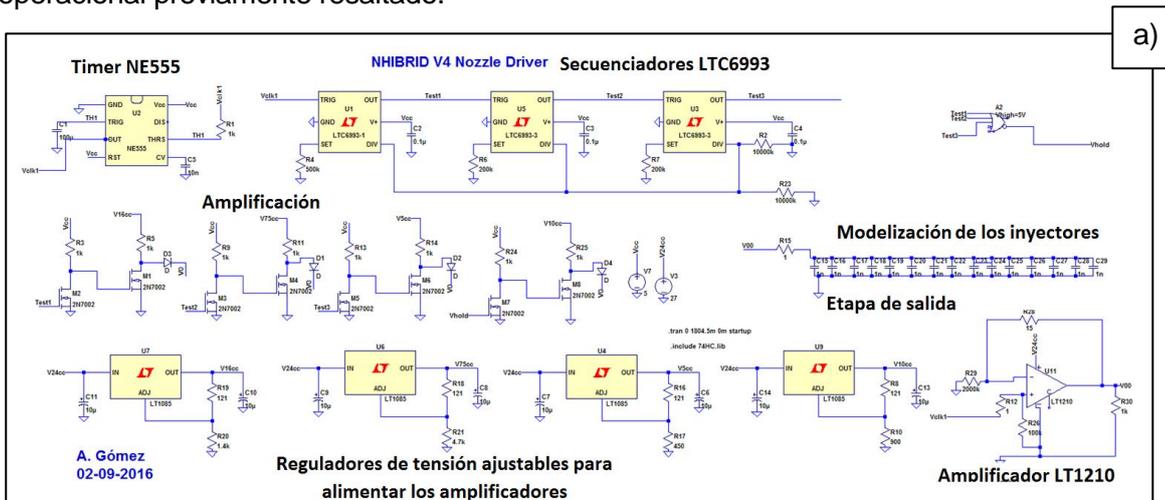


Figura 349: (a) Esquema de la electrónica diseñada para generar el tren de pulsos del sistema Inkjet. (b) Señal generada en la simulación [Fuente: Elaboración propia].

Inicialmente, la implementación de los distintos circuitos electrónicos anteriormente comentados tanto para el control de los distintos elementos móviles como del sistema Inkjet, se llevaron a cabo por separado y recurriendo al uso de protoboards. Situación que una vez culminada la etapa de diseño se optó por su sustitución a placas electrónicas diseñadas y fabricadas para dichas funciones. Sin embargo, el control del equipo se mantuvo fundamentado en el empleo de los microcontroladores Arduino.

Por otro lado, a continuación se muestra en la Figura 350 en una etapa inicial como se establecieron las conexiones requeridas para el control de los cartuchos Inkjet empleados. El carácter sustituible de los mismos instó sin embargo, a mejorar dichas conexiones una vez se validó su control.

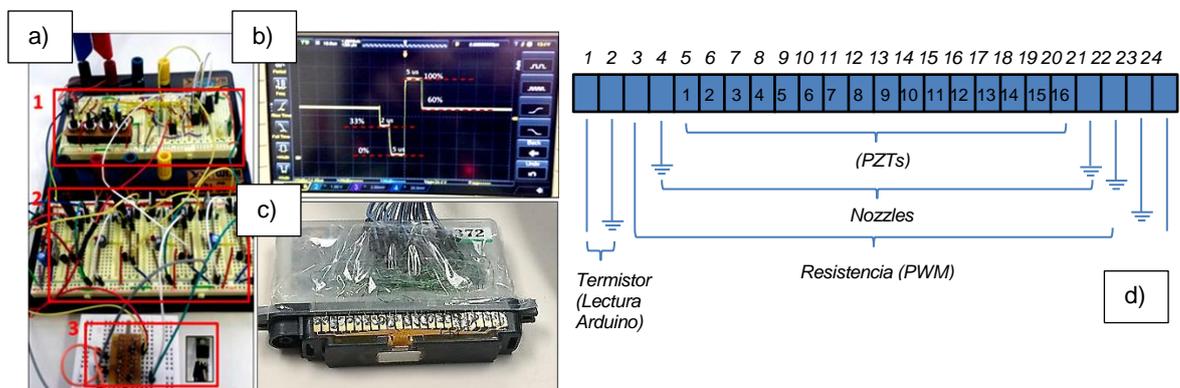


Figura 350: Circuito electrónico mostrado de la Figura 349 en un estado inicial, capaz de generar el tren de pulsos (señal de eyección), implementado en un protoboard de forma separada (a1: control temporal de los pulsos, a2: control de la magnitud de los pulsos, a3: unión y salida de los mismos en una única señal). Forma de la señal de eyección aplicada en la generación de las gotas de tinta de plata ANP almacenada en el interior de los cartuchos DIMATIX DMC-11610 (b) e imagen de las conexiones eléctricas de los mismos al sistema de control (c). Finalmente, representación esquemática de las funciones de cada uno de los pines del cartucho (d) [Fuente: Elaboración propia].

3.2.5. Múltiples sistemas de impresión integrados en un equipo híbrido multimaterial.

El sistema que aquí se ha expuesto representa un primer paso en el desarrollo de sistemas de impresión híbridos multimateriales en los cuales se pueden combinar varios sistemas de reproducción digital. En este caso se ha integrado un sistema Inkjet a un sistema DLP, al cual a su vez se le podrían añadir otros, como un sistema DW o FDM. En el caso que nos ocupa por otro lado, los elementos reproducidos son bimaterial, aunque dicho sistema reproductor abre la posibilidad de combinar un mayor número de materiales mediante el uso de múltiples depósitos de resinas y tintas. La combinación de un mayor número de variables

y en distintas graduaciones plantea nuevas posibilidades y aplicaciones para estos sistemas de fabricación aditiva.

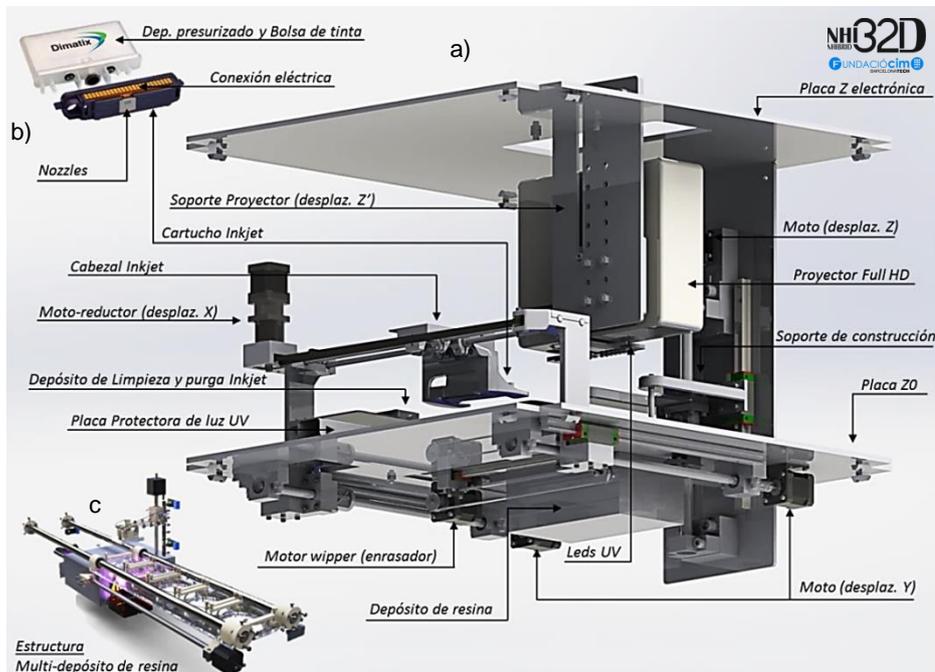


Figura 351: Sistema actual monodepósito de resina y monocartucho o en su defecto monocabezal (a). Vista del cartucho utilizado (b) [27] y a modo de ejemplo un carrusel de múltiples depósitos dispuestos en línea adaptado para un sistema DLP de configuración bottom-up (c) [29].

En el uso de múltiples depósitos de resinas fotosensibles, como ya se ha comentado en el capítulo anterior ya existen precedentes, en concreto para la tecnología SLA e incluso más recientemente en la tecnología DLP. En este aspecto entre los últimos desarrollos se plantea el uso un sistema automatizado de múltiples cubas dispuestas en un carrusel rotatorio dotado de una etapa intermedia de lavado y secado. De modo que, gracias a una secuencia de pasos en donde por cada capa “i” se sumerge la plataforma de construcción en el número de cubas N, siendo este número, el número de elementos involucrados en dicha capa “i”, es posible combinar los materiales contenidos en las múltiples cubas existente y con distintas graduaciones, asociados a la densidad de los mismo en cada capa. Y para que no se produzca la contaminación de dichos depósitos durante el proceso de reproducción entre los cambios de material, estos sistemas multidepósito recurren a una etapa intermedia de limpieza generalmente por ultrasonidos y de secado por ventilación forzada o de evaporación de solventes.

Paralelamente a este hecho la integración de sistemas DW en sistemas de impresión tridimensionales como los de estereolitografía, también han sido estudiados con anterioridad y dado el enorme potencial que ofrecen y más gracias a los avances en los métodos de dispensación de tinta o de la sustancia impresa, dicha combinación ha suscitado el interés

de muchos. En este aspecto, la tecnología FDM también se ha visto combinada con sistema DW. La empresa VOXEL-8 spin-off de la Universidad de Harvard supone un ejemplo claro a dicho fenómeno.

La integración de un sistema Inkjet y en concreto un accionado por piezoeléctrico cuya particularidad además de ser DOD, es la de permitir eyectar materiales con menores restricción y limitaciones. Supone a saber una novedad, en la que cabría destacar la rapidez de los sistemas DLP y su precisión a bajo coste junto con la versatilidad de los sistemas Inkjet, también a unos costes relativamente bajos.

Por otro lado, el carácter modular de los cabezales de impresión o en su defecto de los cartuchos tan comúnmente utilizados en los sistemas domésticos a través de la cuatricromía CMYK, permite la integración de múltiples cartuchos dispuestos en línea o en un carrusel circular ubicados en secuencia y tras una deposición de múltiples materiales funcionales superpuestos, combinados y en distintas graduaciones reproducir elementos con profundidad de materiales, siendo éstos a sus vez dispuestos sobre un sustrato multimaterial, aportando una enorme versatilidad a los sistemas de reproducción digital.

Por otra parte, las distintas pruebas realizadas con el presente sistema híbrido multimaterial evidencia las necesidades de la fabricación aditiva en el desarrollo de materiales susceptibles a ser impresos, siendo esta una de sus flaquezas. Hasta la fecha se ha conseguido la reproducción de pistas conductoras de un espesor inferior a 200 μm sobre distintos sustratos fotopolimerizados, con capas de entre 25 y 50 μm de espesor. Se ha validado la posibilidad de conexión entre dos capas conductoras superpuestas y alternadas por una de resina fotopolimerizada y por tanto la posibilidad de realizar circuitos tridimensionales inmersos en una geometría tridimensional personalizable en la cual tras la introducción de chips SMD, es posible dotar a los elementos reproducidos de nuevas propiedades y una posible conexión al mundo digital, agregando un mayor valor añadido a los mismos.

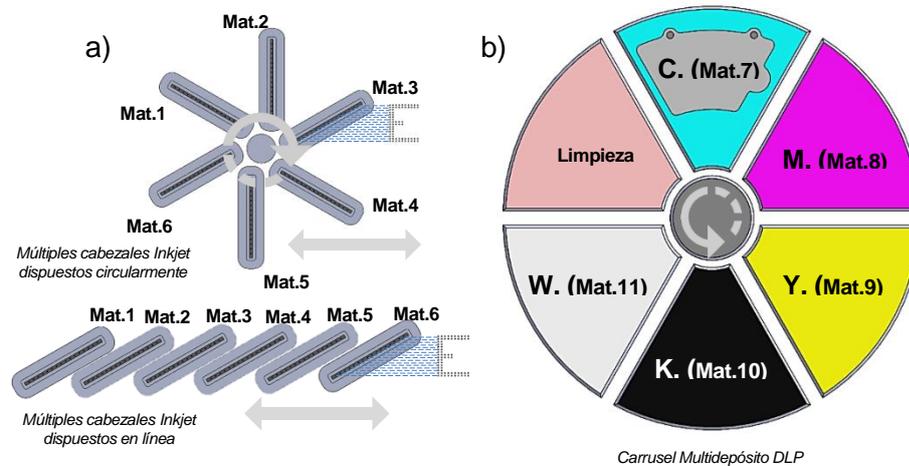


Figura 352: Diagrama conceptual de equipo de impresión híbrido que bajo la combinación de DLP + Inkjet es capaz de reproducir partir de un archivo digital elementos constituidos por

múltiples materiales combinados y en distintas graduaciones (a). Distintas configuraciones de los cabezales en el carro de impresión (b). Múltiples depósitos dispuestos en un carrusel rotatorio del sistema DLP de configuración Top- Down [Fuente: Elaboración propia].

Bajo el concepto de máquina híbrida, si la combinación a través de la cuatricromía CMYK de un sistema doméstico de impresión bidimensional puede llegar a reproducir digamos, 2^{24} colores distintos sobre un sustrato plano (papel) bajo una profundidad de color dada. Por ser éste un sistema de reproducción tridimensional fundamentada en la tecnología Polyjet capaz de combinar las tintas CMYK-W-A... que, bajo una misma profundidad de color da origen a un número mayor de combinaciones posibles en cada vóxel (propiedades ópticas en este caso, extrapolables a otros atributos). Estas propiedades se convierten en locales, ya que debido a la hibridación pueden ser combinables con múltiples sustratos generados por la tecnología DLP, que debido a la fotopolimerización discreta de los mismos y de los materiales existentes en las cubas, pueden ofrecer nuevas y distintas propiedades y atributos en combinación y graduación. Por ejemplo, capaces de sustentar, envolver o cubrir, puntos, líneas, patrones, imágenes, superficies o geometrías con propiedades complementarias a las generadas por la deposición Inkjet.

En definitiva, la aportación de una mayor flexibilidad no solo en cuanto a capacidades geométricas y cromáticas sino extrapolables a materiales y sus funciones, cualesquiera que sean estas.

Sin embargo, al ser la tecnología DLP una en donde la deposición del material se realiza por capa y no por punto o línea, la reproducción de una capa de un elemento tridimensional constituida por más de uno de los materiales contenidos en los depósitos del carrusel requiere de una etapa intermedia de limpieza, afín de no contaminar los demás depósitos y/o dejar una superficie tal que permita una deposición satisfactoria de los materiales depositados por el sistema Inkjet o por un sistema DIW. Esta eventualidad, sin embargo, eleva enormemente el tiempo de fabricación del elemento a reproducir, que, si bien ofrece mucha flexibilidad, su productividad se ve cuestionada por dicha limitación, ya que se requiere 3 pasos (limpieza, consolidación, limpieza) por material del carrusel contenido en cada capa (constituida por píxeles) del elemento a reproducir.

De forma que, reproducir un objeto de 500 capas por ejemplo en donde se combinen por capa las 5 variables o materiales existentes en el carrusel, requerirá de 5x500 etapas, es decir, etapas en las cuales hemos de: primero sumergir la plataforma, segundo exponerla a una potencia lumínica durante un determinado tiempo proporcional a la profundidad de capa a consolidar y su grado de conversión (polimerización), tercero subir la plataforma de construcción a una cota tal que permita el giro del carrusel multidepósito, cuarto rotar el carrusel multidepósito, quinto inmersión de la plataforma en un sistema ultrasónico de limpieza, sexto limpiar la capa en construcción, séptimo volver a subir la plataforma de construcción a dicha cota previa, octavo volver a rotar el carrusel multidepósito a un nuevo

material proceso que puede llevarse a cabo en paralelo al secado de la capa previamente limpiada ya sea por evaporación de solventes o por recirculación de aire forzado, y finalmente repetir estas etapas tantas veces como materiales contenga los pixeles que constituyen las capas del elemento a reproducir.

Los sistemas de deposición por punto (como los sistemas Inkjet) en este aspecto puesto que la deposición es a voluntad y de forma discreta no ofrecen dicha limitación permitiendo la combinación de materiales de forma mucho más eficiente. El ejemplo de máquina híbrida mostrada en las imágenes de a continuación (ver Figura 353) han sido tomas de la solicitud de patente europea 18382697.3 surgida a raíz de la presente tesis.

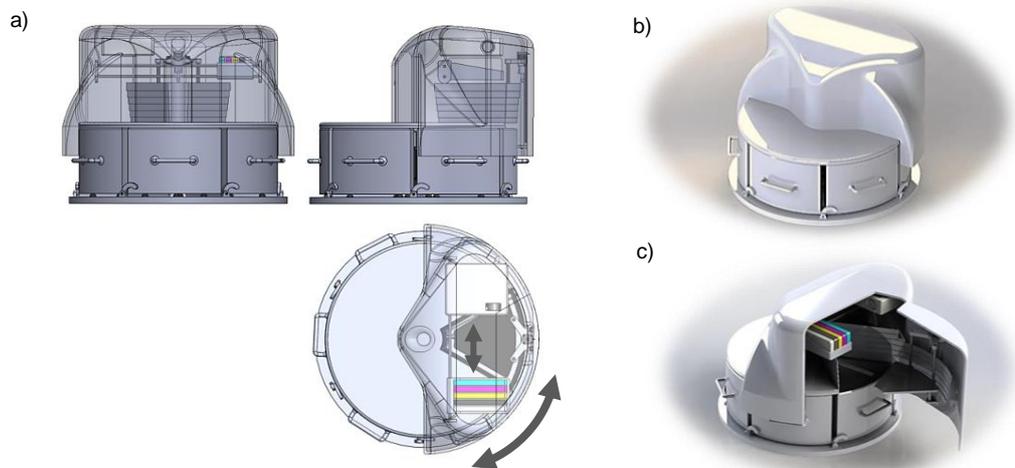


Figura 353: Imagen conceptual de una máquina híbrida multimaterial en la que se combinan los sistemas MIP-SL + Inkjet PIJ+ DIW, ofreciendo una gran versatilidad gracias a una cúpula rotativa respecto a un conjunto de depósitos fijos e intercambiables. Vista frontal, lateral y en planta del equipo concepto mencionado (a), vista en perspectiva renderizada del mismo (b) y en detalle apertura de la puerta trasera (c) [Fuente: Elaboración propia].

Capítulo 4

4.1. INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se exponen algunas de las pruebas y piezas fabricadas con el sistema híbrido multi-material de impresión 3D desarrollado en el proyecto de investigación Nhibrid32D siguiendo la cronología del desarrollo del mismo. A través de estos demostradores se pretende evidenciar las capacidades y funcionalidades del equipo híbrido como ejemplo de la impresión funcional dentro de la fabricación aditiva.

El funcionamiento de este sistema híbrido da muestra de la aplicación de los fundamentos expuestos en capítulos anteriores, que gracias a la integración del sistema de impresión tridimensional por tecnología DLP permite añadir una tercera dimensión al printing electronics fundamentado en la deposición de materiales en régimen de eyección de forma discreta y a voluntad.

En la fabricación de los demostradores que a continuación se presentan se ha contado con la participación de expertos en distintas áreas, por lo que en ellos se aúna un conjunto de conocimientos y experiencias que por su carácter multidisciplinar no pueden ser abarcados totalmente en la presente tesis, por lo que si las explicaciones que en este aspecto le resultan al lector escasas, se le pide disculpas, no obstante en algunas cuestiones no todo ha sido expuesto afín de no alargar en demasía el presente documento.

Finalmente, en este documento se exponen algunas reflexiones sobre la investigación llevada a cabo, y se proponen algunas líneas de investigación que a opinión del autor le han parecen interesantes con el afán seguir de contribuyendo en el desarrollo de la fabricación aditiva. Por último, se expone algunas de las patentes, publicaciones y participaciones en congresos que fruto de este trabajo de investigación han tenido lugar.

4.2. DEMOSTRADORES

A continuación, se muestra de forma separada algunas de las pruebas llevadas a cabo con el sistema híbrido multi-material de impresión 3D desarrollado en el proyecto de investigación Nhibrid32D, en este aspecto y, en primer lugar, se muestra la progresión en el control del sistema del sistema Inkjet y algunas de las reproducciones bidimensionales llevados a cabo por dicho sistema sobre diferentes sustratos. Posteriormente, se muestra las pruebas realizadas con el sistema de impresión tridimensional basado en la tecnología DLP junto con el empleo de distintas resinas y barbotinas. Finalmente, gracias a la integración de ambos, se exponen algunas piezas fabricadas, los problemas a los que se ha tenido que hacer frente y algunas de las piezas objetivo que en un período relativamente corto de tiempo se pretenden fabricar afín de validar las capacidades y funcionalidades del equipo híbrido como ejemplo de la inmersión de la impresión funcional en la fabricación aditiva.

4.2.1. Reproducción de patrones e imágenes bidimensionales a través del sistema de deposición de materiales por tecnología Inkjet DOD del tipo PIJ.

En este apartado se muestra cronológicamente mediante las pruebas realizadas con el sistema Inkjet, la evolución en el control del mismo. En concreto unas de los primeros patrones que se consiguió reproducir de forma relativamente satisfactoria, fue la del circuito mostrado a continuación (ver Figura 354), dicha imagen bidimensional fue descargada de la web, es decir, como un archivo digital de extensión jpg (Joint Photographic Experts Group) y tras varios intentos reproducida sobre múltiples sustratos.

La impresión de dicha imagen digital se llevó a cabo mediante la deposición secuenciada de gotas de 10 pL de tinta de plata ANP silverjet DGP HRA, a eyectadas a 37,55°C a una velocidad de eyección teórica estimada 4,4 m/s y a una frecuencia de 1.250 Hz. El desplazamiento del carro de impresión por otra parte, se fijó a 50 mm/s en donde cada paso del motor-reductor desplazaba 20 μm dirección X cada 437 μs . En dirección Y por otro lado en esta prueba inicial, cada paso del motor desplaza de forma discreta al carro de impresión 12,5 μm , lo que supuso con un nozzle activo de un “drop spacing” en X de 40 μm y en Y de 37,5 μm .

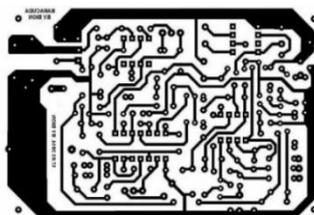


Figura 354: Imagen reproducida sobre distintos sustratos [Fuente: elaboración propia].

La primera reproducción de la imagen anterior fue llevada a cabo sobre un papel corriente poroso de 80 gramos. Las imágenes mostradas a continuación dan fe de ello y evidencian como los fenómenos capilares dificultan y distorsionan la reproducción de la imagen sobre éste a altas resoluciones.

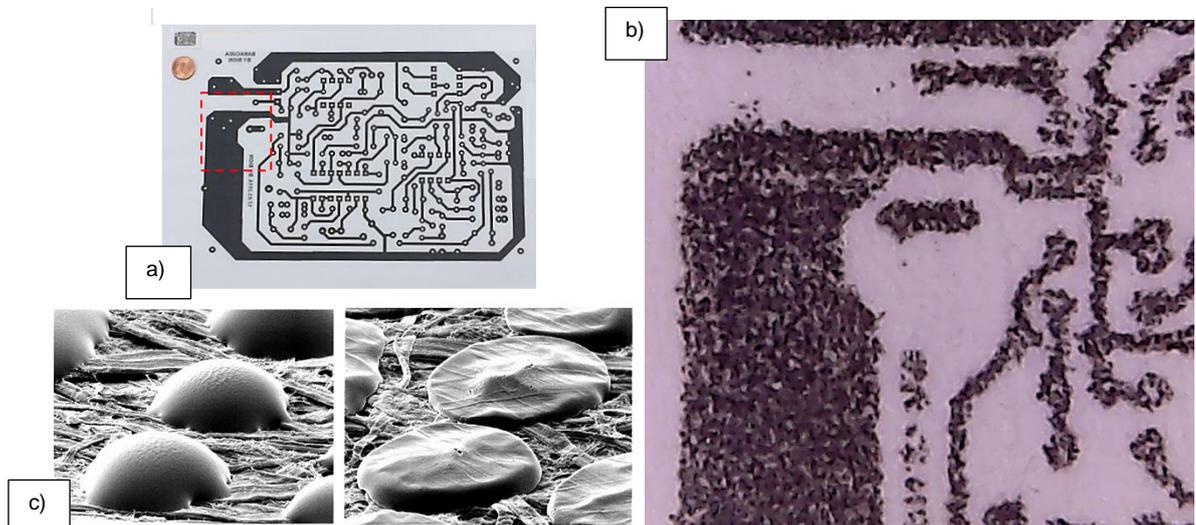


Figura 355: Dimensiones relativas del circuito reproducido; Imagen impresa sobre un folio Din A4 de 80 gramos por una impresora doméstica, y arriba a la derecha circuito impreso por el sistema Inkjet desarrollado sobre el mismo sustrato y debajo de ésta una moneda de un céntimo de euro (a). Vista ampliada de la zona resaltada, en la reproducción llevada a cabo con el sistema desarrollado (b). Imagen representativa de las gotas de tinta depositas sobre las fibras del papel y la evolución de estas por los fenómenos capilares(c) [30]

[Fuente: elaboración propia].

A través de las imágenes anteriores se puede llegar a estimar aproximadamente las dimensiones y la capacidad de detalle de la imagen reproducida con el sistema desarrollado para el equipo Nhibrid32D. Por otro lado, mediante las imágenes tomadas de [30] es posible intuir como las gotas depositadas interaccionan con el sustrato fibroso y poroso tras su impacto.

Después de solventar y superar algunos problemas de gotas satélites, y pese a que la densidad de puntos por área es insuficiente, se puede apreciar como la deposición de las gotas a través de un único nozzle activo, se llevó a cabo en la posición prevista tras realizar el proceso de eyección, vuelo e impacto, los fenómenos capilares por otra parte, fomentan una ligera distorsión de la imagen impresa.

Los patrones reproducidos reflejan una alta fidelidad pese a que no existe continuidad entre las pistas. Afín de superar dicha eventualidad a continuación, se muestra pruebas subsiguientes realizadas sobre una superficie más hidrofóbica. A tal fin la reproducción de la imagen anterior que hace alusión a un circuito se llevó a cabo sobre una lámina de cristal o porta muestras.



Figura 356: Dimensiones relativas del circuito inicial reproducido sobre lámina de cristal o porta muestras [Fuente: elaboración propia].

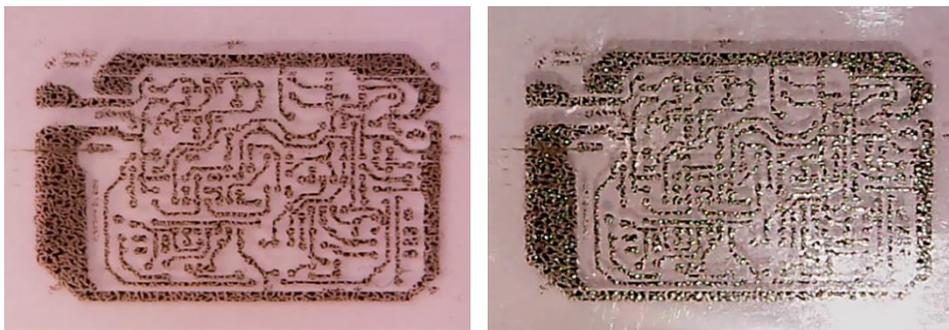


Figura 357: Detalle ampliado del circuito, depósitos húmedos, reproducción monocapa [Fuente: elaboración propia].

Bajo las mismas condiciones anteriores donde el número de puntos o gotas por unidad de superficie era insuficiente, la cohesión de las gotas adyacentes ahora sobre un sustrato más hidrofóbico muestra la generación de agrupaciones discontinuas, por tanto, imposibilita la generación cordones continuos y en consecuencia la correcta reproducción del circuito sobre este sustrato. Tras ser expuesto a 50°C durante 10 horas, las partículas de plata fueron fijadas tras la evaporación completa de los solventes (la fase líquida de la suspensión), es decir, tras el curado de la tinta por temperatura (ver imágenes siguientes).

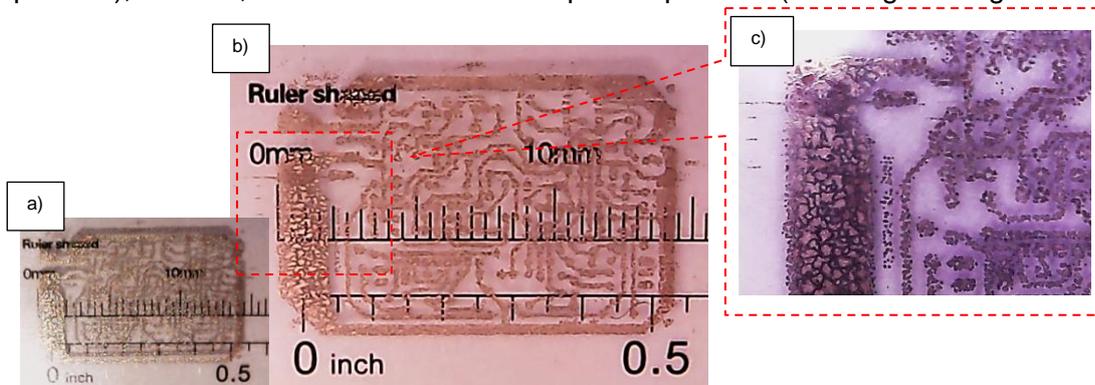


Figura 358: Imagen del circuito reproducido sobre cristal tras el curado de la tinta, el reflejo de la luz y el brillo de la imagen constatan la presencia de plata en el depósito (a). Detalle

del mismo referenciado a una escala milimétrica (b) y zona ampliada en detalle de la imagen reproducida(c) [Fuente: elaboración propia].

A través de las imágenes anteriores podemos apreciar que el circuito reproducido posee un ancho de 14,35 mm aproximadamente, lo que en realidad se ajustó notablemente a las dimensiones preestablecidas digitalmente. Por otro lado, los depósitos de tinta sobre el sustrato de cristal tras ser curados seguían siendo discontinuos, por tanto, eléctricamente no eran capaces de transmitir corriente.

Con el objetivo mejorar la continuidad de las pistas reproducidas, posteriormente se realizó una nueva prueba, en donde con el mismo drop spacing o la misma densidad de puntos por área se reprodujo la imagen mediante la superposición de tres capas sobre el mismo sustrato. Por otro lado, afín de mejorar la velocidad de secado de las tintas, éstas fueron ligeramente diluidas con isopropanol, en donde ciertamente modificaron la reología de la tinta de plata ANP y redujeron la velocidad de curado, pero sus depósitos fueron más heterogéneos. A continuación, se muestra la reproducción del mismo circuito sobre el vidrio de un porta muestras.

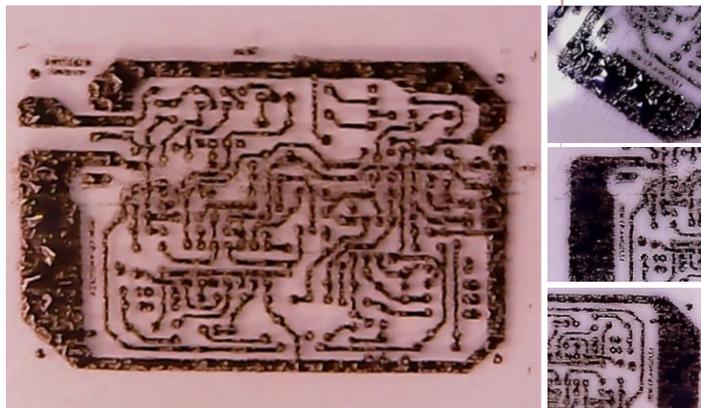


Figura 359: Depósito húmedo multicapa: 3 capas de tinta sin curado intermedio sobre sustrato de cristal [Fuente: elaboración propia].

De nuevo, la fuerza cohesiva de las gotas adyacentes junto con la poca mojabilidad del sustrato fomentó la aparición de agrupaciones discretas sobre éste, modificando la huella de las gotas y su línea de contacto. Por otra parte, afín de mejorar la precisión de la deposición y reducir la variabilidad introducida al sistema por las corrientes de aire durante la trayectoria parabólica que describen las gotas tras ser eyectadas, en esta reproducción se redujo la distancia del cabezal Inkjet respecto al sustrato. La falta de paralelismo entre la plataforma de construcción impresa en 3D por FDM (sustento de la lámina de cristal) y el cabezal sistema Inkjet hizo que el tornillo de sujeción del gatillo que permite la rotación del cartucho y por tanto de los nozzles, entrara en contacto con la superficie semiesférica de las gotas depositadas, este roce deformó la imagen y generó gotas satélites que distorsionaron la reproducción, situación que claramente puede apreciarse en las imágenes de a continuación, tomadas a tras luz gracias a la traslucidez del vidrio.

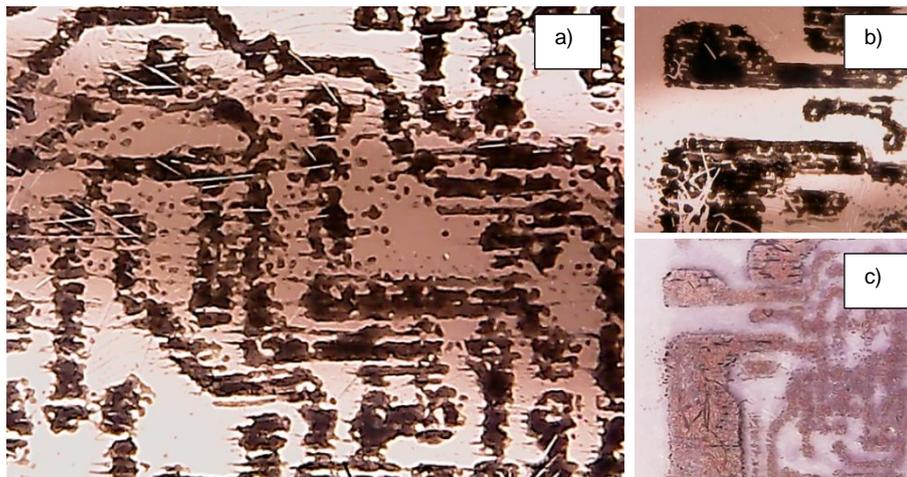


Figura 360: *Distorsión de la imagen por el contacto y arrastre del cabezal de impresión con aparición de gotas satélites (a). Detalle de una zona del circuito donde se aprecia la heterogeneidad del depósito (b). Imagen del depósito curado tras comprobar su continuidad en la más columna gruesa con la correspondiente ruptura de los depósitos de plata al estar poco curada (c) [Fuente: elaboración propia].*

En la prueba anterior el curado de las tres capas de tinta diluida se llevó a cabo en un horno a temperatura constante de 70°C durante 8h. La falta de continuidad de las pistas y la heterogeneidad de los depósitos llevo a descartar la posibilidad de utilizar tintas diluidas con menor proporción de nanopartículas de plata por volumen eyectado.

Continuando con la cronología de pruebas llevadas a cabo con el sistema Inkjet del equipo Nhibrid32D y ante las primeras experiencias, nos obligó a rediseñar la plataforma de construcción, parte del carro de Inkjet y a reducir el drop spacing en el eje Y. Teniendo en cuenta que estas primeras pruebas fueron llevas a cabo mediante el uso de elementos constructivos impresos tridimensionalmente por tecnología FDM (a modo de prototipo susceptibles a modificaciones) y teniendo éstos una tolerancia de 10 μm la suma de errores en la reproducción de las mismas fomentaban una cierta imprecisión mecánica, por esta razón tuvieron lugar algunos problemas, como la falta de paralelismo entre la plataforma de construcción y el carro de impresión Inkjet que, si bien imperceptible al ojo cuando la distancia entre ellas ronda como máximo entre 700 μm y como mínimo las 50 μm éstas influyen en las capacidades del sistema.

Superado el contacto y arrastre del tornillo de sujeción del gatillo del carro Inkjet con la plataforma de construcción a separaciones reducidas y, por otro lado, tras abandonar la idea de diluir la tinta con isopropanol afín principalmente de hacer rendir más la costosa tinta de plata. Bajo las mismas condiciones y reduciendo la distancia nozzle/sustrato, se intentó reproducir el circuito de prueba con resultados más satisfactorios, aunque la poca magnitud de la señal oscilatoria de menisco produjo la obturación del nozzle activo durante los periodos de espera en los que se produce la trasmisión de los datos del archivo digital en

bloques discretos. Esta obturación impidió la eyección de las gotas que constituyen el patrón reproducido a partir de una cota en el eje Y de la imagen bidimensional.

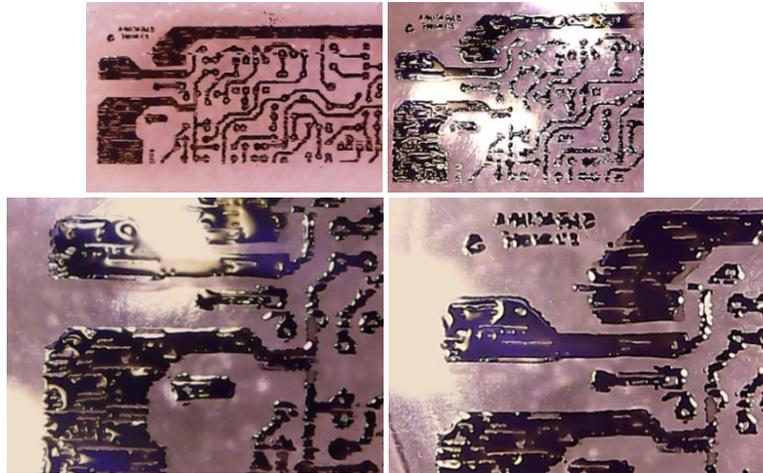


Figura 361: Superado el contacto y arrastre, circuito de prueba impreso húmedo con tinta no diluida monocapa sobre un porta muestras de cristal [Fuente: elaboración propia].

Como se puede apreciar la calidad de la reproducción se ha visto incrementada notablemente en esta prueba. La reducción las distorsiones que puede inducir el aire durante el vuelo de la gota se ha visto minimizado gracias a la cercanía del cabeza de impresión respecto al sustrato. Por otra parte, los problemas generados por la fuerza cohesiva de las gotas en este sustrato de poca mojabilidad persisten fundamentados en la baja densidad de gotas por unidad de superficie. Es por ello que, en la prueba que a continuación se muestra, con el objetivo de aumentar dicha densidad de puntos, se ha reducido el drop spacing en Y en un 33,33% pasando ahora de ser de 25 μm . Por último, es importante resaltar que en la imagen superior izquierda de la Figura 361 puede apreciar que la reproducción del circuito impreso se ha llevado a cabo de forma incompleta, deteniéndose a partir del tercer bloque de información a consecuencia de la obturación del nozzle activo.

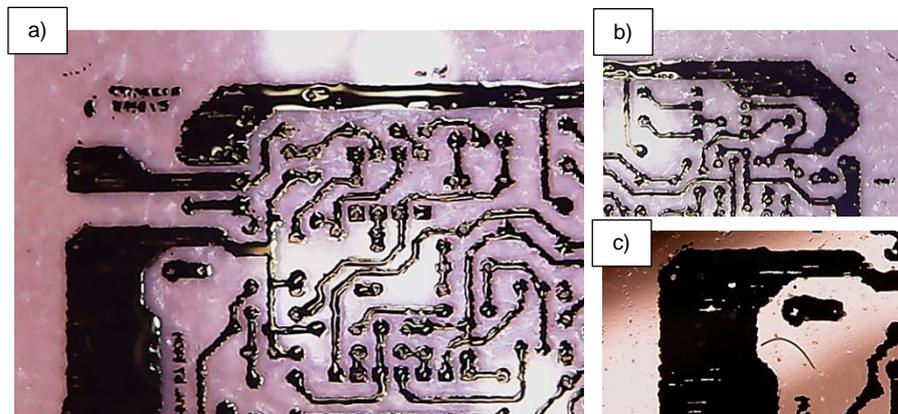


Figura 362: Reproducción del circuito de prueba con menor drop spacing en Y. Circuito húmedo monocapa sobre un porta muestras de cristal (a, b). Imagen ampliada de parte del circuito vista a contraluz (c) [Fuente: elaboración propia].

El ajuste en la magnitud de la señal oscilante de menisco que mantienen a éste vibrado cuando no se encuentra en proceso de eyección y afín de evitar que, influenciados por la temperatura, los posibles solventes de bajo punto de ebullición y alta tasa de evaporación de la suspensión que constituye la tinta empleada, al estar en contacto con el aire puedan obstruir el nozzle activo, permitió la reproducción completa del circuito de prueba en las condiciones deseadas. Por otra parte, cabe destacar la mejoría en la fidelidad de la reproducción, se trata de pistas de 200 micras de ancho reproducidas por gotas de 10 pL (dimensión que si bien se alcanzan en otros procesos de deposición de materiales como la serigrafía es cuanto menos costa de alcanzar), por otro lado, dicha resolución podría ser reducida en un factor de 10 mediante la sustitución del cartucho a uno equivalente del mismo proveedor capaz de eyectar gotas de 1pL. Tras la deposición de la tinta, el elemento reproducido se llevó a curar por temperatura a 70°C durante 8h, alcanzándose la fijación de la plata y posteriormente a 200°C durante 15 minutos donde se sinterizo ésta.

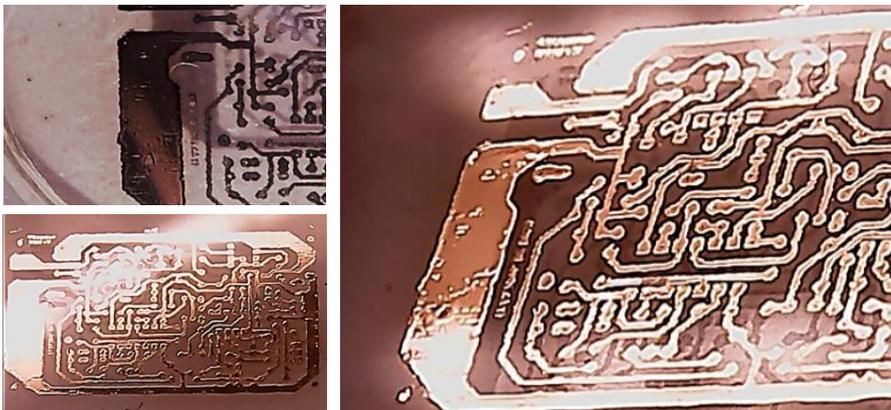


Figura 363: Imágenes del circuito reproducido y curado por temperatura, depósitos secos [Fuente: elaboración propia].

Cabe destacar que las pistas de 200 μm de ancho y un espesor aproximado de 300 nm reproducidas por una sola capa de tinta curada sobre este sustrato, presentaban una resistividad eléctrica de entorno a los $1,08 \cdot 10^{-6} \Omega/\text{m}$, aunque si bien la resistividad de la plata pura ronda a 20°C los $1,59 \times 10^{-8} \Omega/\text{m}$, dicha diferencia radica en que ésta, se encuentra depositada en forma de partículas y por tanto la unión de entre ellas una vez fijadas sobre el sustrato, presenta espacios y agujeros que reducen su conductividad eléctrica como ya se ha comentado en los capítulos precedentes. Por otra parte, en este caso como el sustrato es homogéneo químicamente, plano y no rugoso, éste puede considerarse como ideal no afectando en la reproductibilidad de las pistas, los efectos asociado al coffee-ring también puede comprobarse que, pese a que las nano-partículas de plata presentan una cierta tendencia a alojarse en el borde exterior de las huellas, este fenómeno no se presenta en gran medida en la tinta empleada siendo posible despreciarlo.

Tras ésta reproducción, afín de superar las incipientes discontinuidades horizontales se buscó mediante la superposición de capas mejorar la continuidad de las mismas, pero el exceso de volumen fomentó la aparición de protuberancias y éstas al modificar la línea de contacto deformaron las pistas que antes eran regulares distorsionando la imagen reproducida, las pistas adyacentes en algunos casos generaron puentes circuitando el circuito.



Figura 364: Reproducción bicapa sin curado intermedio del circuito de prueba con drop spacing en X,Y de 40 y 25 μm respectivamente, imágenes de los depósitos húmedos [Fuente: elaboración propia].

Las pruebas realizadas son consistentes con los trabajos de Duineveld [31] y posteriormente Smith et. Al [32] gracias a sus aportaciones sobre la reproducción de cordones continuos y estables mediante la deposición controlada de gotas, se pudo mediante experimentación establecer las condiciones que permitieron reproducir con mayor fidelidad los circuitos anteriores sobre un sustrato de papel y cristal. También se tuvo que tener en cuenta los mecanismos de curado, solidificación o cambio de fase de los depósitos afín de que éstos permanezcan fijos y sean conductores sobre los distintos sustratos.

Posteriormente sucesivas pruebas se llevaron a cabo sobre nuevos sustratos que, debido a que los sistemas de impresión Inkjet representan una tecnología rápida y precisa donde la deposición de los materiales se realiza sin contacto alguno con el sustrato, éste puede ser de cualquier tipo, y por tanto, en consecución con la línea cronológica de pruebas establecida, se prosiguió a la reproducción de dicho circuito de prueba sobre un sustrato plano de resina fotosensible previamente impreso tridimensionalmente gracias a la tecnología DLP del sistema de equipo Nhibrid32D. En este aspecto el primer sustrato empleado fue construido por resina polimerizada a un grado próximo a su máximo de la empresa *FunToDo del tipo Deep black*.

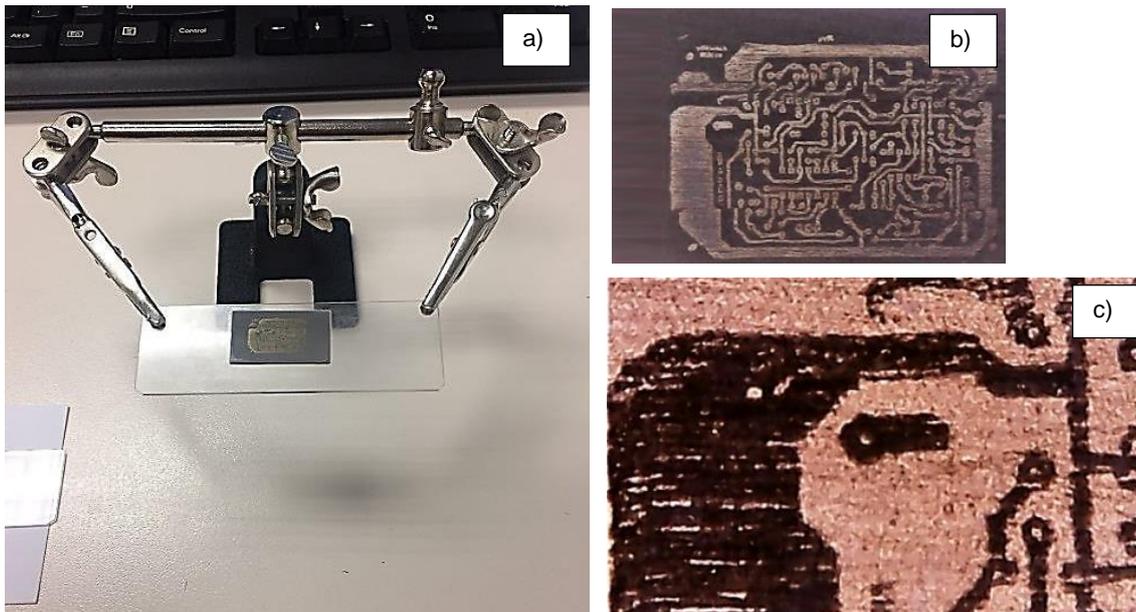


Figura 365: Reproducción del circuito de prueba sobre sustrato de resina fotosensible FunToDo Deep black polimerizado en una etapa previa. Dimensiones relativas del circuito y el sustrato iguales a las pruebas anteriores (a). Vista completa en plata del circuito (b). Imagen en detalle del área resaltada en pruebas anteriores (c) [Fuente: elaboración propia].

La introducción de un sustrato polimérico fotosensible que, previo a la deposición de las tintas ha sido solidificado gracias a una reacción físico-química tras ser irradiado por luz, añade una gran cantidad de variables a tener en cuenta, que complican y dificultan los estudios de mojado y en consecuencia las capacidades de reproducción del sistema Inkjet. Por ejemplo, plantea una serie de interrogantes; desde un punto de vista físico podemos preguntarnos, como es su rugosidad, qué atributos superficiales presenta, si es porosa, como es su comportamiento durante y tras el impacto, que tan rígida es, cambias sus propiedades al ser mojada por la tinta, etc., desde un punto de vista químico nos cuestionamos es homogénea, reacciona a la tinta o es inerte, etc. El análisis en detalle de todos estos fenómenos involucrados sin duda un tema interesante, no han sido abordados en esta tesis debido a su extensión, complejidad y amplitud disciplinaria, sin embargo, a través de la experimentación y con más o menos criterio se ha buscado optimizar las capacidades de reproducción del sistema Inkjet sobre este sustrato.

Las irregularidades presentes en el sustrato impreso por tecnología DLP como pueden ser apreciadas en la imagen ampliada de la Figura 365.c, fomentaron que la imagen reproducida muestre discontinuidades horizontales, ésta situación viene motivada por el rozamiento del papel absorbente que se utilizó para eliminar cierta humedad del sustrato previo a la deposición de la tinta, es por ello que la rugosidad del sustrato sigue un patrón o sentido horizontal. En consecuencia, las gotas depositadas sobre esta superficie rugosa se ven influenciadas tendiendo a evitar las crestas y a ubicarse en los valles de la misma,

configurando la forma que adopta las gotas depositadas y en consecuencia condicionando la reproducción. La mojabilidad por tanto de este tipo de superficies, viene determinada por múltiples ángulos de contacto que, por ser una superficie más hidrófila que la anterior, la modificación de la línea de contacto que delimita la unión trifásica durante la reconfiguración de las gotas adyacentes tras la transición dinámica del impacto, es menor lo que fomenta a que sea mejor la fidelidad de la reproducción. Por este motivo en la imagen ampliada de la Figura 365.c, podemos apreciar cómo se ha alcanzado a reproducir los agujeros concéntricos al final de las pistas que terminan con una conexión circular, cosa que en la reproducción sobre cristal bajo las mismas condiciones no fue posible. Nótese también a través de las imágenes anteriores como la mala fijación del moto-reductor que determina el desplazamiento horizontal del carro de impresión indujo la pérdida de referencia al origen máquina lo que en consecuencia desplazó la imagen hacia la derecha a partir de quinto bloque de información recibida.

La imagen del circuito de prueba fue posteriormente reproducida sobre dicho sustrato tras superar algunos problemas mecánicos y tras reducir algunos problemas de vibraciones los resultados se muestran a continuación.

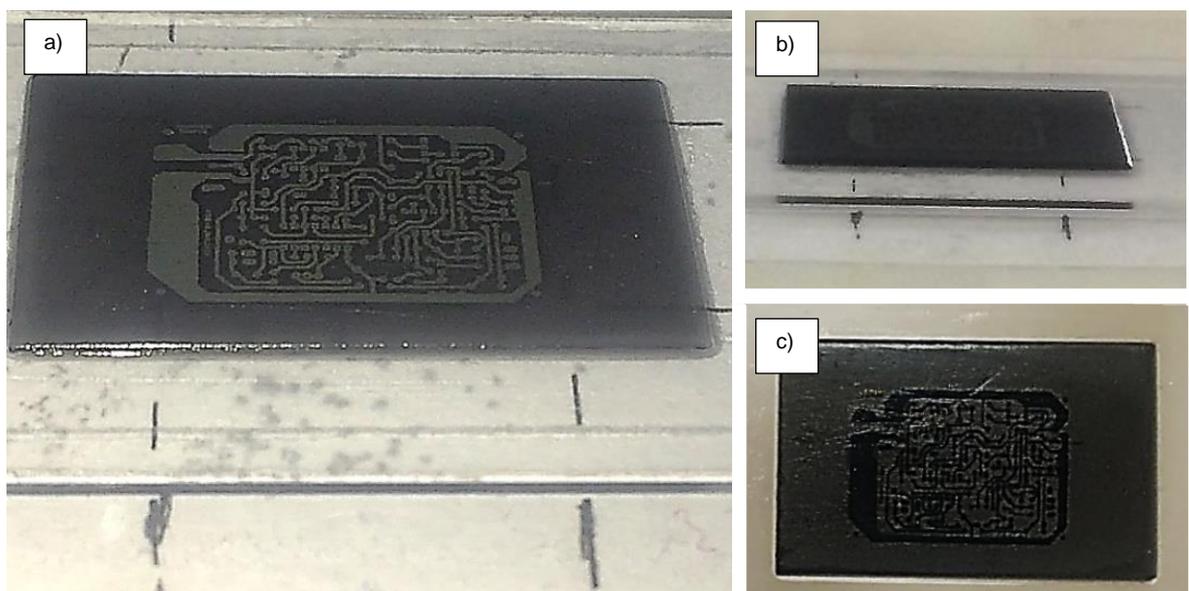


Figura 366: Imagen en máquina de la plataforma de construcción sujetando al sustrato de resina fotosensible curado en donde se ha reproducido el circuito de prueba (a, b). Vista en planta de la reproducción (c) [Fuente: elaboración propia].

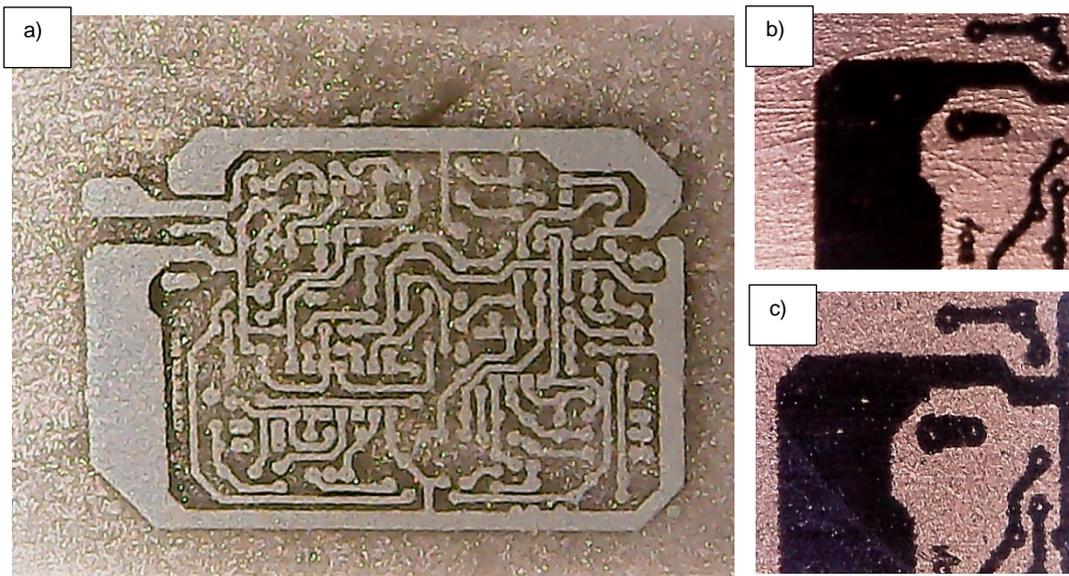


Figura 367: Imagen en detalle del circuito reproducido monocapa en estado húmedo sobre el sustrato resina fotosensible (a). Detalle del área resaltada en pruebas anteriores vista a tras luz en estado húmedo (b) y curado por temperatura (c) [Fuente: elaboración propia].

Tras el curado por temperatura a 70°C durante 8 horas las imperfecciones superficiales del sustrato se corrigieron y los depósitos de plata se fijaron mostrando mejor resolución que en las pruebas anteriores las imágenes de a continuación dan fe de ello.

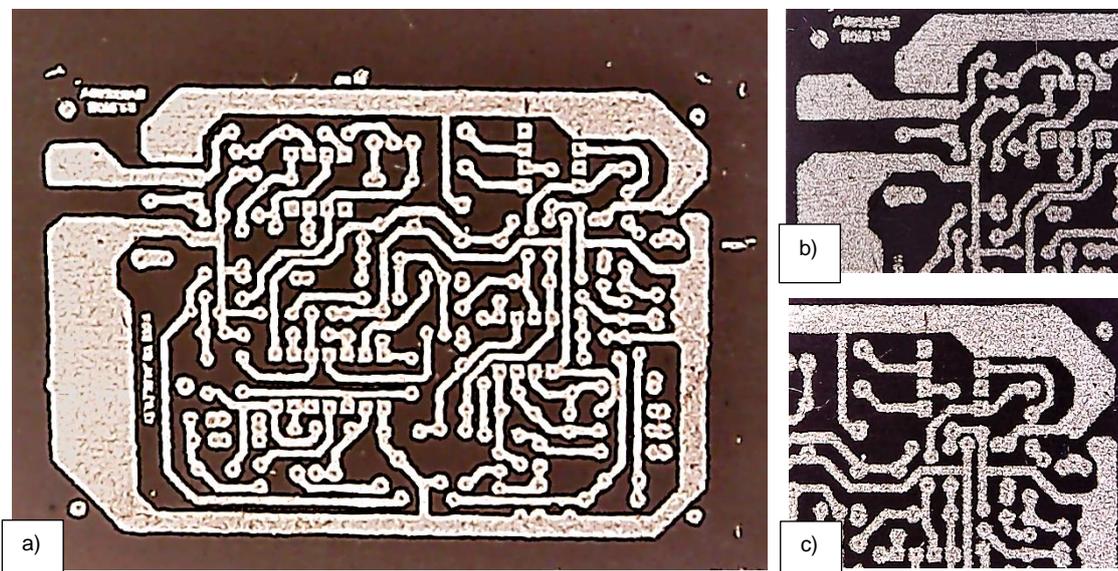


Figura 368: Imagen completa en plata del circuito reproducido (a), y detalles de distintas áreas resaltadas en las pruebas anteriores (b, c) [Fuente: elaboración propia].

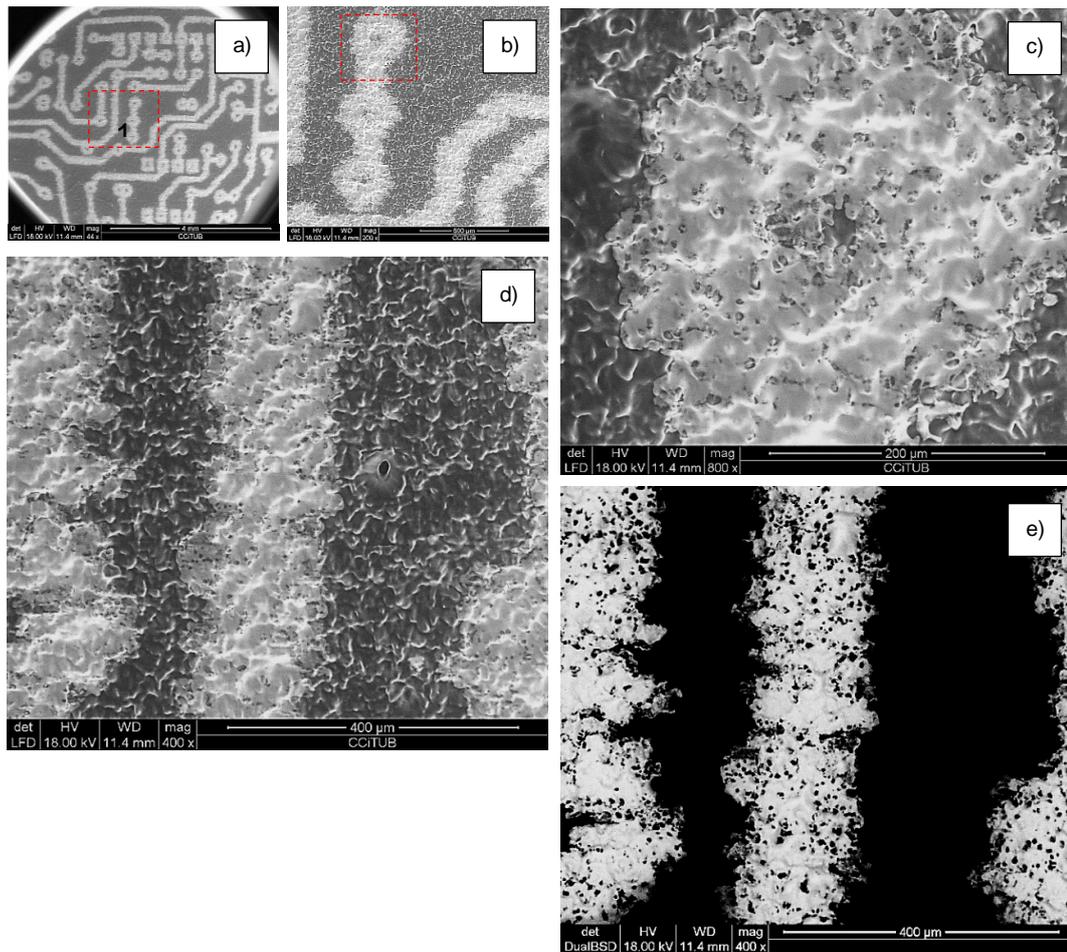


Figura 369: Imágenes tomadas a través de microscopio SEM en bajo vacío de la reproducción del circuito de prueba sobre el sustrato de resina una vez curado por temperatura (a). Zona del circuito ampliada (b) y detalle de la topografía del sustrato de resina cubierto por la tinta de plata (c). Imagen en detalle de la pista vertical y defecto en el sustrato ftopolimerizado (d). Imagen de la composición de la vista anterior resaltado en blanco el material depositado en este caso plata sobre resina (e) [Fuente: elaboración propia].

La falta de continuidad eléctrica experimentada en alguna de las pistas como puede apreciarse en la imagen de la Figura 369.e, es debido a las irregularidades del sustrato que, al ser cubierta por una única capa de tinta de plata, ésta tiende a ubicarse en los valles dejando las crestas sin recubrir y en consecuencia pudiéndose generar discontinuidades. Dicho problema se vio solventado mediante la deposición de múltiples capas de tinta, pero se pudo apreciar que en el uso de múltiples capas de tinta estas debían ser curadas después de cada deposición, fundamentalmente para no generar charcos o irregularidades como es el caso de la imagen de a continuación. Por otro lado, en la Figura 370.b se puede apreciar la interacción de los solventes de la tinta con el sustrato de resina previamente polimerizado.

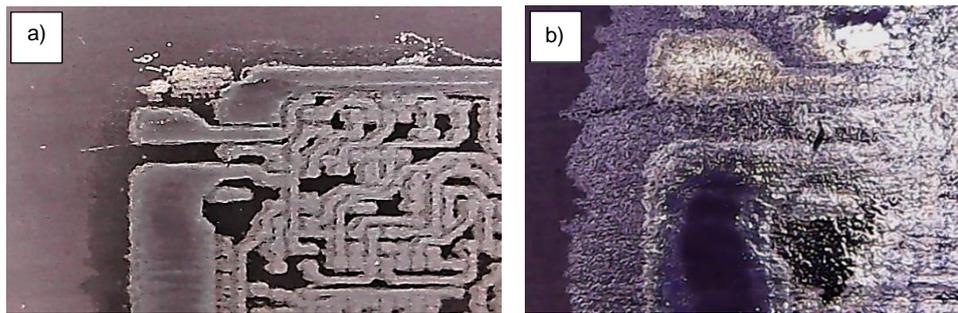


Figura 370: Circuito de prueba reproducido mediante 4 capas superpuestas de tinta de plata sin curado intermedio (a). Interacción de los solventes de la tinta con el sustrato de resina fotosensible (b) [Fuente: elaboración propia].

En línea con lo escrito en la presente tesis, la utilización de un sustrato impreso gracias a la tecnología DLP integrada en el sistema híbrido descrito, abre un campo sumamente interesante, por ejemplo; siempre se ha reproducido el mismo circuito puesto que, al estar constituido de puntos, líneas y en consecuencia patrones, la geometría de éste es irrelevante, lo mismo ocurre con el sustrato, si bien se ha utilizado una lámina delgada rectangular de un espesor regular éste puede bidimensionalmente tener cualquier otra geometría.

Por otro lado, se ha utilizado unos materiales que desde un punto de vista funcional sus características los definen, por ejemplo; desde un punto de vista eléctrico uno es muy conductor y el otro no. Por ser el sustrato generado con una resina que al polimerizar presenta una cierta flexibilidad abre la puerta a circuitos que tras ser impresos puedan deformarse (posibles dispositivos wearables pueden traerse a colación), cabe resaltar también en este caso las propiedades ópticas del sustrato, al presentar en este caso una translucidez relativamente baja y siendo de un color muy oscuro permitió que la plata depositada en su superficie se vio resaltada en gran medida.

Las posibilidades que abren nuevas formulaciones de resina en combinación con la deposición de materiales funcionales o no con un sistema DOD habrán un mundo de posibilidades no limitado únicamente a la conductividad eléctrica.

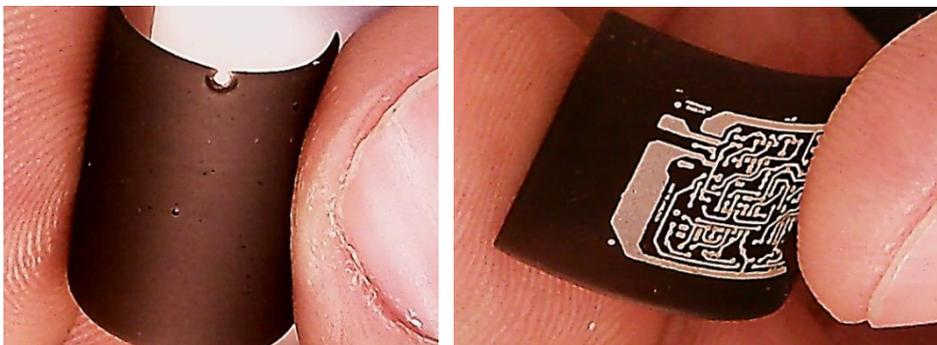


Figura 371: Imagen de una lámina flexible de resina fotosensible curada, circuito de prueba reproducido sobre dicha resina flexible [Fuente: elaboración propia].

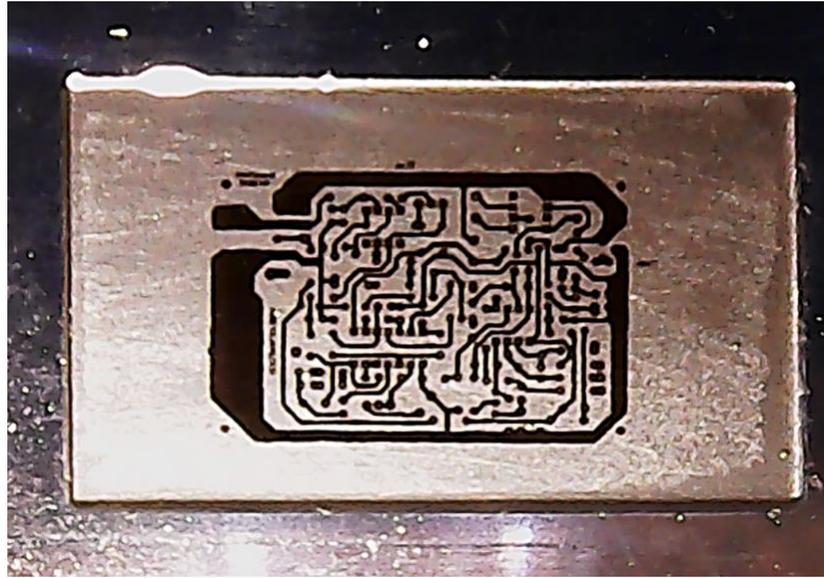


Figura 372: Impresión del circuito de prueba sobre un sustrato más traslucido resina Spot-A HT sin pigmentar [Fuente: elaboración propia].

Cabe destacar sin embargo que, la afinidad de la plata al oxígeno hace que ésta, al estar en contacto con la atmosfera se oxide degradando al elemento impreso. Una muestra de ello puede apreciarse en las imágenes de a continuación, en donde se muestran los circuitos impresos con anterioridad tras muchos meses expuestos a la intemperie. Esta situación es típica en el uso de tintas de plata y tras comprobar su oxidación establece la necesidad de asilar éstas de la atmosfera afín de que los elementos impresos mantengan sus propiedades de una forma sostenible en el tiempo, ya sea mediante la sobre deposición de una capa de resina fotosensible, barbotina o el uso de barnices u otro tipo de recubrimiento posterior.

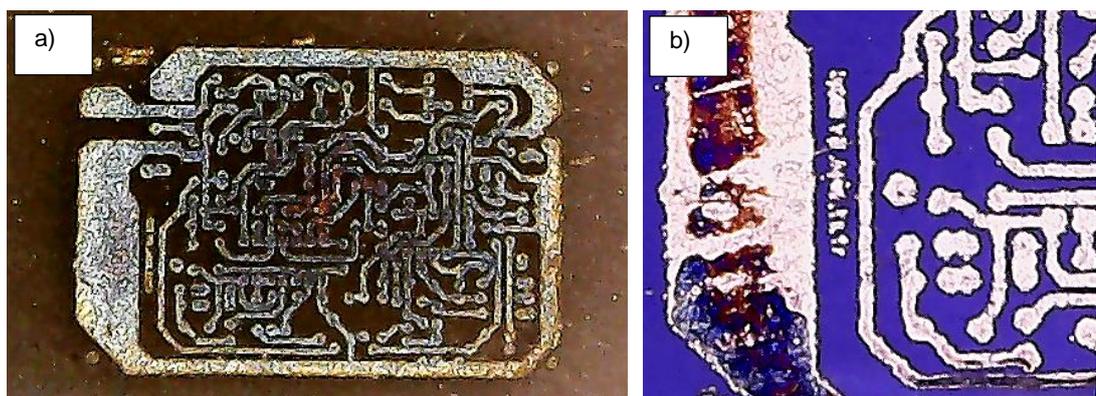


Figura 373: Aspecto de los circuitos mostrados con anterioridad tras ser expuestos a la intemperie durante 8 meses sobre un sustrato de resina fotosensible y barbotina de LTCC [Fuente: elaboración propia].

4.2.2. Reproducción de geometrías tridimensionales a través del sistema DLP.

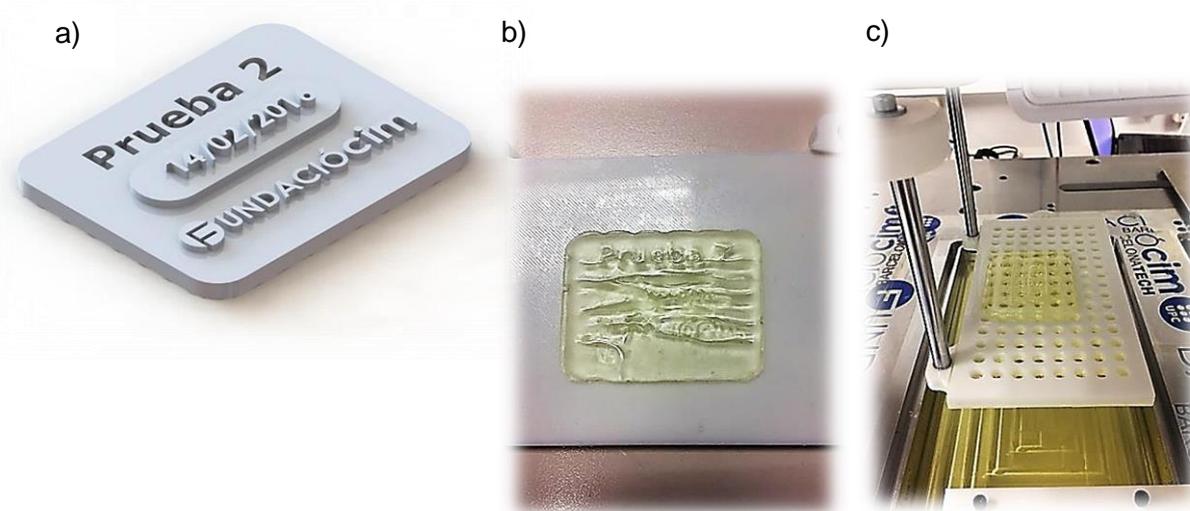


Figura 374: Imagen renderizada de la pieza de prueba inicial a reproducir por DLP (Proof of concept 2) (a). Pieza reproducida sobre plataforma maciza de PLA impresa en 3D por FDM (b). Pieza reproducida satisfactoriamente sobre plataforma modificada (c)
[Fuente: elaboración propia].

En las imágenes de la figura anterior se observa en primer lugar una representación de la pieza de prueba utilizada inicialmente en la comprobación del funcionamiento del sistema de impresión tridimensional por DLP, en la cual el uso de una plataforma de construcción sin agujeros pasantes fomentó la generación de ondulaciones en la superficie libre de la resina mientras ésta realizaba rápidos desplazamientos verticales de forma discreta. Debido al insuficiente tiempo de atenuación de dichas ondas éstas se vieron reflejadas en la superficie de la pieza. Por otro lado, en esta primera prueba inicial se evidenció la necesidad del uso del sistema nivelador o Wiper y la perforación de la plataforma de construcción afín de disminuir su rozamiento durante la inmersión de la misma. Posteriormente, también se tuvo que aumentar la rigidez del soporte que sustenta la plataforma afín de disminuir la flexión de la misma. Tras estas modificaciones como puede apreciarse en la Figura 374.c la reproducción de la pieza pudo llevarse a cabo de forma satisfactoria.

La reproducción de dicha pieza de prueba por otra parte, fue llevada a cabo mediante una resina Spot-HT de la empresa spot-A materials. La translucidez de dicha resina y la falta de bloqueadores de la misma supuso un problema en la reproducción de la pieza que, expuestas a una alta intensidad lumínica durante un tiempo excesivamente prologado, ésta durante su impresión generó estalactitas que al penetrar por los agujeros pasantes de la plataforma de construcción establecieron una unión rígida que imposibilitaron la extracción de la plataforma de construcción del equipo y de la pieza sobre ésta. Por otra parte, debido

a que en estas pruebas iniciales muchos de los elementos constructivos del equipo híbrido estaban impresos por FDM con PLA (termoplástico deformable a relativamente bajas temperaturas) y debido a que el proceso de fotopolimerización es exotérmico durante la construcción de la pieza de prueba ésta deformó la plataforma de construcción desajustando las guías del sistema de extracción de la misma.

Por otro lado, en las imágenes que se muestra a continuación se evidencia la importancia de la tensión superficial de las resinas y en consecuencia de las barbotinas, la cual al mojar el borde del depósito genera un casquete semiesférico que reduce la precisión del sistema en su capacidad de reproducir, reduciendo el control en el espesor de las capas. Por este motivo, en una segunda iteración se diseñó un depósito con un contorno achaflanado filoso con el cual se busca disminuir dicho casquete esférico y fomentar la extracción de la resina que por exceso desborda al depósito (ver Figura 307 del capítulo 3). Por otra parte, ha dicho elemento del equipo (el depósito) también se le dotó de la posibilidad de almacenar la cuchilla del Wiper o reocater sobre el canal que rodea a este facilitando la extracción del mismo ante cambios de resina o de depósitos con mayor o menor profundidad.

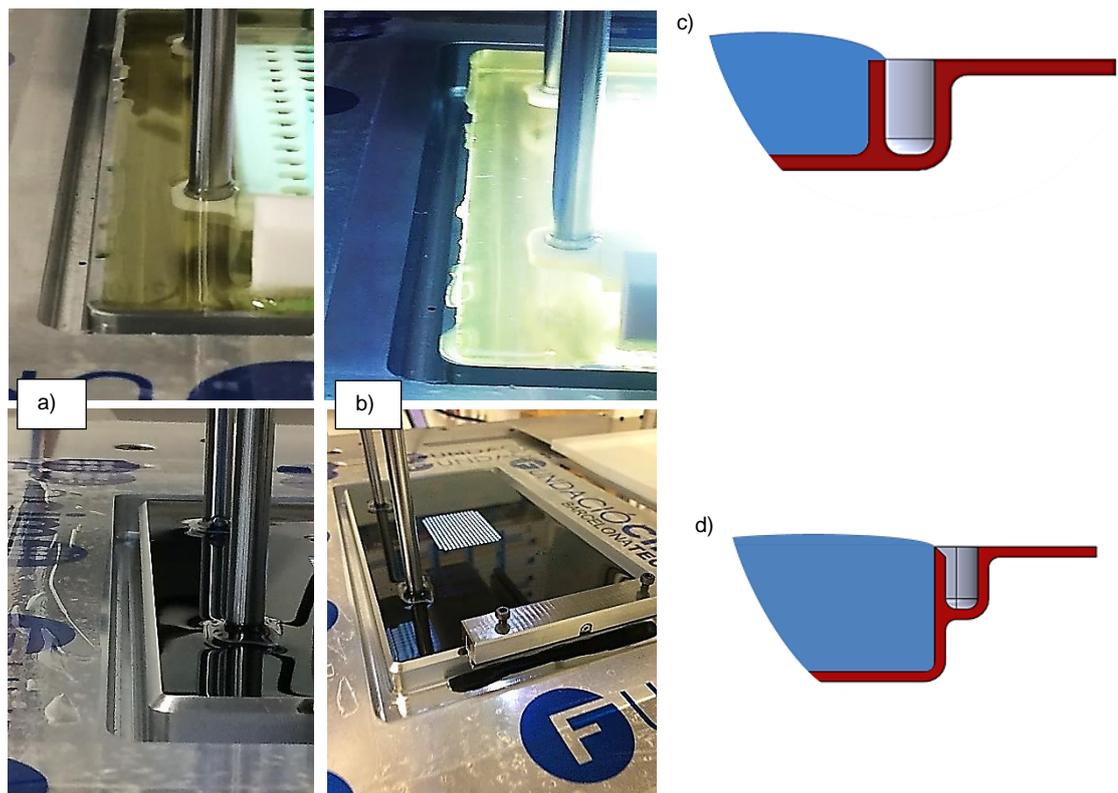


Figura 375: Imágenes del depósito mojado por las resinas antes y durante el proceso de impresión por DLP con la particularidad de utilizar resinas con distintas propiedades ópticas (a,b respectivamente). Representación esquemática de las distintas soluciones probadas en relación a las geometrías del depósito (c, d respectivamente) [Fuente: elaboración propia].

4.2.2.1. Sinterización de las barbotinas fotosensibles.

En las primeras pruebas realizadas se utilizó una barbotina constituida por resina comercial Spot-LV de Spot-A Materials, cargada con partículas de Al_2O_3 . La reproducción de las probetas se llevó a cabo en una impresora paralela al equipo Nhibrid32D, puesto que dicho equipo se encontraba en las primeras fases de construcción. A diferencia de éste, el equipo que se utilizó poseía una configuración botton-up y por tanto exento de la influencia del oxígeno durante la reproducción de las probetas. Aun así, se pudo validar la posibilidad de usar resinar cagadas.



Figura 376: Primeras pruebas llevadas a cabo con el sistema de impresión DLP haciendo uso de formulaciones basadas en alúmina (Presentación de scattering)

[Fuente: elaboración propia].

La alta transparencia de la resina permitía la penetración de la luz con una relativamente baja atenuación. Ésta, la luz, al impactar con las partículas cerámicas rebotan y su dispersión imposibilitaba la reproducción de las geometrías deseadas solidificando la resina que constituye la matriz polimérica que sujeta a las partículas cerámicas.

En dicha primera formulación se evidenció la necesidad de incrementar el índice de refracción de la resina, así como también la necesidad de utilizar dispersantes para evitar aglomeraciones en la barbotina y disminuir la viscosidad de la misma, atendiendo a la velocidad de sedimentación de las partículas puesto que podrían llegar a dificultar el proceso de impresión.

Los problemas de *scattering* se vieron ligeramente reducidos en formulaciones posteriores aunque imposibilitaban la reproducción de piezas en 3D, por ejemplo en las imágenes de a continuación se muestra la prueba de concepto 2 en donde la impresión de dicha probeta se realizó mediante el uso de una barbotina al 50 wt.% constituida principalmente por resina Fun-To-do y partículas de Alúmina (MR-70). Por otra parte, la reproducción de la pieza se realizó mediante capas de 50 μm de espesor expuestas a máxima intensidad durante 10 s. En cuanto a la sinterización de la misma, ésta se llevó a cabo a una temperatura de 1550°C.

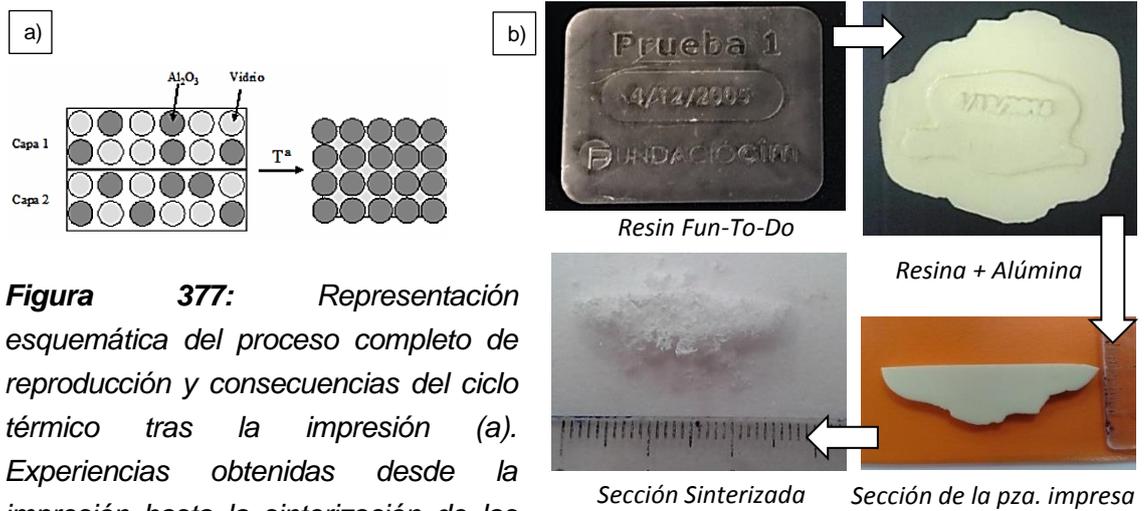


Figura 377: Representación esquemática del proceso completo de reproducción y consecuencias del ciclo térmico tras la impresión (a). Experiencias obtenidas desde la impresión hasta la sinterización de las probetas realizadas bajo una formulación a base de alúmina al 50 wt.% (b) [Fuente: elaboración propia].

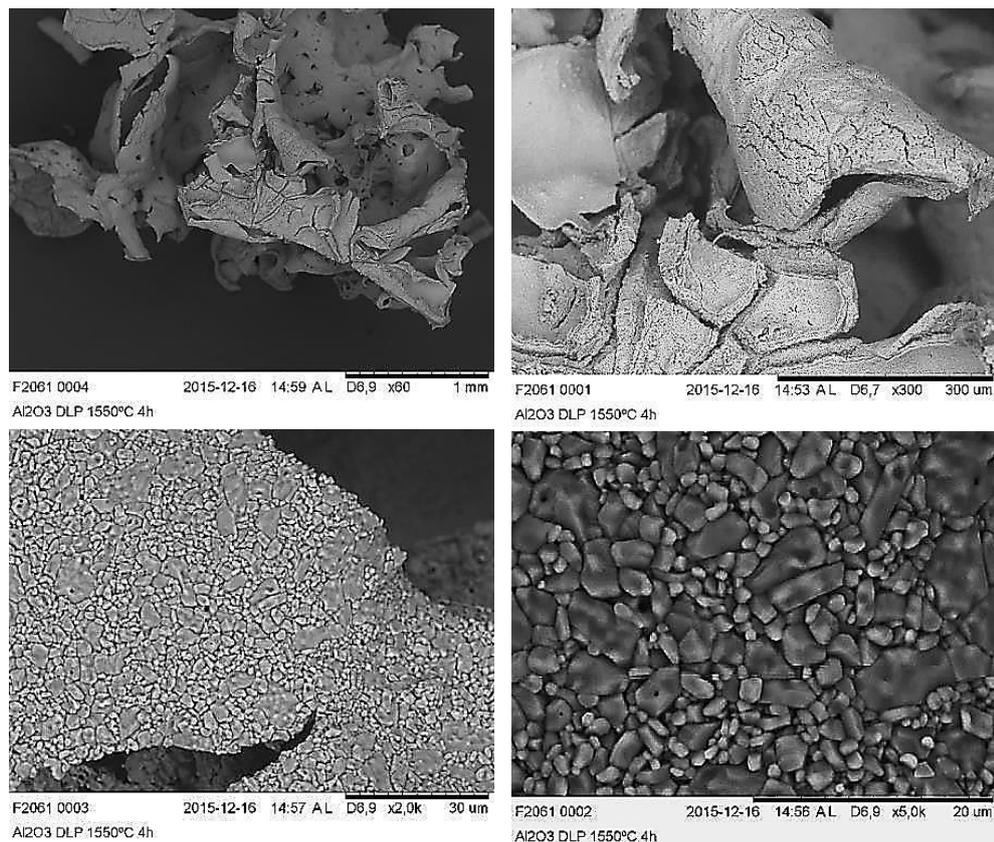


Figura 378: Imágenes de la formación de la estructura cerámica tras el proceso de sinterización obtenidas del Microscopio electrónico de barrido SEM [Fuente: elaboración propia].

Posteriormente y puesto que el objetivo inicial del proyecto NHIBRID32D era el del desarrollo de una tecnología capaz de reproducir geometrías tridimensionales cerámicas dotadas de circuitería. Las altas temperaturas de sinterización de las cerámicas HTCC condicionaban el uso de los materiales utilizados en la reproducción de dichos circuitos, por tanto, durante el desarrollo del proyecto el equipo investigador encargado del desarrollo de los materiales evolucionó hacia el uso de las tecnologías LTCC cuya sinterización se realiza a menor temperatura posibilitando el uso de un mayor número de tintas, como por ejemplo las suspensiones con nanopartículas de plata.

Dicho esto, en la prueba de concepto siguiente se recurrió a la misma resina comercial inicial la Fun-To-Do para el desarrollo de una nueva barbotina cargada con partículas de LTCC, en concreto se utilizó el polvo 51528 B Glass Powder, de la empresa HERAEUS con un tamaño medio de partículas de $3.4 \mu\text{m}$ en una proporción del 50 wt.%. En cuanto al proceso de impresión, en la reproducción de la probeta mostrada a continuación se utilizó capas de $25 \mu\text{m}$ de espesor expuestas a máxima intensidad durante 10 s. Posteriormente, en la etapa de sinterización, ésta tuvo lugar a 870°C ., en donde la pieza mostró una contracción dimensional de aproximadamente 35%.

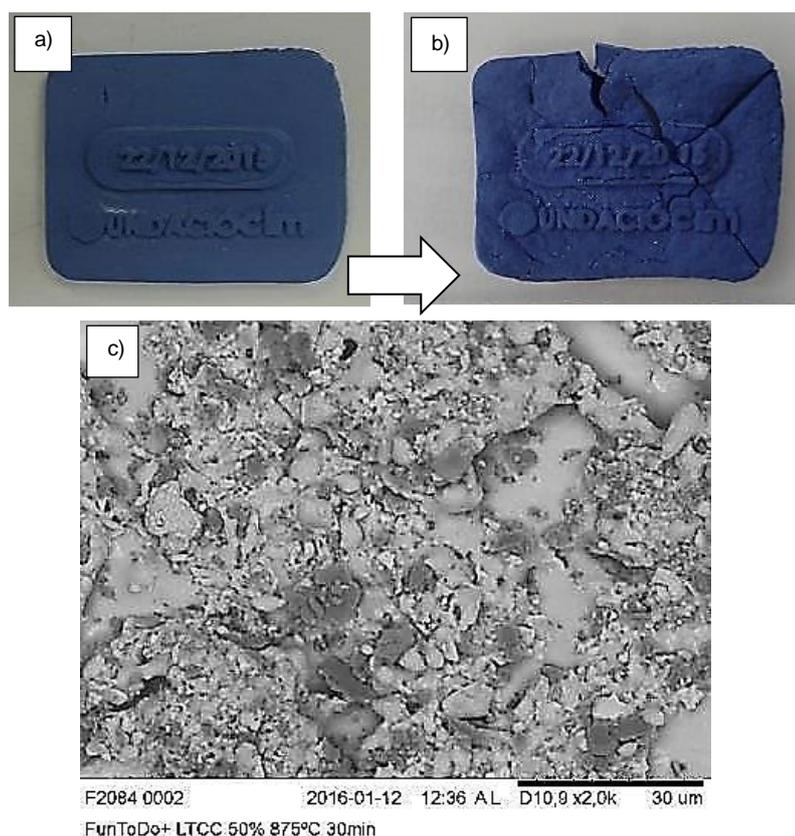


Figura 379: Imágenes de las probetas impresas en verde (a) y tras el proceso de sinterizado (b) haciendo uso de una formulación de LTCC cargada al 50 Wt.%. Detalle al visto al SEM de la formación del estado de la cerámica tras la sinterización (c) [Fuente: elaboración propia].

La ejecución de esta tercera prueba evidencio la necesidad de aumentar al máximo posible la proporción de cerámica en la barbotina afín de disminuir la contracción dimensional de las piezas durante el proceso de eliminación o calcinación de la matriz polimérica. Por otra parte, las fisuras, grietas y en algunos casos la destrucción total de la pieza solicitaba un estudio más profundo de los ciclos térmicos.

Múltiples pruebas llevadas a cabo posteriormente con distintas resinas y formulaciones permitió hacer mejoras en la formulación de las barbotinas, un ejemplo de ello puede apreciarse en las imágenes de a continuación (Figura 380) en donde se hace uso de la resina comercial Spot-LV de Spot-A Materials cargada con partículas cerámicas de LTCC en distintas concentraciones.

Spot-LV		LTCC	
Acrilatos alifáticos	90-100%	Óxido de aluminio	10-25%
Oxido de fosfina	1.5%	Cuarzo (SiO ₂)	5-10%
	$\begin{array}{c} \text{O} \\ \\ \text{R}^1 - \text{P} - \text{R}^3 \\ \\ \text{R}^2 \end{array}$	Óxido de cinc (ZnO)	2,5-5%
		Óxido de cobalto (CoO)	2,5-5%
		Dióxido de titanio (TiO ₂)	2,5-5%

Figura 380: Elementos constitutivos de la resina Spot-LV y del polvo LTCC utilizados en dichas formulaciones [Fuente: elaboración propia].

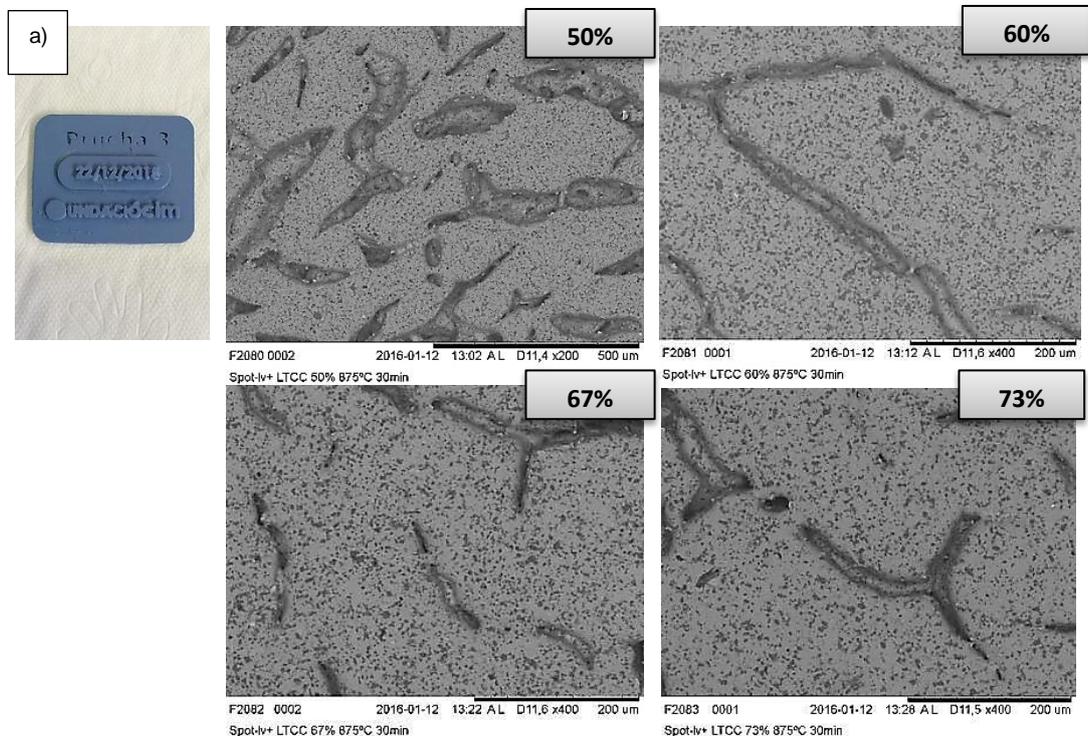


Figura 381: Imágenes de la pieza impresa (a) al microscopio SEM de la estructura cerámica de las piezas impresas con LTCC tras el proceso de sinterización bajo distintas concentraciones (b) [Fuente: elaboración propia].

De las pruebas anteriores se pudo concluir que el incremento de la carga cerámica en las barbotinas generaba un aumento en la densidad de las mismas, así como en su viscosidad, siendo este último un fenómeno contraproducente a la hora utilizar estas en la reproducción de geometrías complejas a través del sistema DLP, evidenciándose así la necesidad de utilizar un dispersante en la formulación. Por otra parte, también se pudo comprobar que un incremento de la carga cerámica reducía la contracción dimensional de las piezas tras el ciclo térmico de sinterizado, en las gráficas de a continuación aportadas por FAE se puede apreciar dicho fenómeno.

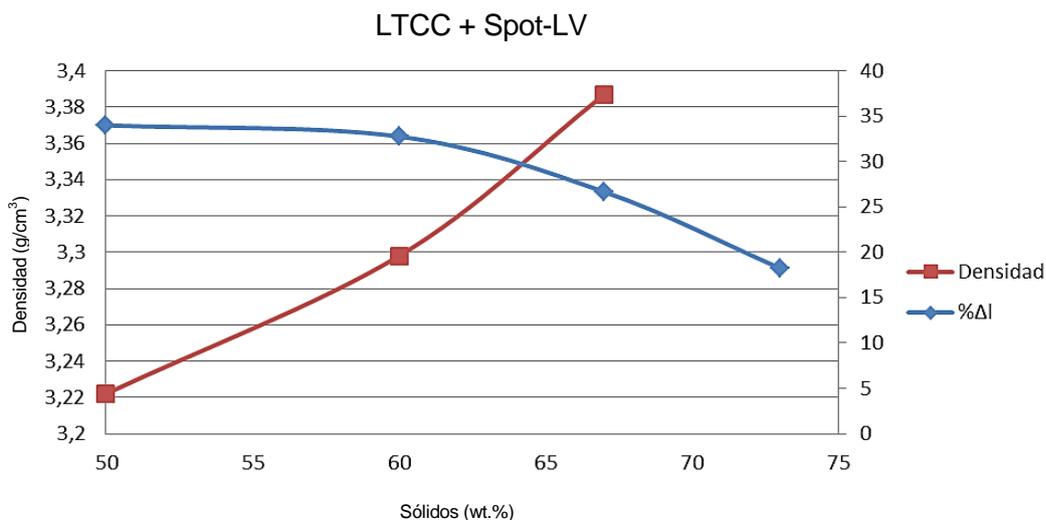


Figura 382: Evolución de la densidad de la botina de LTCC con resina Spot-LV y contracción dimensional respecto al porcentaje de carga en sólidos [Fuente: elaboración propia].

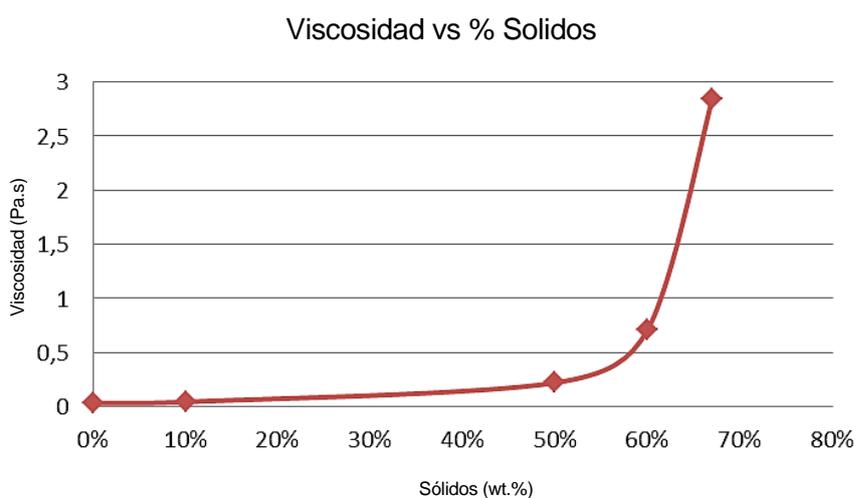


Figura 383: Evolución de la viscosidad de la botina de LTCC con resina Spot-LV en función del porcentaje de carga en sólidos [Fuente: elaboración propia].

Por otra parte, pese a que el ciclo térmico empleado (rampas de 2°C/min y una meseta a 870°C de 30 min) calcino casi por completo la matriz polimérica que sujeta a las partículas cerámicas, para un mismo ciclo térmico no todas las resinas presentaban un mismo comportamiento ni tampoco la pieza o probeta, en las imágenes de a continuación (Figura 384) se muestra una comparación entre dos barbotinas de LTCC con resinas distintas tras el proceso de sinterizado.

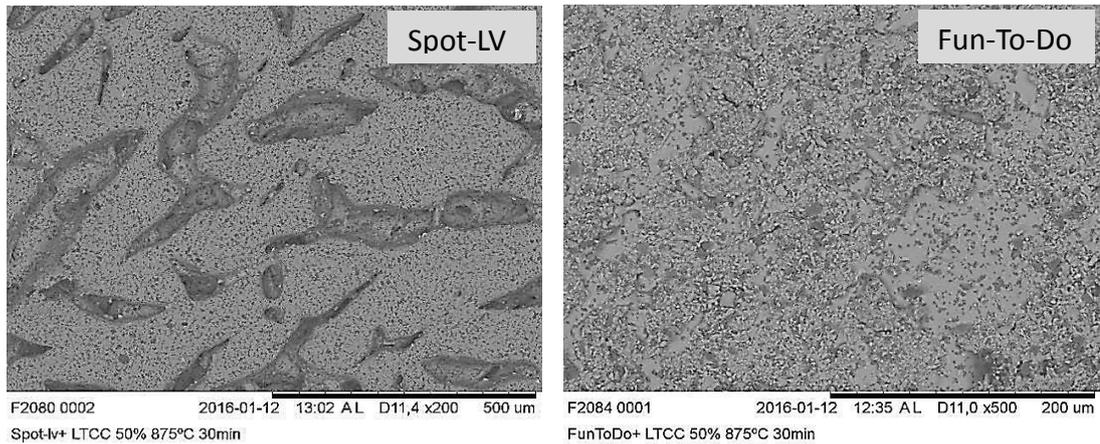


Figura 384: Imagen al microscopio SEM de la superficie de las piezas impresas y tras el ciclo de sinterización de dos barbotinas distintas de LTCC al 50 wt. %

[Fuente: elaboración propia].

Puede apreciarse ligeramente que la probeta con barbotina de LTCC y resina Fun-To-Do presento residuos en su superficie debido a una calcinación incompleta, posteriormente en pruebas sucesivas se modificó la formulación de las barbotinas añadiéndoles a las mismas un dispersante y tomando como base la resina comercial Spot-LV, la evolución de la viscosidad en función de la proporción de dispersante utilizado en una barbotina de LTCC al 67% en peso puede apreciarse en las imágenes de a continuación.

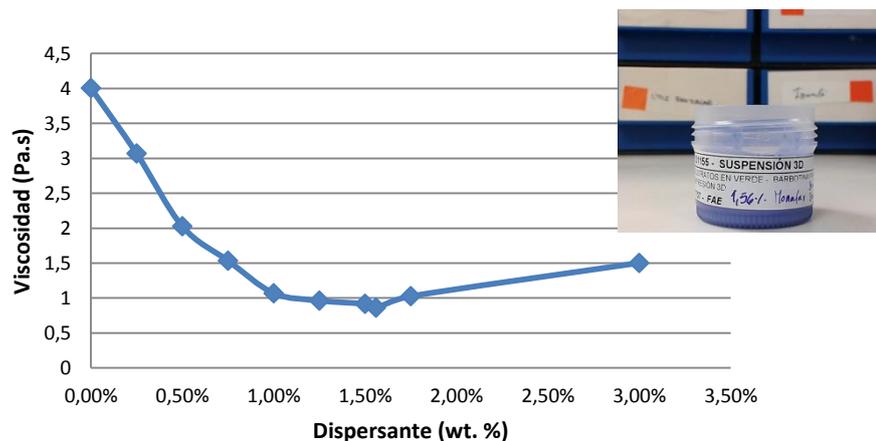


Figura 385: Evolución de la viscosidad en una barbotina de LTCC y resina Spot-LV en función del porcentaje de dispersante utilizado en la formulación

[Fuente: elaboración propia].

Como puede apreciarse en la gráfica mostrada en la Figura 385 la viscosidad de la barbotina alcanza un mínimo en torno al 1,5% de dispersante en peso, es por ello que en formulaciones sucesiva afín de reducir la viscosidad de las barbotinas y fomentar mayor dispersión de las partículas cerámicas en su interior, así como también teniendo en cuenta parte de su sedimentación, la formulación de éstas las barbotinas se vieron nuevamente a ver modificadas tras la adición de nuevos componentes en este caso de dispersante.

Volviendo al equipo Nhibrid32D y tras haber superado las etapas de diseño, fabricación, montaje y desarrollo del sistema de control del sistema DLP, a continuación, se muestra una imagen al microscopio SEM de una sección de la pieza probeta impresa en alzado, con capas de 25 μm a 10 s de exposición a máxima intensidad, afín de evidenciar la correcta unión de las capas solidificadas y superpuestas.

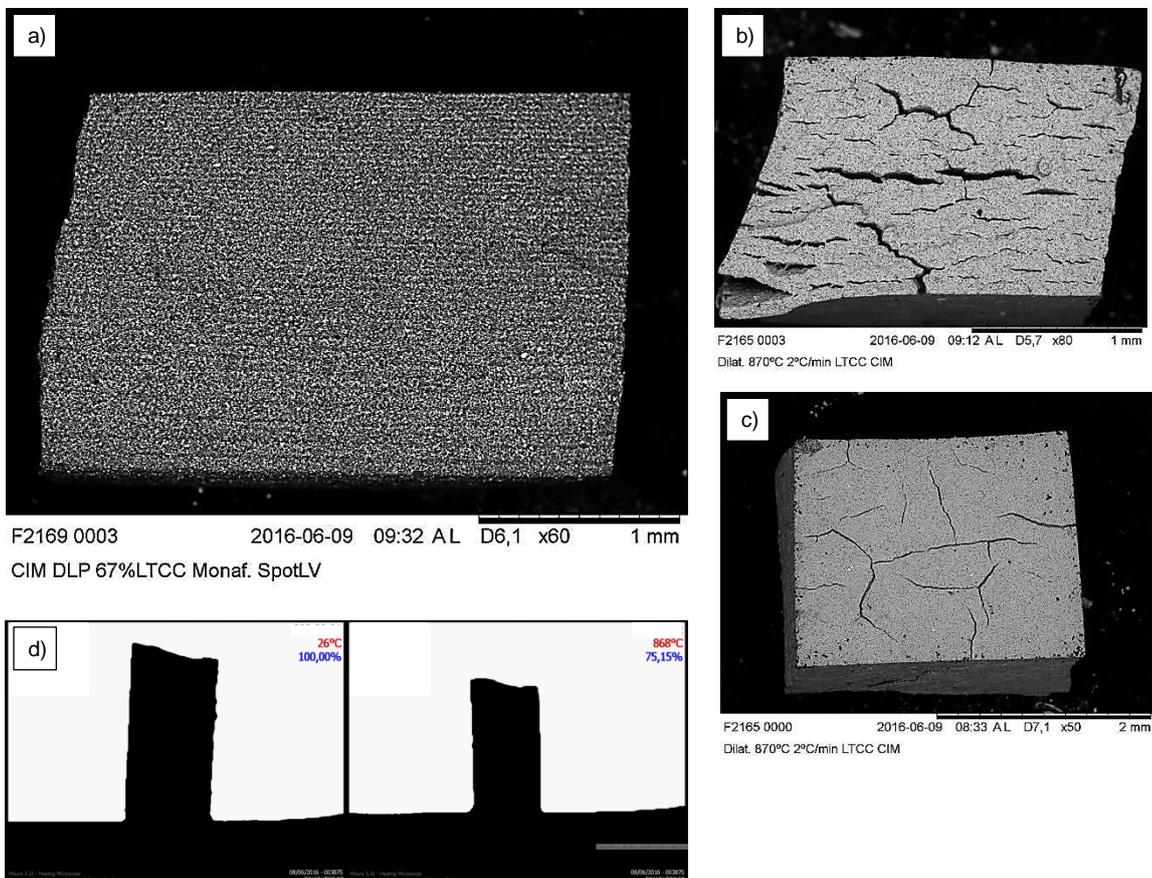


Figura 386: Vista en alzado de una sección de la pieza impresa en verde antes y después del sinterizado (a, b), vista en plata de la misma tras el proceso de sinterizado (c). Imagen tomada del dilatómetro óptico al principio y al final del ciclo térmico de sinterización (d)

[Fuente: elaboración propia].

Como puede apreciarse el ciclo térmico de sinterizado descrito con anterioridad continúa siendo inaceptable, la violencia del mismo dificultaba la evacuación de los gases durante el proceso de calcinado. Una contracción irregular y descontrolada por otra parte, fomentaba

las grietas y la separación de las capas impresas superpuestas. Por otra parte, a través del empleo de un dilatómetro óptico, se pudo comprobar que la contracción dimensional que sufre la pieza durante el proceso de sinterizado principalmente tiene lugar en la etapa de calcinación de la matriz polimérica.

Al margen de este hecho y como una simple prueba realizada en el taller durante el desarrollo del equipo Nhibrid32D afín de corroborar la posibilidad de cargar las resinas con otro tipo de partículas y con ello verificar la posibilidad de dotar a las piezas impresas de otras propiedades, se generó barbotina muy rudimentaria de resina Spot-LV con partículas ferromagnéticas, de forma que si bien dicha barbotina presentaba una gran sedimentación debido a los grandes tamaños de las partículas se pudo comprobar que la pieza impresa era sensible al campo magnético de un imán de neodimio. La introducción de la sinterización en barbotinas fotosensibles cargadas de partículas funcionales (cualesquiera que sean éstas) abre como ya se ha resaltado un campo interesante para la fabricación aditiva.

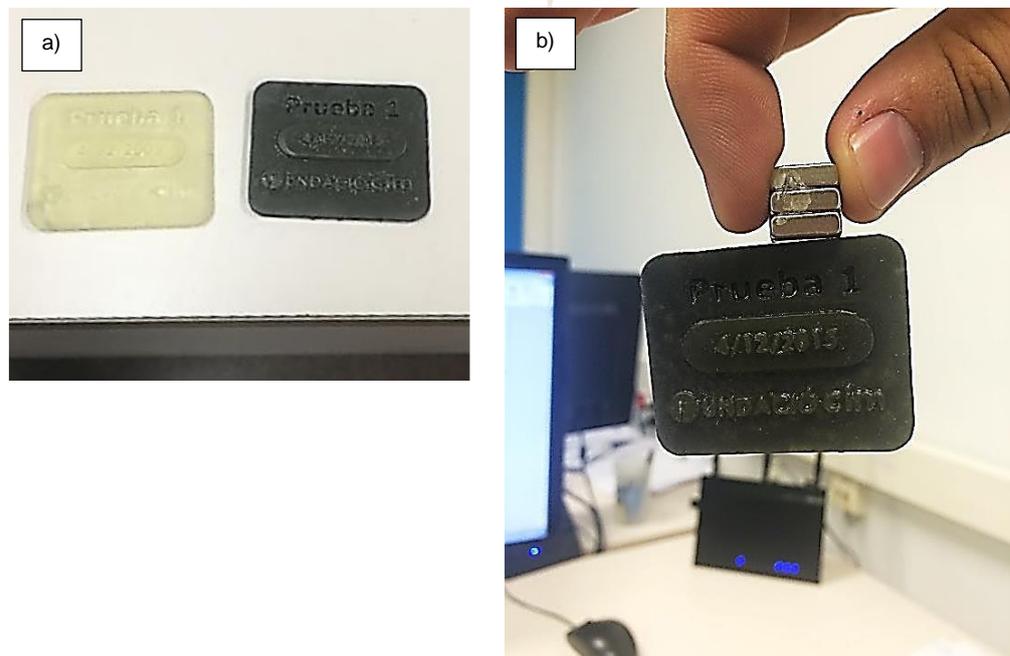


Figura 387: Imagen de la pieza de prueba o probeta impresa por DLP utilizando una rudimentaria de resina Spot-LV con partículas ferromagnéticas (a). De talle de dicha pieza suspendida por la atracción de un imán (b) [Fuente: elaboración propia].

Cabe destacar que, en paralelo al desarrollo de los materiales, la evolución de los sistemas existentes en el equipo y los ajustes realizados en el control del sistema DLP permitió afinar su funcionamiento aumentando su capacidad y resolución, hecho que nos permitió ser más ambiciosos en cuanto a las piezas y geometrías a reproducir. Las imágenes mostradas a continuación dan fe de ello (Figura 388 y Figura 390).



Figura 388: Captura de pantalla del programa CAD en donde se ha diseñado las estructuras Lattice impresas (a). Imagen del equipo Nhibrid32D y de las piezas impresas sobre plataforma de construcción (b) y detalle de una de ellas (c) [Fuente: elaboración propia].

En las imágenes anteriores se puede apreciar una captura de pantalla de las estructuras diseñadas en CAD mediante el software SolidWorks. De modo que, como ya se ha explicado con anterioridad en el capítulo 3, tras recurrir a la discretización que proporciona el mallado triangular de los archivos de extensión STL, las piezas a imprimir pasan a una segunda etapa, en donde vuelven a ser discretizadas ya por el software propio desarrollado mediante la herramienta matemática MATLAB. Es decir, como un conjunto planos paralelos equidistantes y al ser dichos planos interpretados como una imagen bidimensional monocromática de profundidad de color binaria por parte del proyector, y al ser emitidas éstas sobre la superficie libre del depósito de resina en donde se ubica la plataforma de construcción y mediante la coordinación del desplazamiento vertical discreto de la misma en función de los tiempos de exposición, las piezas se materializan tras la consecución de sucesivas etapas en bucle. Como puede apreciarse en la Figura 35.b en donde dichas estructuras Lattice se erigen sobre la plataforma de construcción tras haber finalizado el proceso de impresión en una imagen donde puede observarse el sistema DLP del equipo Nhibrid32D tras haber superado las fases de diseño y fabricación.

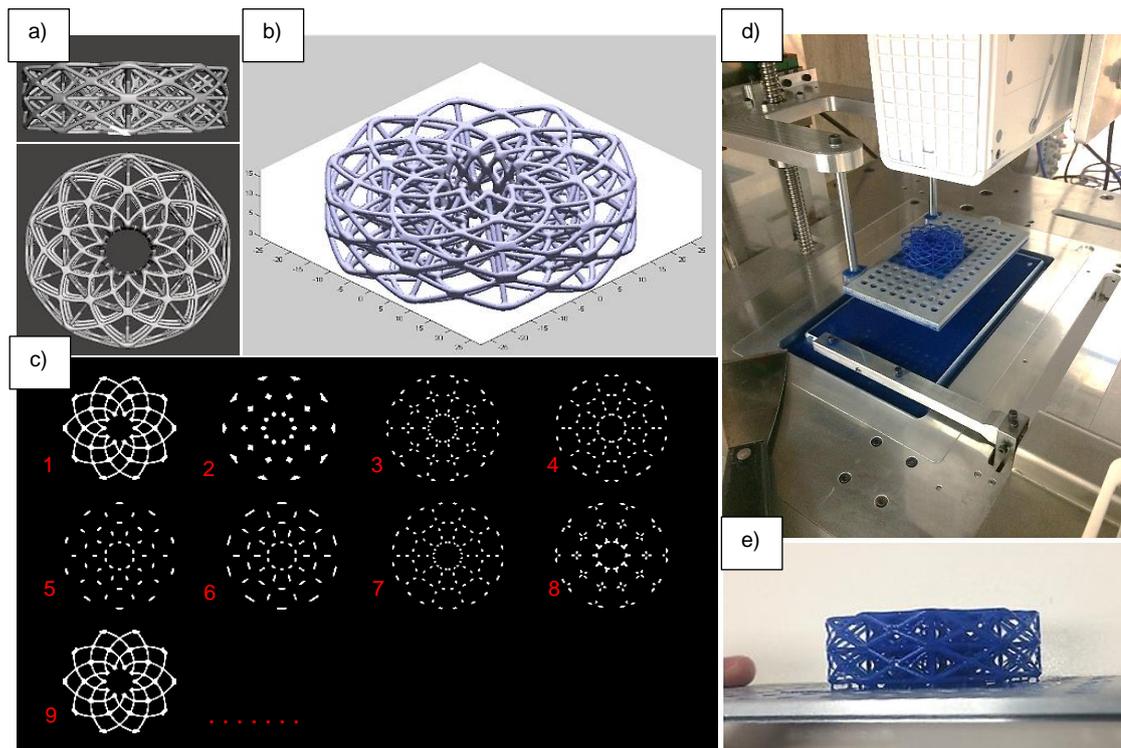


Figura 389: Imagen de la reproducción completa de una segunda estructura Lattice. Vista en alzado y en planta de la geometría del elemento a reproducir a través de la visualización del archivo stl a través del Meshmixer (a). Representación del mismo a través de la Herramienta matemática Matlab (b) e imágenes generadas y enviadas al proyector DLP, tras la discretización de la geometría tridimensional en un conjunto de capas de espesor fijo (c). Finalmente, imágenes de la reproducción de la geometría en el equipo Nhibrid32D (d) y vista de la pieza final en alzado (e) [Fuente: elaboración propia].

Como puede apreciarse en la figura anterior, las imágenes enviadas al proyector DLP deben ser emitidas en secuencia y durante un tiempo suficiente para que la conversión de la resina fotosensible tenga lugar y consolidación de las capas permita la reproducción de las geometrías previamente definidas, definición que se realiza mediante un programa CAD cualquiera y cuyo archivo como ya se ha comentado es gestionado internamente por el software desarrollado. Cabe destacar que; como en la mayoría de impresoras tridimensionales, capas más delgadas generarán mayor cantidad de imágenes reduciendo la productividad del equipo, y aunque mejorando la fidelidad o resolución en sentido vertical del mismo.

Finalmente, y como una nota de humor a continuación se muestra la reproducción de un busto de Albert Einstein a través del sistema DLP del equipo Nhibrid32D haciendo uso de la resina Spot-HT de Spot-A Materials dotada de pigmentación azul.



Figura 390: Pieza de Impresa a través del sistema DLP del equipo Nhibrid32D haciendo uso de la resina Spot-HT [Fuente: elaboración propia].

Continuando con las barbotinas cargadas con partículas cerámicas de LTCC, el conjunto de pruebas realizadas con anterioridad y una fluida comunicación entre los distintos integrantes del proyecto permitió alcanzar una formulación más estable y con menos sedimentación que las anteriores, ofreciendo un relativamente baja viscosidad y con un alto grado de conversión a la intensidad y en el espectro electromagnético de la luz emitida por la bombilla existente en el interior del proyector. Por otra parte, cabe también resaltar que, gracias a un control más ajustado del calcinado de las resinas durante el ciclo térmico de sinterizado, permitió realizar la descomposición del material polimérico y la evacuación de los gases de una forma menos violenta y más regular reduciendo en gran medida los fenómenos observados con anterioridad (grietas y fracturas).

Por motivos de confidencialidad algunos de los datos concernientes a la barbotina empleada han sido omitidos, así como también cierta la información referente al ciclo de sinterizado.

Dimensiones de las piezas en verde:

a) Pieza prismatica: 20.25x15.85x21.40 esp 1.9 mm

b) Pieza cilindrica: 20.40x15.60x esp 3.6 mm

Dimensiones finales de las piezas:

c) Pieza prismatica: 12.04x12.04x 15.64 esp 1.48 mm

d) Pieza cilindrica: 12,13x15,65 esp 1.55 mm

Resina: **Spot-HT, Spot-A Materials**

Cerámica: **LTCC, 51528 B Glass Powder, HERAEUS**

Tamaño medio de partícula (D_{50}): **3.4 μm**

Carga cerámica en la barbotina: **67wt.%**

Cantidad de dispersante: **1.56wt.%**

Viscosidad: **2.48 Pa.s**

Altura de capa: **50 μm**

Tiempo de exposición: **4s**

Ciclo térmico: **24-240 $^{\circ}\text{C}$ 240-460 $^{\circ}\text{C}$ 460 $^{\circ}\text{C}$ -870 $^{\circ}\text{C}$ (total 5 días)**

Contracción dimensional: **>20%**

Tabla 11: Resumen de datos y condiciones en la reproducción de piezas simples de LTCC

[Fuente: elaboración propia].

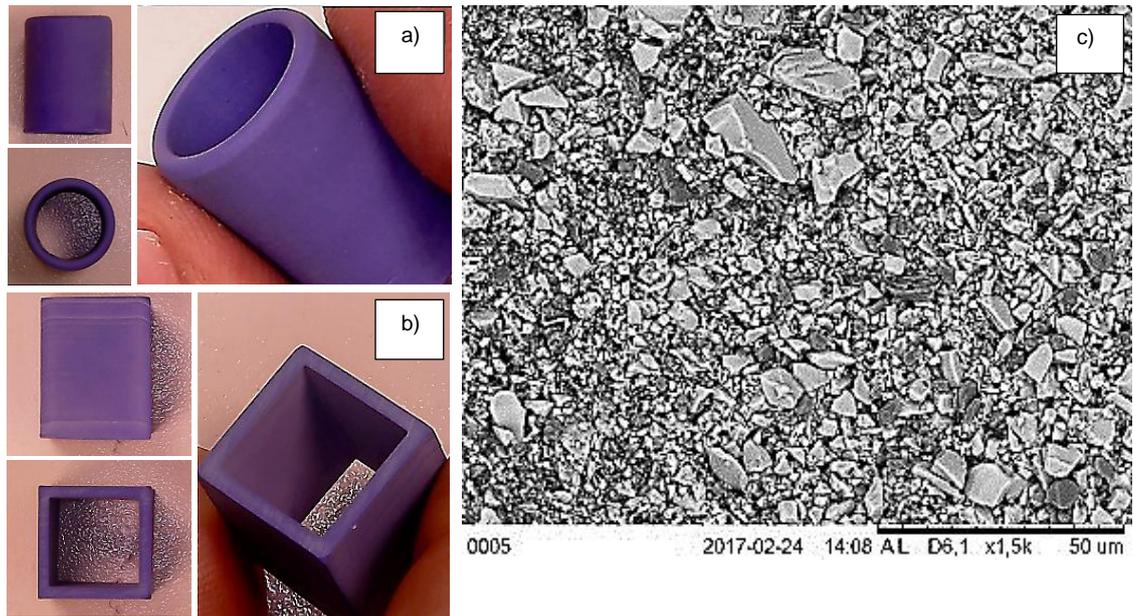


Figura 391: Piezas en verde impresas por el equipo Nihybrid32D usando barbotina fotosensible LTCC (a, b). Imagen al microscopio SEM de la superficie en verde de la pieza b (c) [Fuente: elaboración propia].

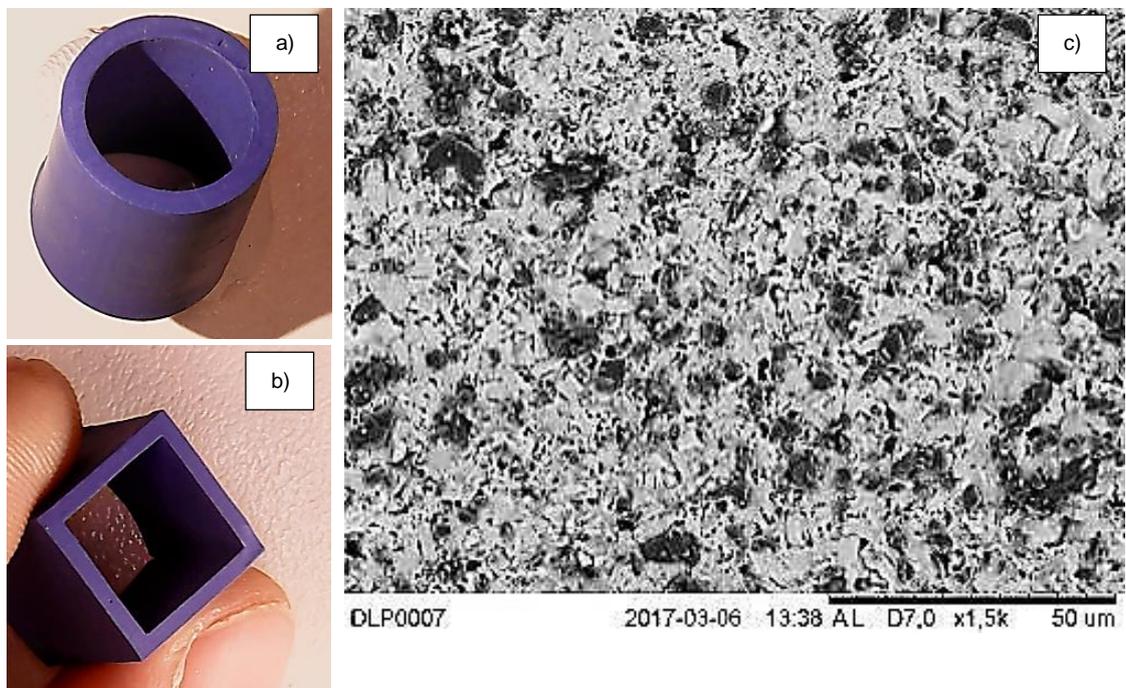


Figura 392: Piezas anteriores impresas tras el proceso de sinterización (a, b). Imagen al microscopio SEM de la superficie pieza b tras el ciclo térmico (c) [Fuente: elaboración propia].

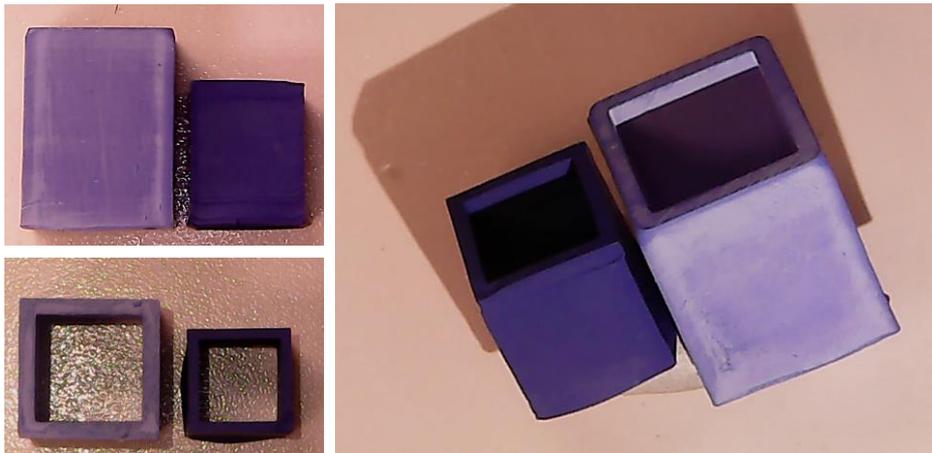


Figura 393: Comparación entre dos piezas idénticas tras la contracción dimensional sufrida durante el ciclo de sinterizado. Imágenes en planta, perfil e inclinadas [Fuente: elaboración propia].

Antes de combinar ambos sistemas se llevaron a cabo algunas pruebas con el fin de validar que la combinación del LTCC junto con las tintas de plata eran viables, fundamentalmente para validar que las pistas conductoras impresas a través del sistema Inkjet, es decir, mediante la deposición controlada de gotas de una suspensión con nanopartículas de plata resistirían al ciclo térmico de sinterización de la cerámica.

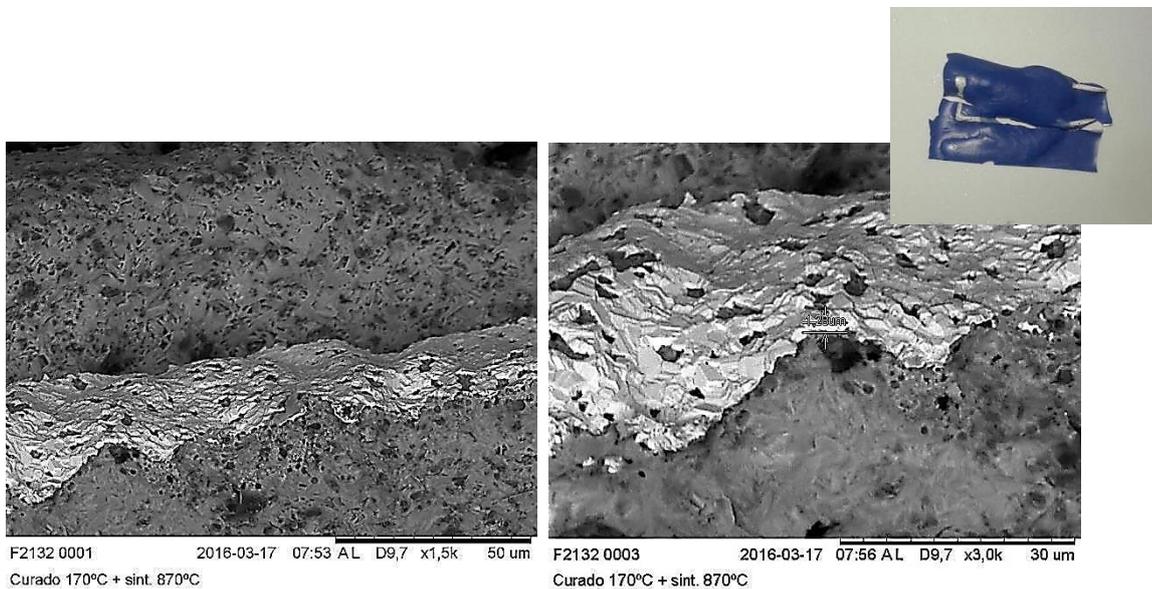


Figura 394: Lamina de barbotina con LTCC y cordones de tinta estables impresos con tinta de plata ANP silverjet DGP HRA curada a 170°C tras el ciclo térmico de sinterización del sustrato [Fuente: elaboración propia].

Posterior y tras haber alcanzado un cierto control en los procesos de sinterizado se realizaron sucesivos intentos de imprimir las estructuras Lattice mostradas en las imágenes

de la Figura 388 pero ahora mediante el uso de barbotinas cerámicas de LTCC, dichas geometrías complejas imposibles de reproducir por los métodos tradicionales de fabricación supondrían la validación definitiva de que el sistema de impresión tridimensional desarrollado para equipo Nhibrid32D cumplía con las especificaciones iniciales del proyecto. A continuación, se muestran en imágenes algunas de las experiencias obtenidas al respecto:

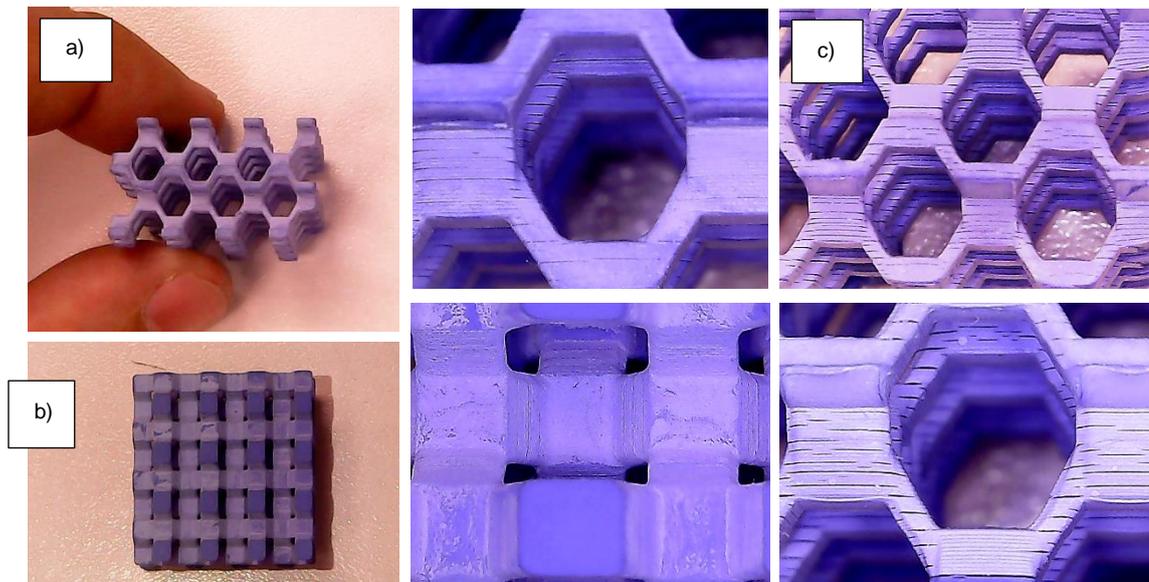


Figura 395: Estructura Lattice impresa en verde bajo una condiciones de $50/8 \mu\text{m/s}$ a partir una nueva formulación de barbotina de LTCC vista en de perfil y en planta con sus respectivas vista ampliadas (a, b). Vista lateral y detalle ampliado de la misma geometría impresa bajo condiciones de $25/4 \mu\text{m/s}$ 24h después [Fuente: elaboración propia].

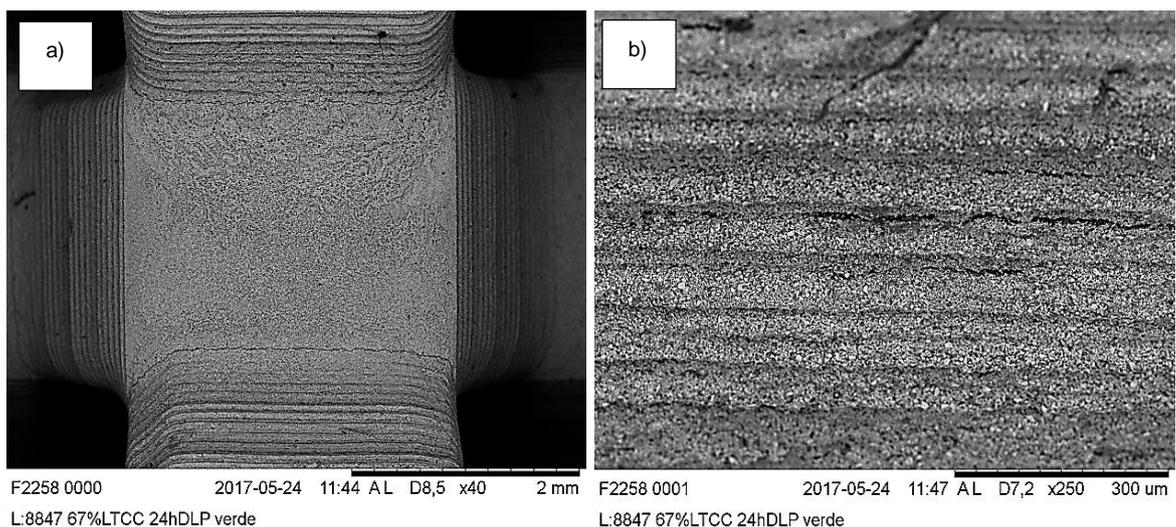


Figura 396: Imágenes al SEM topográfico de la estructura Lattice en verde reproducido bajo las condiciones de $25/4 \mu\text{m/s}$. Vista en planta de la estructura en verde (a) y vista lateral en detalle de la superposición de capas (b) [Fuente: elaboración propia].

Como puede apreciarse en las imágenes mostradas en la Figura 395 si bien se ha utilizado una nueva formulación en donde las modificaciones vienen impuestas por el dispersante, la alta atenuación de las barbotina nos hizo pensar que afin de que la superposición de las capas fotopolimerizadas se llevaran a cabo de forma satisfactoria, éstas debían de ser poco grosor, de manera que, la dosis energética recibida por capa fuese lo suficientemente alta para sobrepasar el umbral de polimerización de la resina base en todo su espesor y asegurar el correcto pegado entre las capas evitando la delaminación.

Inicialmente y teniendo en cuenta la profundidad de curado de la barbotina se establecieron unas condiciones de impresión en donde las capas eran de 50 μm de espesor expuestas a un tiempo de exposición a máxima intensidad 8 s. Posteriormente y tras observar ligeras grietas en la geometría producto de una adhesión entre las capas deficiente se procedió a realizar una segunda prueba en donde se redujo la altura de capa y el tiempo de exposición a la mitad, con la particularidad de que en el ínterin de ambas pruebas transcurrieron 24h, ilógicamente esta segunda prueba dio resultados peores en cuanto a la unión entre las capas superpuestas, situación que evidenció los defectos en la homogeneidad de la barbotina y como la sedimentación de las partículas cerámicas afectaban la reproducción de las piezas. Las distintas contracciones en la barbotina de forma local, fundamentalmente producían que al consolidar la matriz polimérica esta se contraería de forma distinta generando la delaminación de pieza como se ha podido apreciar en las imágenes de anteriores.

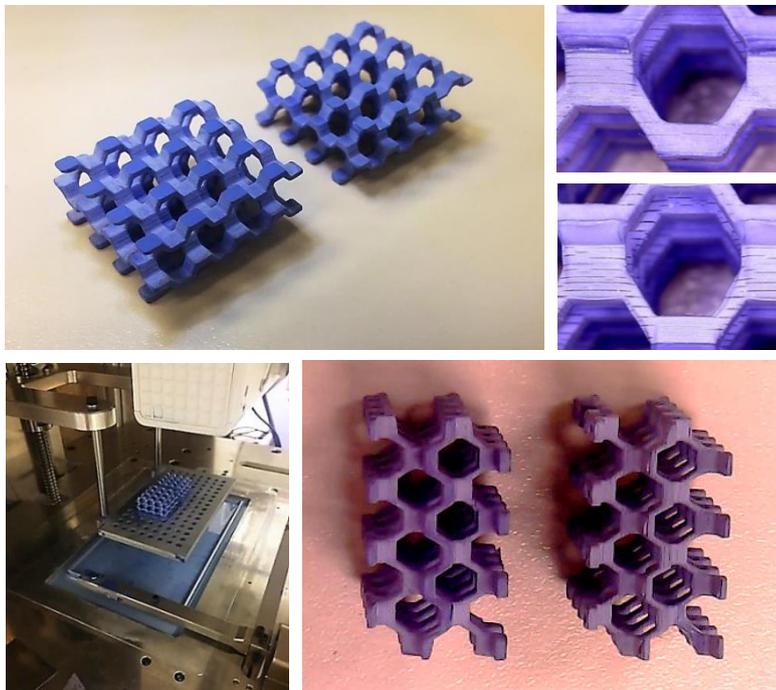


Figura 397: Comparación entre pieza de reproducidas con capas de 50 y 25 μm con la misma formulación de resina sedimentada tras el transcurso de 24h [Fuente: elaboración propia].



Figura 398: Estructura Lattice impresa antes y después del ciclo térmico de sinterización (a). Vista en planta al SEM de la pieza tras la sinterización reproducido en condiciones de $25/4 \mu\text{m/s}$ (b). Vista lateral en detalle de la superposición de las capas en las columnas de la estructura tras la sinterización (c, d) [Fuente: elaboración propia].

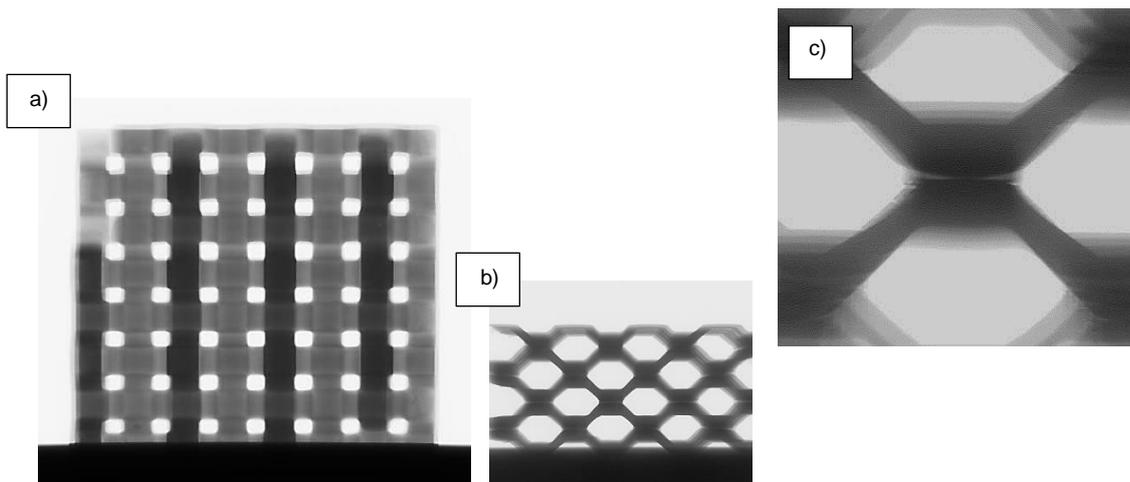


Figura 399: Imágenes en rayos x de la estructura Lattice impresa en condiciones de $50/8 \mu\text{m/s}$ en verde. Vista en plata (a), vista en alzado de la misma y en detalle (b, c) [Fuente: elaboración propia].

Cabe destacar que si bien las dos piezas anteriores (de estructura Lattice) pueden parecer idénticas a simple vista, las modificaciones de las condiciones de impresión, así como la sedimentación de las partículas cerámicas en la barbotina han afectado a la reproducibilidad de la pieza notablemente. Por otra parte, a fin de descartar la posible existencia de grietas internas en las piezas impresas en verde, éstas fueron observadas a través de rayos X en donde se pudo apreciar la existencia de grietas y micro fisuras, sin embargo, la pieza reproducida con barbotina de menor sedimentación presento una ausencia de grietas más no de micro fisuras las cuales tras pasar por el ciclo térmico estas se vieron magnificadas, como se ha podido ver al SEM. En las fotos de a continuación se puede apreciar la sedimentación de las partículas cerámicas en el interior de la cuba tras el transcurso de 120 h (5 días).



Figura 400: Sedimentación de las partículas cerámicas. Un exceso de dispersante en la formulación aún de reducir la viscosidad de la misma fomenta un a velocidad sedimentación excesiva [Fuente: elaboración propia].

Por otra parte y continuando con esta estructura Lattice, se utilizó la misma como refuerzo interno de un bloque refrigerado (ver representación renderizada de la misma en la Figura 47). El motivo de dicha inserción fue la de incrementar la resistencia del mismo de forma ligera, además dicha geometría imposible de construir por medios convencionales ofrece un elevado ratio de superficie versus volumen lo que hará del mismo un excelente disipador térmico permitiendo a través de sus múltiples agujeros la circulación forzada de aire a través del mismo.

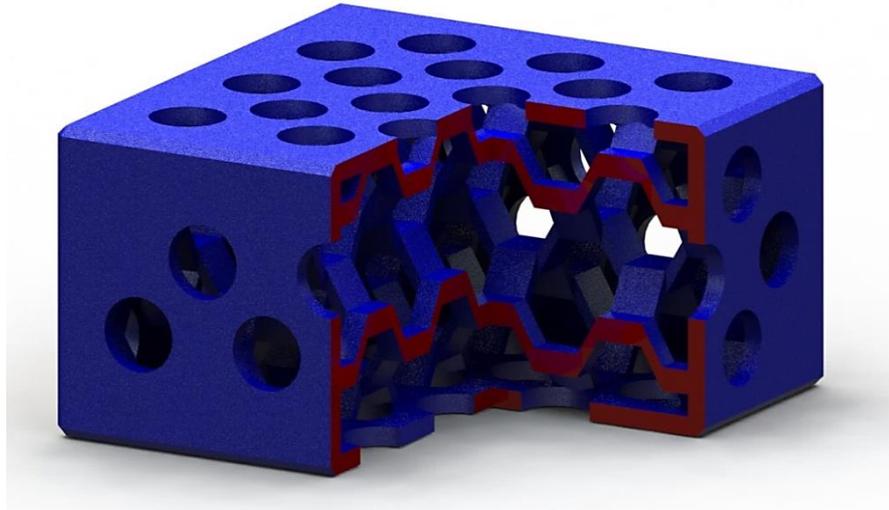


Figura 401: Vista renderizada del bloque cerámico impresión con estructura Lattice interna [Fuente: elaboración propia].

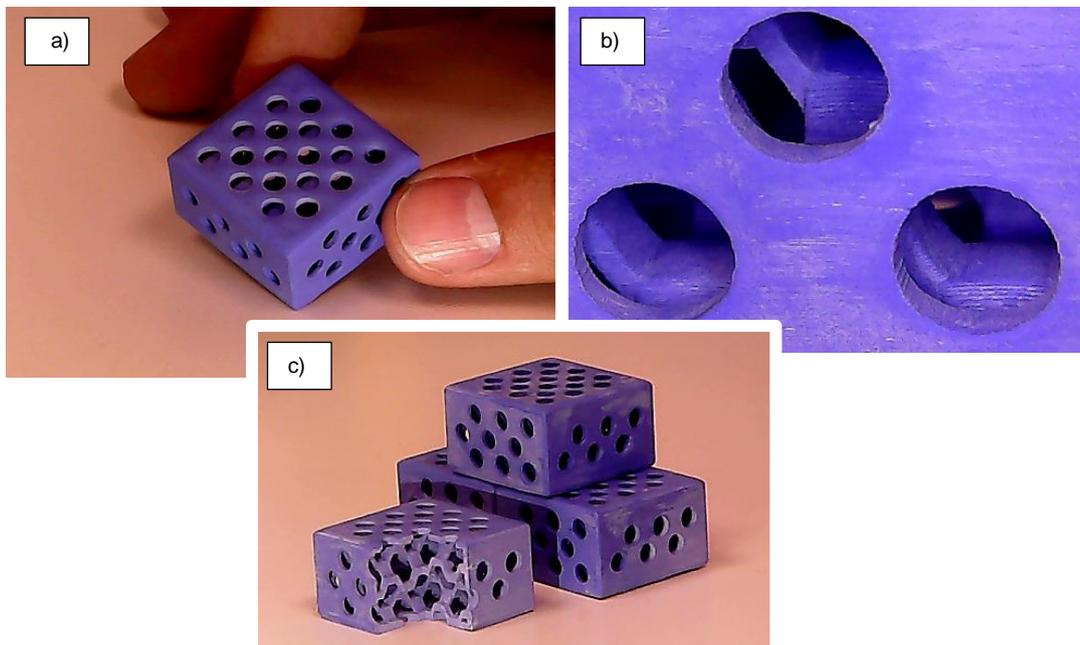


Figura 402: Vista del bloque impresión en verde (a), detalle de la estructura interior del bloque visto a través de los múltiples agujeros existente (b) y agrupación de bloque con reproducción fiel de pieza renderizada (c) [Fuente: elaboración propia].

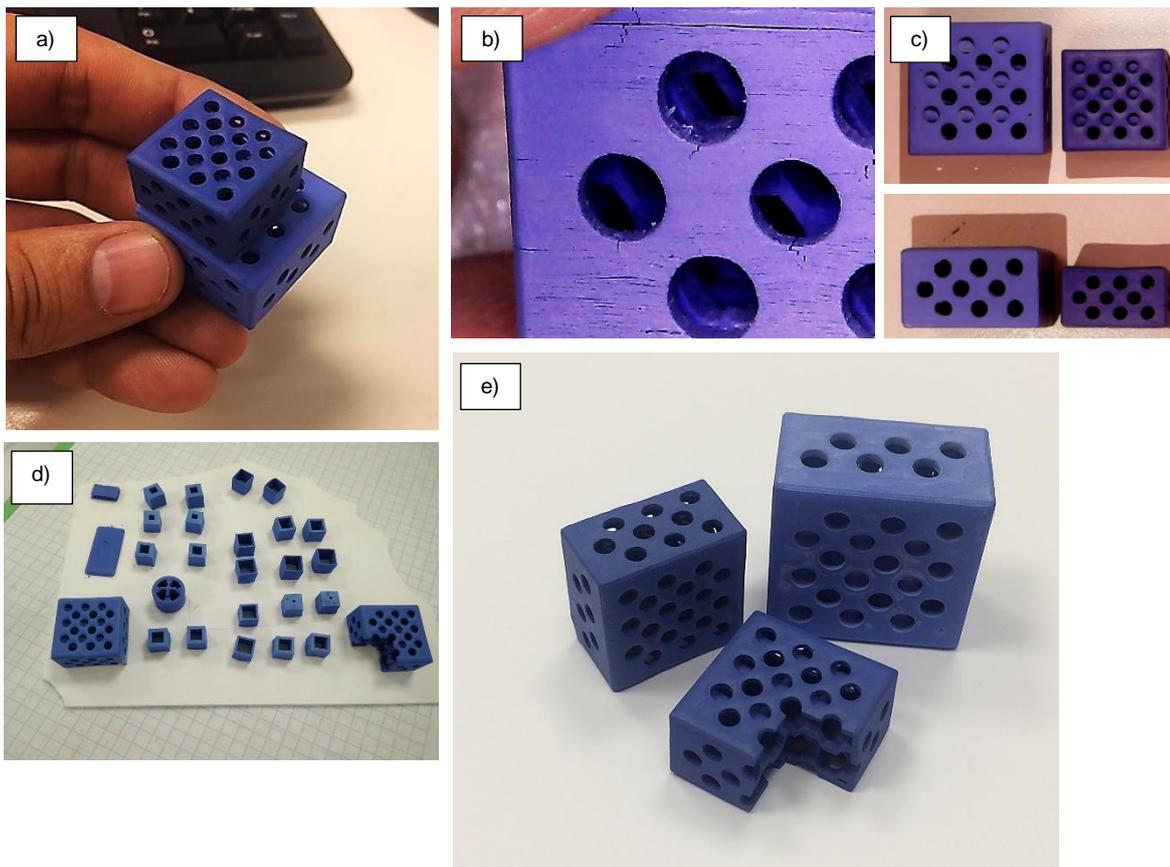


Figura 403: Vista en perspectiva del elemento reproducido tras la sinterización (a). Detalle de la estructura interna del bloque (b). Comparativa de la contracción dimensional a través de las imágenes en planta y perfil del cubo (c). Finalmente, imagen de un conjunto de piezas impresas y posteriormente sinterizadas (d), y en detalle cubo entero y cortado antes y después de la sinterización (e) [Fuente: elaboración propia].

Como puede apreciarse tras el sinterizado el elemento reproducido mediante el uso de una nueva formulación cargada al 67% de LTCC sufrió una importante contracción dimensional de $\sim 23,5\%$. La fidelidad de la reproducción en este caso, pese a que el enrejado Lattice en el interior del cubo se reprodujo satisfactoriamente, quedó cuestionada puesto que durante dicho proceso térmico elemento impreso sufrió importantes deformaciones. Por otro lado, la aparición de ligeras grietas y defectos superficiales además de comprometer estructuralmente la pieza imposibilitó la reproducción de las pistas conductoras y circuitos en su interior puesto que estas perderían su continuidad eléctrica. De manera que, tras estas pruebas se evidenció nuevamente la necesidad de optimizar los ciclos térmicos de sinterizado y la formulación de las barbotinas fotosensibles.

Posteriormente casi en paralelo y siguiendo la cronología de las pruebas llevadas a cabo en el desarrollo del equipo Nhibrid32D y de la presente tesis, mientras el desarrollo de las barbotinas se llevaban a cabo y tras evidenciar la degradación de las pistas conductoras

reproducidas sobre las piezas impresas por deposición de las tintas mediante el sistema Inkjet, se buscó mediante una prueba sencilla generar una matriz de silicona flexible y translúcidas que contuviera a un elemento impreso afín de aislar y proteger éste de la atmosfera exterior. A continuación se puede apreciar en las imágenes de la Figura 404 dicho intento, en donde se recurrió a una de las técnicas de fabricación tradicionales nos referimos en este caso al moldeo por gravedad y en donde en la fabricación del molde se utilizó una impresora tridimensional por FDM.

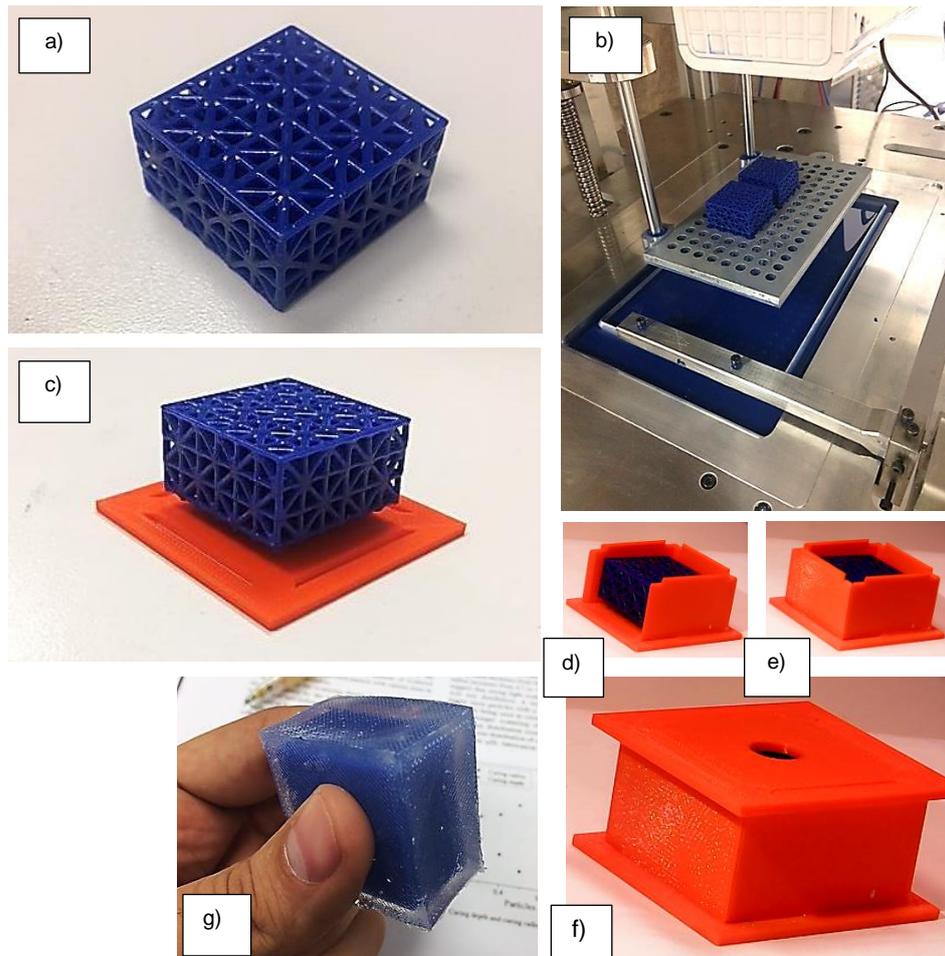


Figura 404: Imagen de una segunda estructura Lattice impresa con el equipo Nhibrid32D mediante el uso de resina Spot-HT con 50 µm de espesor de capa a 1,9 s de exposición a máxima intensidad (a). Piezas sobre la plataforma de construcción (b). Pieza ubicada sobre la base del molde y en sus sucesivas etapas de su construcción (c, d, e y f). Pieza bimaterial final (g) [Fuente: elaboración propia].

A menudo las limitaciones impuestas por los materiales condenan la fabricación aditiva al Rapid Prototyping, pero sin embargo y en este aspecto, la impresión 3D como complemento de las tecnologías de fabricación más tradicionales más no como sustituto a éstas, comienzan a hacerse un hueco en la industria. Así pues, teniendo en cuenta esta situación y

como se ha comentado anteriormente durante la presente tesis, la necesidad de encapsular los circuitos impresos obligo a emplear la impresión 3D basada en la tecnología FDM a genera moldes, lo posteriormente degeneró en el desarrollo de una investigación paralela la cual fundamentada en el rapid tooling y empleando la impresión 3D, permitió la reproducción de elementos anatómicos multi-materiales capaces de emular tejidos blandos y rígidos destinados al ámbito médico en concreto dentro del campo de la oncología, donde los cirujanos ante casos de elevada complejidad capaces ahora de contar con un modelo físico tridimensional de alta fidelidad donde estudiar y practicar las estrategias de la intervención y la extracción de tumores en áreas sensibles y delicadas suponen una nueva e importante herramienta a desarrollar. Sin embargo y debido a la cronología del presente documento centrado en el equipo Nhibrid32D, afín de no perder dicha secuencia el desarrollo de dichos prototipos serán abordados al final del presente documento.

4.2.3. Piezas y dispositivos impresos mediante la integración de los sistemas DLP e Inkjet en el equipo híbrido.

Si bien hasta ahora hemos podido apreciar con cierta cronología las distintas pruebas y piezas o elementos reproducidos por los distintos sistemas de impresión que constituyen al equipo Nhibrid32D por separado y haciendo mención a los problemas y dificultades encontradas. En el presente apartado se expondrán algunas de las pruebas llevadas a cabo con dicho equipo funcionando como sistema híbrido, es decir integrando los sistemas DLP más Inkjet. De esta forma se pretende evidenciar la validez de éste equipo dotando a las piezas reproducidas de pistas conductoras y en definitiva de circuitería embebida dentro de la geometría tridimensional.

Por otra parte, tal y como se expone en el estado del arte, al ser esta máquina la versión más simple y limitada en cuanto a combinación de materiales, ya que se combinan solo dos de ellos, la validación de éste concepto de máquina híbrida abre un camino interesante en cuanto a las capacidades y posibilidades de los sistemas de impresión.

4.2.3.1. Circuitos.

Una de las primeras pruebas que se llevó a cabo con el sistema híbrido fue el de reproducir un circuito simple bidimensional sobre un sustrato de resina sin carga con distintos relieves, afín de proporcionar al elemento impreso la posibilidad establecer la conexión eléctrica con la cual iluminar un led. Para ello se recurrió a una resistencia de 1K Ω y un led SMD como puede apreciarse en las imágenes de a continuación.

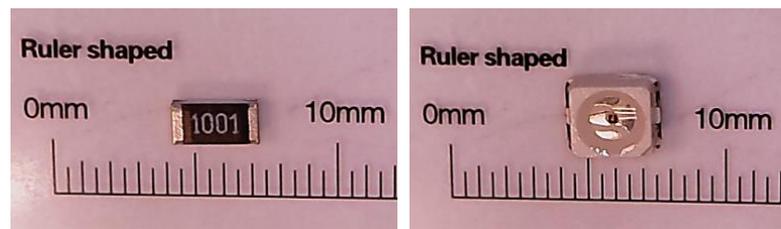


Figura 405: Elementos utilizados en la pieza de prueba inicial de izquierda a derecha resistencia y led ambos del tipo SMD [Fuente: elaboración propia].

El elemento a reproducir consta de una base rectangular plana de 1,9 mm de altura total y de 30x15 mm de base. Afín de diferenciar la altura en la que se ubica el circuito eléctrico de la capa en donde se ha impreso el logo se ha hecho un pequeño relieve de 0,4 mm alrededor de dicho circuito. En las imágenes de la Figura 406 se puede observar la geometría de dicho elemento demostrador.

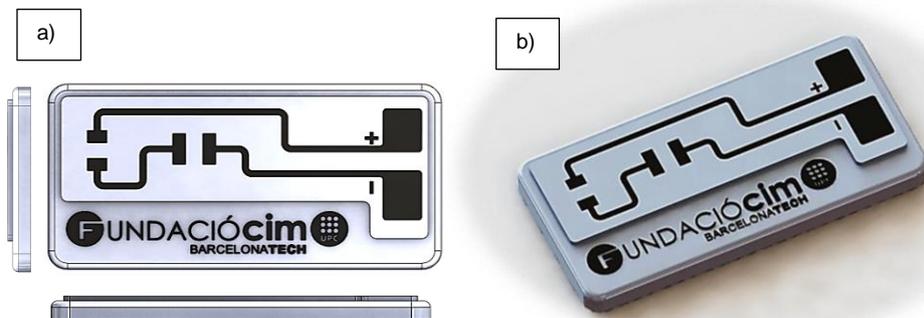


Figura 406: Representación del elemento a reproducir como prueba inicial del equipo de impresión híbrido multimaterial; vista en planta, alzado y perfil (a), y vista tridimensional renderizada del mismo (b) [Fuente: elaboración propia].

La reproducción de la pieza por medio del sistema DLP se ha llevado a cabo mediante el uso de soportes de 3 mm de alto, 0,8 mm de diámetro y una conicidad de 7° , los cuales a su vez se apoyan sobre una base de 0,25 mm de espesor la cual se adhiere a la plataforma de construcción. En total la pieza posee una altura de 5,150 mm, que al ser realizadas por capas de 50 μm de espesor requiere de 103 imágenes proyectadas sobre la cuba de resina. En cuanto al tiempo de exposición se ha utilizado en este caso 4 s. Dimensionalmente, la estructura o geometría tridimensional presenta una tolerancia de 0,1 mm en el plano xy, en dirección z sin embargo algo mayor. Merece la pena mencionar que la viscosidad y la tensión superficial de las resinas influyen en la planitud de la superficie libre existente en la cuba siendo en la mayoría de los casos trasladada a la pieza, haciéndose más evidente cuando ésta, la cuba, no se encuentra totalmente llena. Es por ello que el rebose por exceso de resina en el sistema es importante, y que de cualquier manera ésta se almacenará en canal circundante tras equilibrar su nivel en la cuba.

Las experiencias iniciales obtenidas de la reproducción de este demostrador, evidenciaron una vez más la necesidad de secar y curar las superficies en las que posteriormente requerirán la deposición de las tintas conductoras. En este aspecto, la deposición de las tintas sobre un sustrato ligeramente húmedo y en algunos casos no planos, junto con la interacción química de los solventes de la tinta con la resina dificulta la reproducción estable de los cordones y/o patrones, perdiéndose precisión y calidad en la impresión, las imágenes agrupadas en la Figura 407 muestran las consecuencias de dicha fenomenología.



Figura 407: Impresión del demostrador anterior en el equipo Nhibrid32D mediante el uso de tinta de plata ANP silverjet DGP HRA y resina Spot-HT. a) Reproducción monocapa del circuito. b) Reproducción bicapa sobre el sustrato de resina sin secar con bordes ligeramente curvados. c) Reproducción monocapa sobre el sustrato de resina previamente secado y expuesto a luz ultravioleta [Fuente: elaboración propia].

Como puede apreciarse en las imágenes mostradas anteriores, la reproducción de una sola capa del circuito en una sobre el sustrato DLP se llevó a cabo de forma satisfactoria (Figura 407a), aunque previamente dicho sustrato fue expuesto a un flujo de aire forzado que evacuó parte de los restos de resina húmeda o con un grado de conversión muy bajo. Posteriormente en una segunda prueba se buscó mediante la sobreimpresión de múltiples capas de tinta aumentar la continuidad de las pistas mediante el aumento de la sección de las mismas o lo que es lo mismo mediante una mayor deposición de plata. Los resultados obtenidos evidenciaron la necesidad de fijar previamente las nano-partículas de plata. Ya que la estabilidad de las pistas depende del curado de las tintas funcionales que

previamente habían sido depositadas. Cabe añadir también que la geometría tridimensional de dicha segunda probeta (Figura 407b) se encontraba peor reproducida presentando un cierto abombamiento en su superficie libre, consecuencia de una mala calibración del Wiper y un nivel de resina insuficiente en el depósito. Por último, en la imagen de la Figura 407c, se muestra resaltado la calidad de la reproducción alcanzada tras soplar la superficie impresa por DLP y depositar las tintas funcionales. Sin embargo, se puede apreciar que alrededor de los depósitos de plata generados, existe una cierta humedad consecuencia de la interacción de los solventes de la tinta con el sustrato de resina fotosensible situación que ya se dejó en evidencia en pruebas anteriores como la mostrada en la Figura 370.

Cabe resaltar por otra parte, que el curado de las tintas en este caso por temperatura puede afectar al sustrato de resina. Las imágenes de a continuación evidencian la degradación de la resina fotosensible al verse expuesta durante un periodo de tiempo prolongado a elevadas temperaturas. Sin embargo, siguiendo las recomendaciones de ANP y exponiendo el demostrador por debajo de los 200°C durante 20 minutos, se pudo comprobar que el elemento resiste al proceso de sinterización de la plata aunque si bien con cierta degradación y mostrando un continuidad mínima a partir de la segunda capa de impresión.

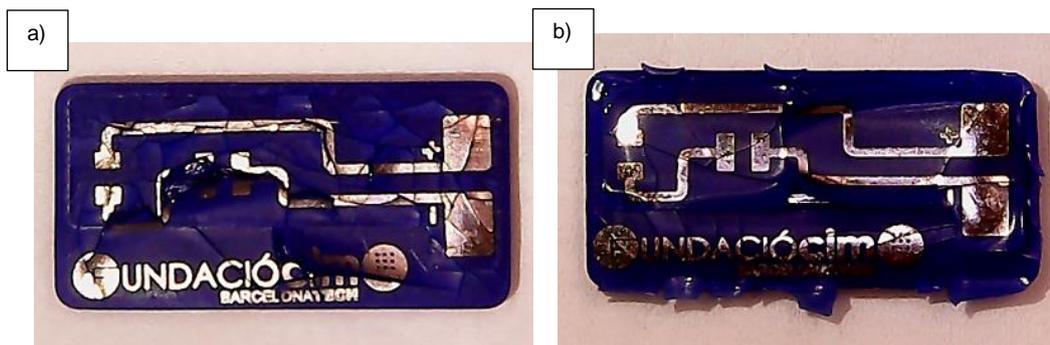


Figura 408: Impresión del demostrador tras el curado de las tintas por temperatura. a,b) Degradación del sustrato de fotopolimérico a consecuencia de una exposición prolongada a alta temperatura de circuito de 4 capas [Fuente: elaboración propia].

Como se puede apreciar en la Figura 408 mediante un curado controlado de las capas de tinta el proceso de impresión híbrido multi-material desarrollado podría decirse que en parte se vio validado al menos desde un punto de vista superficial y de forma bidimensional. Dicho demostrador impreso tridimensionalmente y pensado para ofrecer la posibilidad de emitir luz a través del led SMD, fue reproducido mediante 3 capas, aunque como ya se dejó en evidencia a finales del capítulo anterior (ver Figura 277) la dilatación térmica del sustrato imposibilitó la correcta formación de los depósitos de plata imposibilitando continuidad total del circuito. Por otro lado, al reducir la temperatura de sinterización de éstas ópticamente y dimensionalmente la pieza y el circuito se completó con éxito más no desde un punto de vista eléctrico puesto que la unión entre las nanopartículas de plata no se realizó con éxito.

Finalmente, en cuanto a este demostrador, sucesivas pruebas fueron llevadas a cabo posteriormente, utilizando ahora en vez de resina fotosensible, barbotina de LTCC en distintas concentraciones. En este aspecto la pieza demostrador mostro una mejor reproducibilidad en verde. Una menor proporción de resina en el sustrato y una mayor rugosidad en el mismo debido a las partículas cerámicas mejoraron la afinidad de las tintas con éstos, ofreciendo una deposición más estable y por ende una mayor capacidad de reproducción de los cordones y/o patrones sobre los mismos. Por otra parte, tras conocer el comportamiento de las barbotinas durante los ciclos térmicos de sinterizado, a fin de compensar la contracción dimensional que estas sufren, dichos elementos demostradores fueron impresos a distintas escalas, es decir, un 25, 27% más grandes respecto a las realizadas en resina.

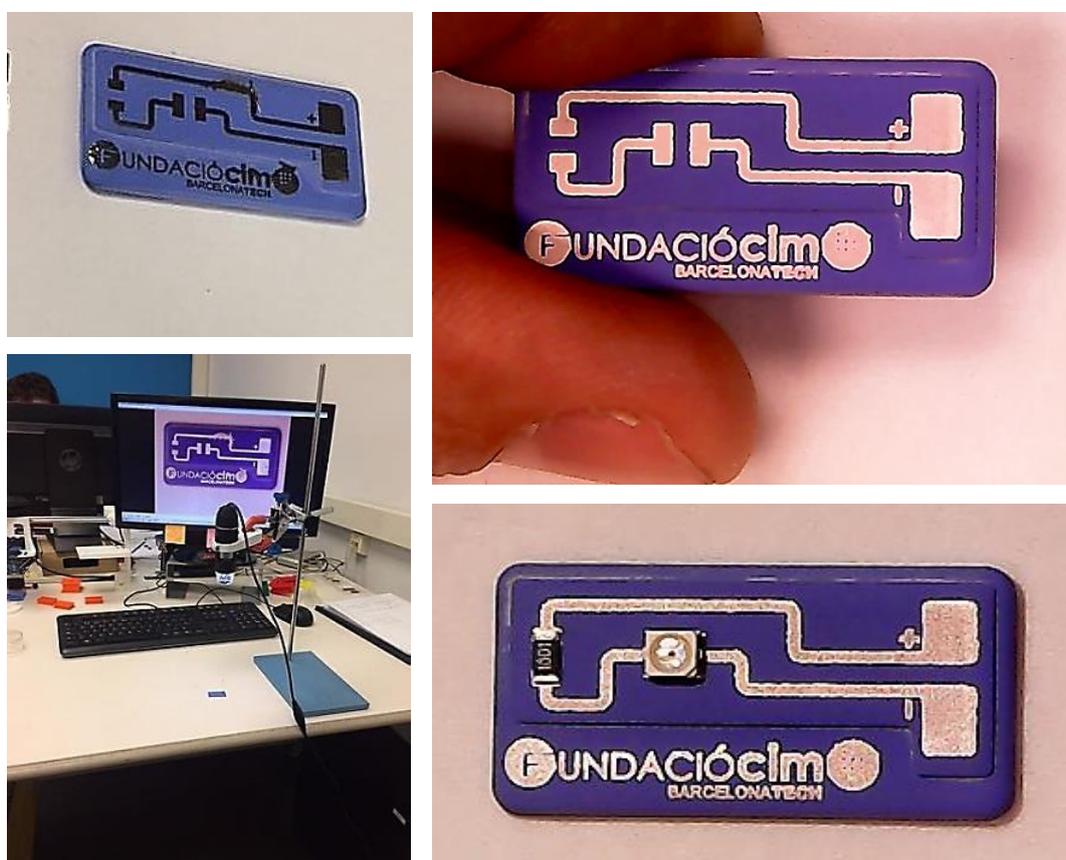


Figura 409: Demostrador anterior reproducido sobre un sustrato cerámico de LTCC en verde impreso con capas de $50\ \mu\text{m}$ y un tiempo de exposición de 3 s, sobre este sustrato y mediante el uso de tinta ANP silverjet DGP HRA con un drop spacing en X e Y de $40\ \mu\text{m}$ circuito eléctrico bicapa a escala 1:1 [Fuente: elaboración propia].

En las imágenes mostradas a continuación se puede apreciar a través del microscopio SEM como la tinta de plata depositada a través de una única capa sobre la superficie del sustrato previamente impreso de la Figura 409, tiende a depositarse en los valles del mismo y en

consecuencia las pistas pueden localmente llegar perder continuidad. En este aspecto cabe resaltar que en los sistemas DLP puesto que las imágenes proyectadas sobre la superficie libre de la cuba son de máscara o lo que es lo mismo, han sido proyectados a través de la reflexión de los microespejos del semiconductor óptico DMD de su interior y por tanto, la imagen está constituida por píxeles dotados de una profundidad de color, y en el caso de ser monocromático como es en éste caso, con 2^8 niveles de intensidad. La superficie exterior de la última capa polimerizada muestra una rugosidad patronizada por dichos píxeles de aproximadamente $63 \mu\text{m}$ de lado. Dichos patrones superficiales se puede apreciar claramente en la Figura 410 dando un aspecto de una especie de tablero de ajedrez.

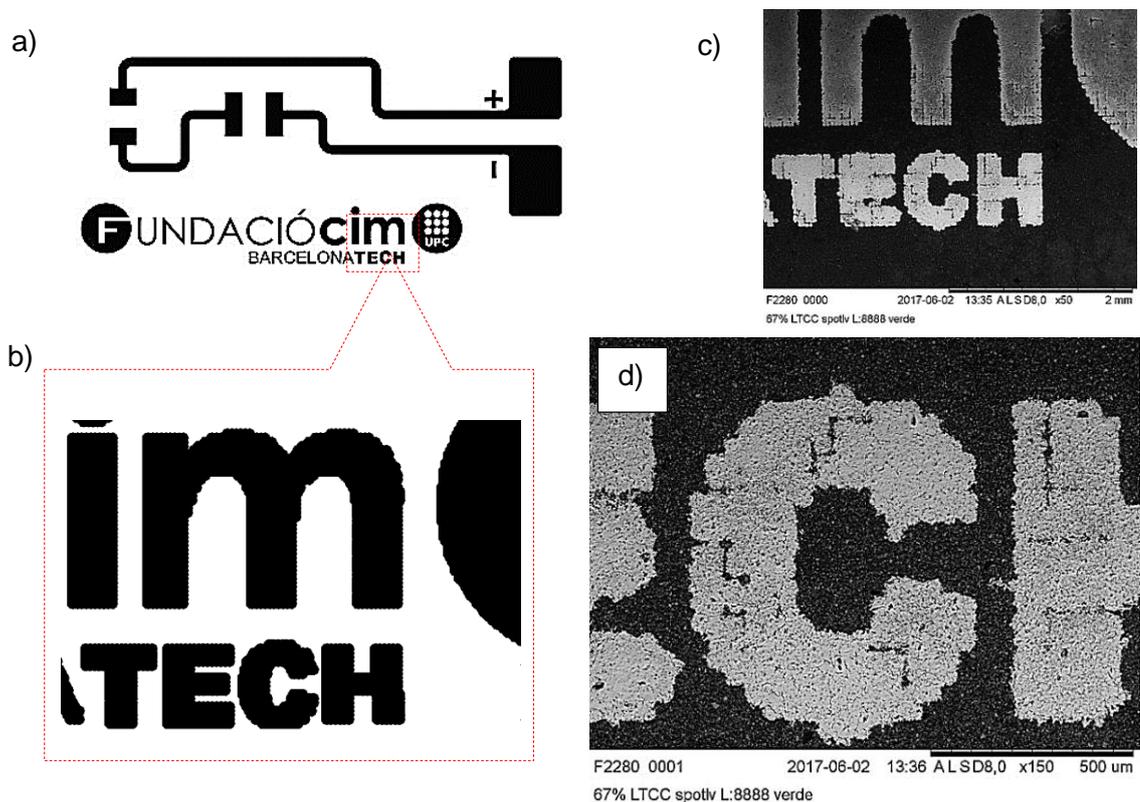


Figura 410: Imagen del circuito reproducido (a). Representación a través del Matlab de una zona del patrón a reproducir mediante el solapamiento de gotas (b). Imagen topológica a través del SEM de la misma área del circuito impreso sobre un sustrato de LTCC en verde mediante una única capa de tinta de plata después de su curado (c). Vista detallada de como los píxeles de la imagen de máscara proyectada sobre la superficie polimerizada por el sistema DLP y que posteriormente constituye el sustrato, afectan la reproductibilidad de los patrones (d) [Fuente: elaboración propia].



Figura 411: Demostrador impreso tras el proceso de sinterización (aparición de fisuras y absorción del circuito mono-capa de plata) [Fuente: elaboración propia].

Por otra parte, y siguiendo con la cronología de pruebas realizadas, a continuación se muestra un ejercicio de diseño realizado con el fin de testear las capacidades del equipo Nhibrid32D. En la imágenes de a continuación (Figura 412, Figura 413, Figura 62), se puede apreciar el diseño y reproducción de un juguete, cuya finalidad es la de validar: primero que el sistema DLP es capaz de reproducir una geometría compleja y segundo, que es posible reproducir una imagen o patrón con el sistema Inkjet sobre un sustrato previamente impreso por DLP y tras fijar dicha tinta sobre el sustrato volver a sumergir la plataforma de construcción y seguir construyendo el objeto sin contaminar la cuba de resina. Esta prueba certifica la posibilidad de generar circuitos multicapa y en consecuencia generar geometrías tridimensionales con circuitería embebida en su interior al menos en usando resinas acrílicas fotosensibles.

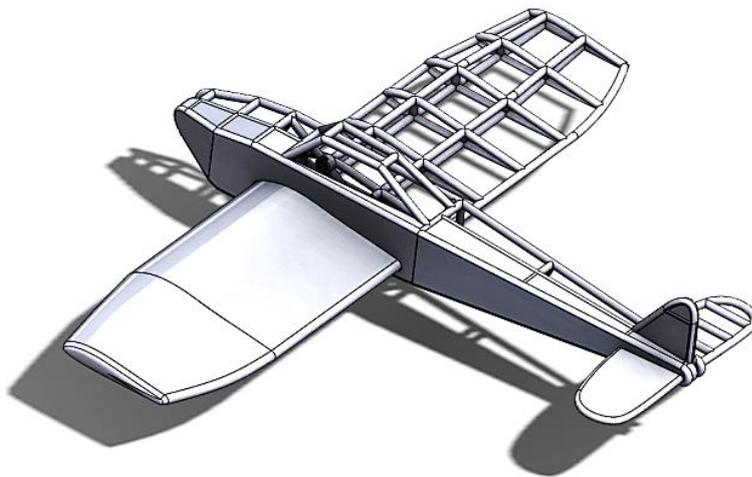


Figura 412: Pieza a reproducir con el sistema híbrido: Avión de juguete con ½ estructura a la vista [Fuente: elaboración propia].



Figura 413: Imágenes de parte del avión de juguete impreso con resina sin carga aun sobre la plataforma de construcción y sin aporte de material por el sistema Inkjet (prueba inicial) [Fuente: elaboración propia].



Figura 414: Reproducción completa de la geometría tridimensional que define al avión de juguete (a) y tras un post-proceso de pulido y pintado imágenes de la pieza impresa acabada (b,c) [Fuente: elaboración propia].

Una vez reproducido satisfactoriamente la geometría tridimensional del avión, sucesivas pruebas fueron llevadas a cabo afín de optimizar la integración y coordinación de ambos sistemas de impresión dentro del equipo Nhibird32D. Por otra parte, una vez validada la posibilidad de dotar al elemento reproducido de circuitería embebida en su geometría, a través de ésta, se buscó de conferir al avión de juguete de nuevas capacidades afín de aumentar la interacción con un posible usuario.

Así pues, ha dicho elemento impreso se le instaló un mini motor de 3.0V DC (MOT105A2B) y a través de un set de tintas electroluminiscentes en una de sus alas se buscó reproducir una lámpara EL capaz de emitir luz.

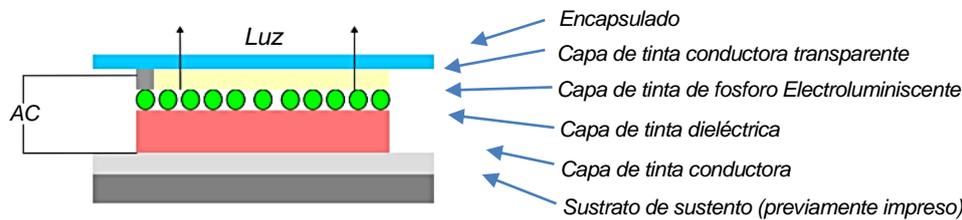


Figura 415: Elementos que conforman la pantalla electroluminiscente reproducida en el ala del avión de juguete impreso por el equipo híbrido desarrollado [Fuente: elaboración propia].

De manera que, una vez reproducido la geometría del juguete mediante el sistema DLP y a través del sistema Inkjet se dotó a ésta de circuitería, tal y como se puede apreciar en las imágenes de a continuación, se procedió a pintar las distintas capas que constituyen las lámparas electroluminiscentes (ver esquema de la figura anterior). Sin embargo, las reducidas dimensiones del juguete y un mal control del espesor de las distintas capas no ofrecieron un acabado satisfactorio pese a que la capacidad electroluminiscente de la lámpara no se vio cuestionada. De forma que, en sucesivas pruebas se empleará un sistema en spray con máscara como post-proceso a fin mejorar el control en la deposición, y la altura de las capas del set de pinturas funcionales que aportan electroluminiscencia al juguete. Pinturas que no han podido ser eyectadas mediante el sistema Inkjet debido al gran tamaño de las partículas inmersas en su interior.

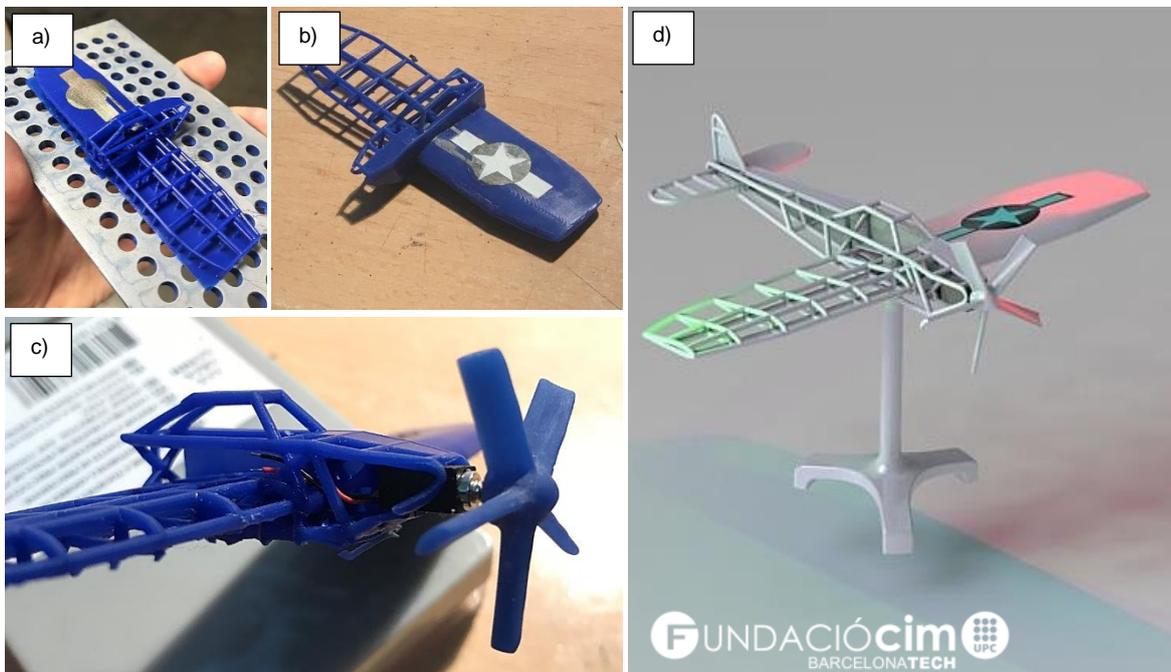


Figura 416: Imagen de la geometría reproducida con parte del circuito impreso sobre el ala izquierda del mismo (a), tras la deposición de las tintas funcionales (b) y con la inserción del

motor aun sin conectar a la base (c). Por último, representación renderizada del Juguete en su estado final [Fuente: elaboración propia].

Como se puede apreciar en la Figura 416a sobre la cota máxima en que se ha reproducido el circuito que alimenta a la lámpara electroluminiscente del ala izquierda, existen numerosas capas construidas posteriormente, luego puesto que es posible la conexión eléctrica entre dos capas consecutivas, a través de la reproducción de este juguete se pudo validar la posibilidad de reproducir circuitos embebidos en el interior de las geometrías tridimensionales, siempre y cuando se emplee otras resina fotosensible.

A partir de este punto numerosas ideas surgieron, aunque si bien no todos ellas han podido llevarse a cabo en el transcurso y desarrollo de la presente tesis, a continuación, se muestran algunas de ellas que por simpleza y rapidez si fueron reproducidas.

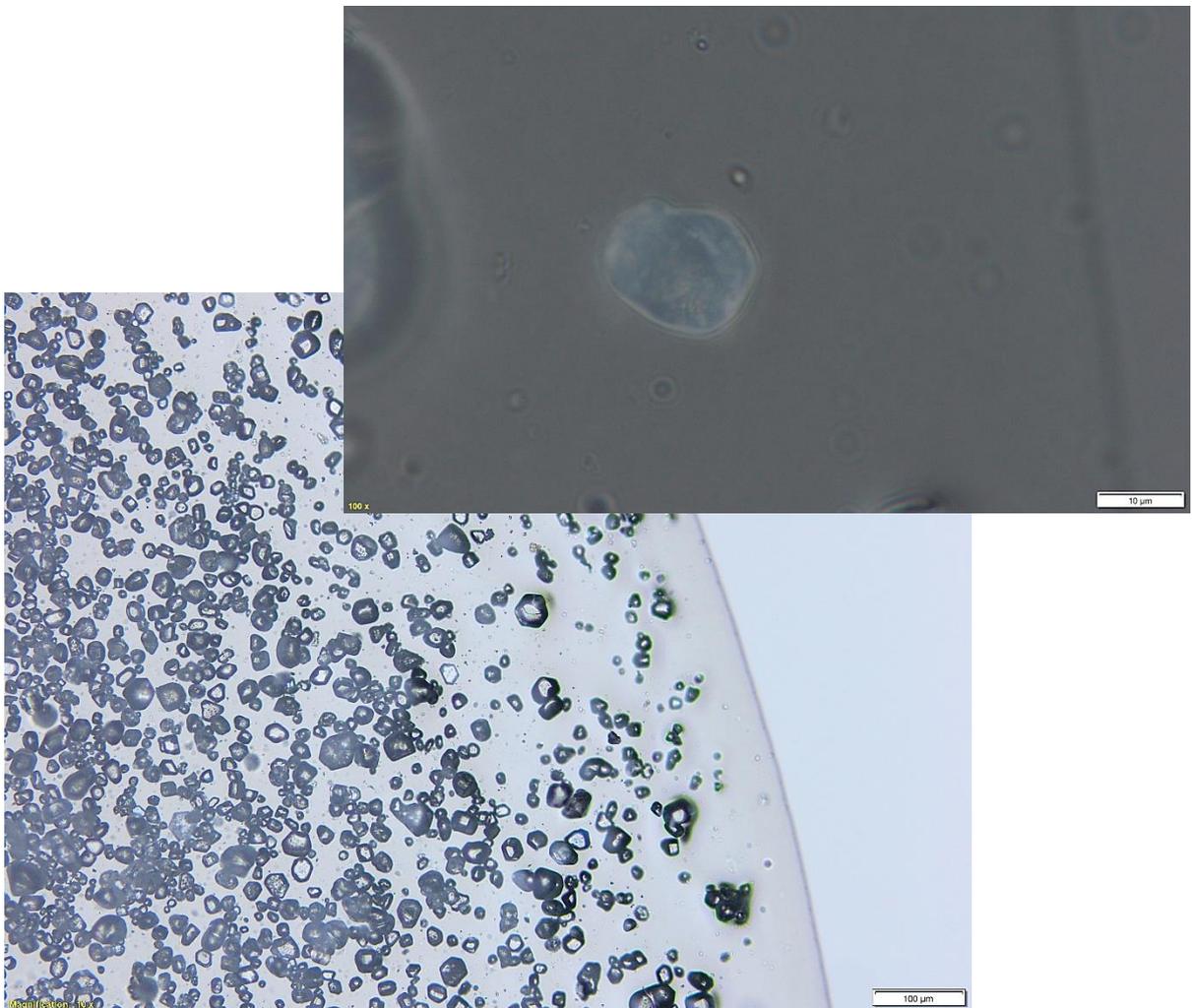


Figura 417: *Imágenes tomadas del microscopio óptico a diferentes aumentos de las partículas fosfóricas contenida en el interior de la pintura EL, cuyos diámetros superan la limitación impuesta por el diámetro de los nozzles ($\phi_p < 0,2 \mu\text{m}$)*

[Fuente: elaboración propia].

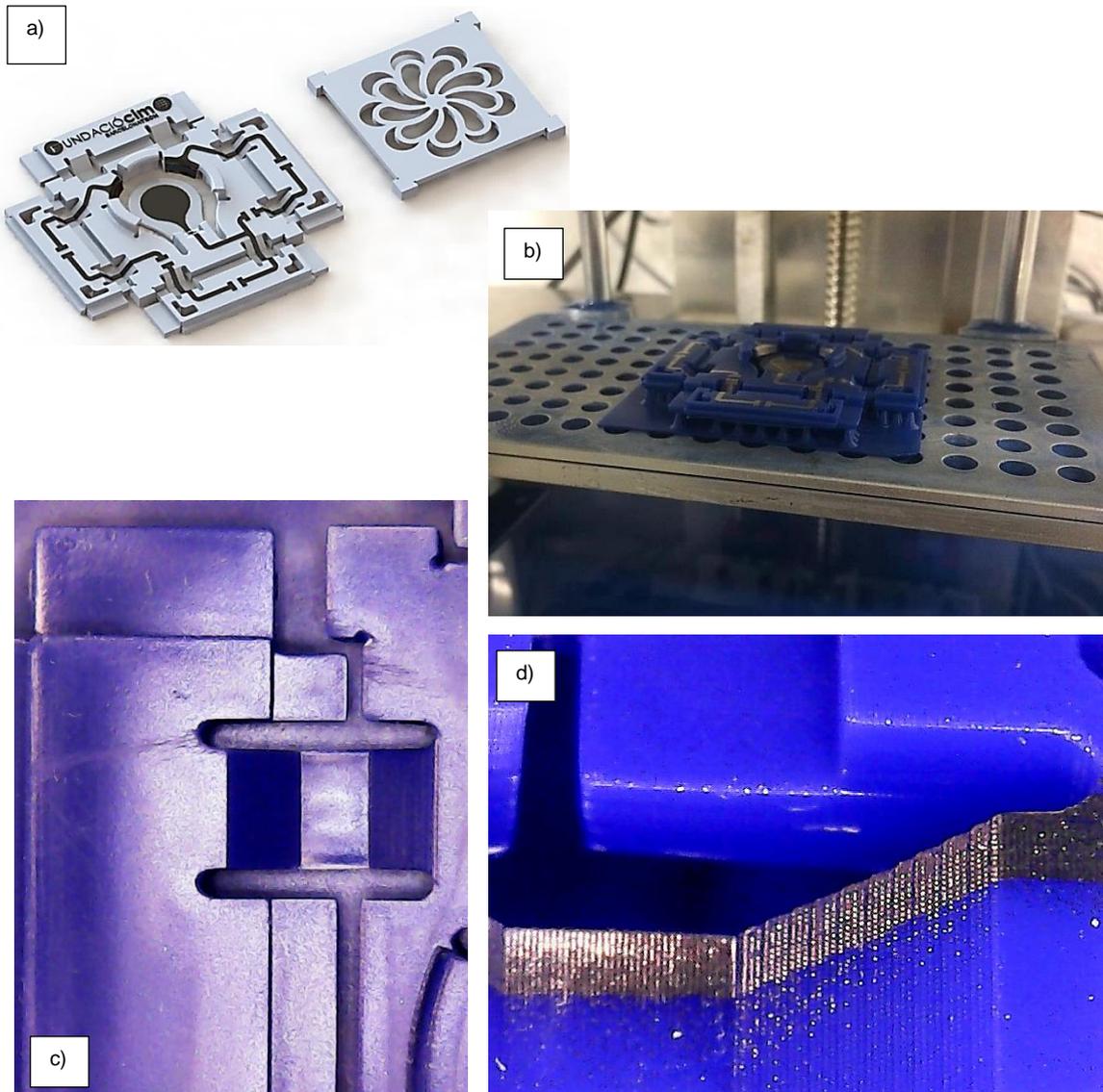


Figura 418: Imágenes de una linterna impresa alimentada por una batería. Representación renderizada a través del CAD de la pieza a imprimir (a). Vista de la pieza en máquina tras finalizar el proceso de reproducción (b) y en detalle de la fidelidad alcanzada por el equipo (c) e impresión de las pistas del circuito rampas de 45° por medio del sistema Inkjet (d) [Fuente: elaboración propia].

Como se puede apreciar en las imágenes anteriores pese a una mala calibración inicial del sistema Inkjet en cuanto a la ubicación de la imagen sobre el sustrato impreso (pieza), y pese a que las gotas tras ser eyectadas presentaban gotas satélites que empobrecieron la calidad de los circuitos, a través de esta pieza se pudo comprobar que la reproducción de pistas sobre chaflanes y planos inclinados de poca altura era viable. Sin embargo, debido a una altura de capa excesiva ($50\ \mu\text{m}$) estos planos inclinados presentaban un perfil escalonado que dificultó aún más la reproducción de las pistas sobre éstos. Aun así, tras

establecer un compromiso entre una altura de capa menor ($25\ \mu\text{m}$) y una mayor cantidad de plata depositada (mayor número de capas de tinta superpuestas) la impresión de esta pieza demostrador pudo realizarse de forma satisfactoria, mostrando la posibilidad de imprimir una pieza con un material de cierta flexibilidad que, tras su plegado y curado de las tintas, estas podrían adoptar nuevas configuraciones pudiendo las pistas ahora ser verticales.

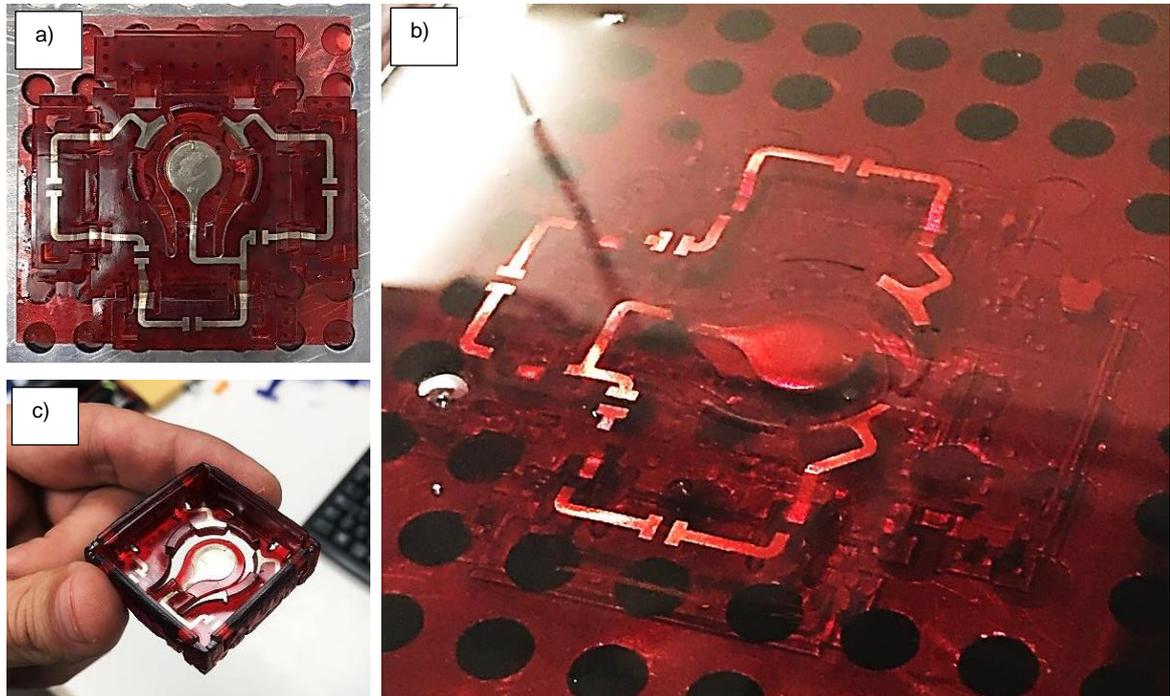


Figura 419: Vista en planta de la fidelidad alcanzada en la reproducción tras reducir la altura de capa a $25\ \mu\text{m}$ previo a la deposición de la tinta y tras el ajuste del Inkjet (a). Vista de la pieza inmersa en la cuba cargada de la misma resina dotada de un colorante rojo traslucido durante su construcción (b) y tras su plegado (c). [Fuente: elaboración propia].

Posteriormente y basándonos en la pieza de prueba inicial de la Figura 406 se utilizó ésta como base para la reproducción de su circuito eléctrico embebido en su geometría tridimensional, construida con la resina fotosensible Spot-A HT. En dicha reproducción y haciendo uso de las experiencias obtenidas de la pieza anterior dicho circuito se vio modificado presentando distintos niveles interconectados mediante rampas a 45° de inclinación.

A través de esta prueba simple se validó la posibilidad de establecer circuitos multicapa interconectados a distintos niveles, aunque si bien metalizaciones verticales no son posibles mediante la deposición de materiales por un sistema Inkjet estas conexiones pueden llevarse a cabo mediante rampas escalonadas.

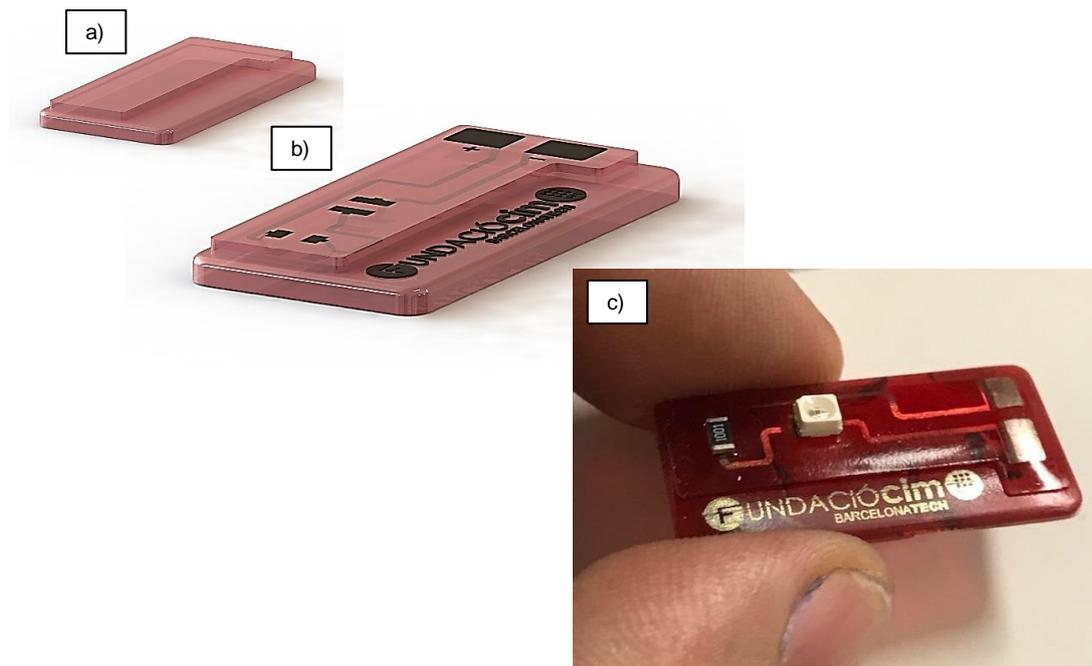


Figura 420: Imágenes del demostrador de la Figura 406 modificado, ahora con el circuito totalmente funcional embebido en la geometría tridimensional; Estructura 3D de resina (a), Geometría 3D con múltiples materiales funcionales (b) y elemento final reproducido (c) [Fuente: elaboración propia].

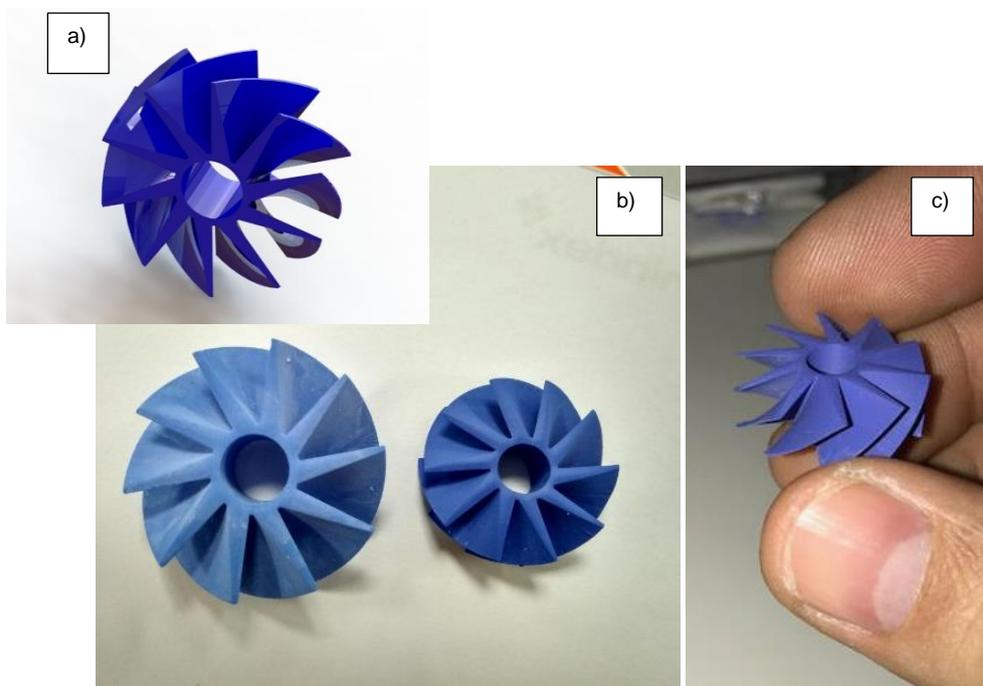


Figura 421: Elemento de revolución reproducido mediante la tecnología híbrida descrita en la presente tesis doctoral, tras la optimización de tanto de los materiales (Barbotina) como de los parámetros de impresión y el ciclo térmico de sinterizado. Imagen renderizada de la pieza a reproducir (a), vista en planta de la misma antes y después del sinterizado (b) y

finalmente imagen de la pieza tras culminar el proceso de reproducción [Fuente: elaboración propia].

Cabe destacar que las últimas pruebas realizadas por el equipo de investigadores de la UB encargados del desarrollo de los materiales empleados en el equipo Nhibrid32D han arrojado una mejoría notable en cuanto a la contracción irregular que sufrían las piezas durante su sinterización.

En este aspecto las pruebas realizadas a través de un ciclo térmico optimizado y bajo una atmosfera inerte de argón evidenciaron que el motivo principal por el cual las piezas impresas presentaban micro fisuras era causado no por un ciclo térmico deficiente sino principalmente por la interacción de los componentes orgánicos de la resina con el oxígeno durante su calcinado, de modo que las últimas pruebas sugieren una importante mejora al respecto, desencallando una de los principales limitaciones a las que hasta ahora nos habíamos enfrentado, la imposibilidad de reproducir un circuito impreso debido a que las micro fracturas de la geometría que imposibilitaba la continuidad eléctrica del mismo de una forma fiable.

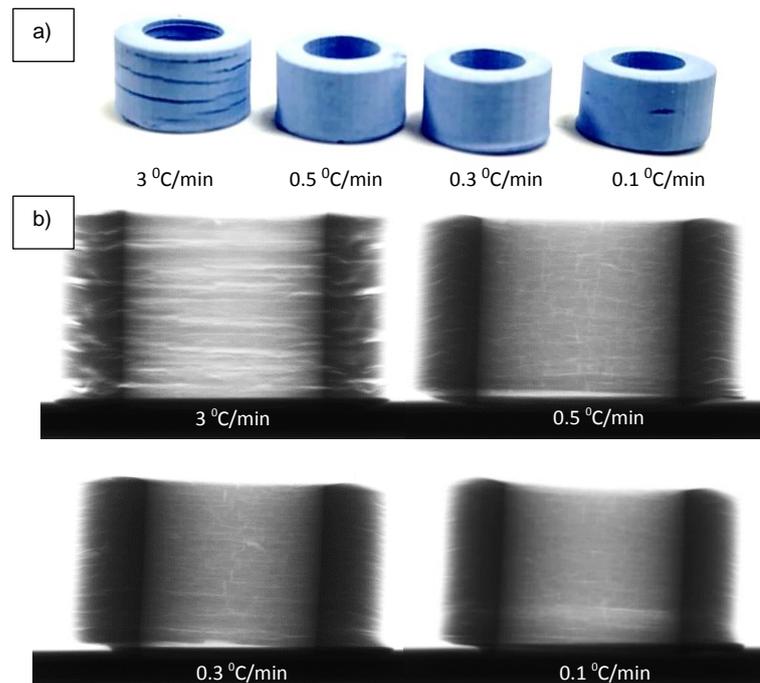


Figura 422: Imágenes de las fracturas y micro-grietas presentes en las piezas en función de la velocidad en la que se incrementa la temperatura en la etapa del de-binding (a) y vista en rayos x de las mismas (b) [Fuente: elaboración propia].

En la Figura 422 se evidencia la problemática presentada en el de-binding (calcinación de la matriz polimérica que sujeta a las partículas cerámicas de la pieza en verde durante el ciclo térmico de sinterización). A menor incremento de la temperatura mejor el comportamiento

del de-binding reduciéndose las grietas y fracturas. Muchas de estas fracturas, sin embargo, desaparecen en la última meseta del ciclo a 870°C (ver Figura 423 aunque en muchos casos las dimensiones de esta son suficientes para destruir la continuidad de las pistas y comprometer la integridad estructural de la pieza. Por motivos de confidencialidad, el ciclo completo no ha sido expuesto, sin embargo, es posible decir que éste tardó 6 días presentando una densidad final de 3.3 g/cm³ y una contracción dimensional de las piezas con una barbotina de Spot-HT+LTCC cargada al 40,4% en volumen, de 26.4% en el plano xy y del 25.1% en el sentido vertical.

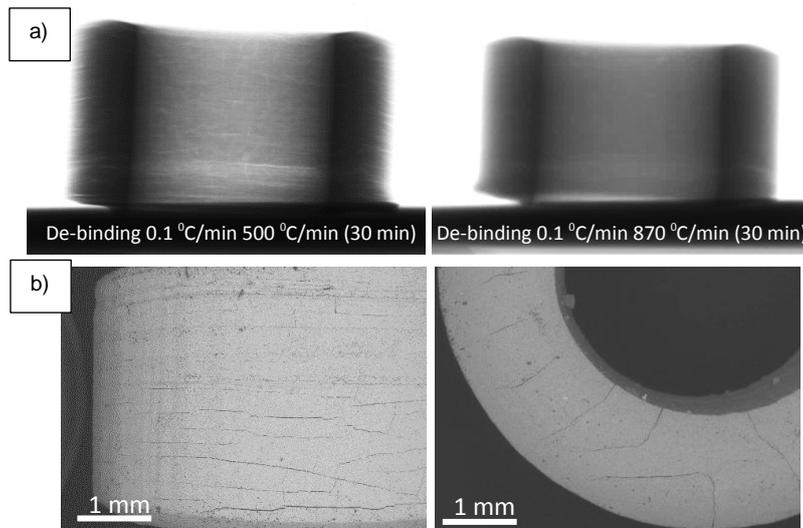


Figura 423: Imágenes a rayos x de una pieza cilíndrica tras superar la etapa del calcinado y del sinterizado en un ciclo térmico optimizado realizado en una atmosfera de aire (a). Imágenes al microscopio óptico de las fisuras producidas por una contracción irregular del mismo (b) [Fuente: elaboración propia].

En busca de superar el problema de la contracción irregular de las piezas nuevos ciclos térmicos fueron desarrollados y en distintas atmosferas, en el presente los mejores resultados han sido obtenidos en un ciclo de 1,5 días de duración, en donde el proceso de de-binding se lleva a cabo en una atmosfera de Argón con 5% de hidrógeno, con un incremento de 0.5 °C/min hasta los 500 °C y tras permanecer a esta temperatura hasta la eliminación completa de la matriz polimérica, se procede a dar inicio a la sinterización en una atmosfera de aire con un incremento de 1°C/min hasta los 870°C. Bajo este ciclo térmico, los investigadores de la UB han podido reducir el ciclo de sinterizado notablemente y la aparición de las grietas presentando un estructura monolítica sin fracturas aparentes, con una densidad final de 3.5 g/cm³ un contracción dimensional de 27.5% en el plano xy y de 27.4 en el eje vertical. En las imágenes de a continuación se muestran los resultados iniciales del proceso en donde se resalta el cambio de color de la pieza durante el de-binding.

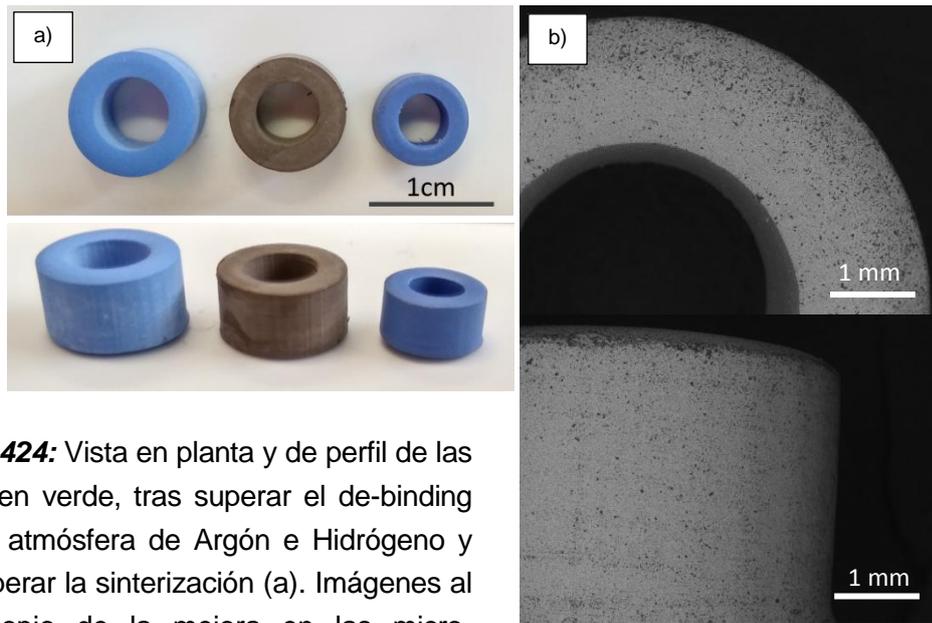


Figura 424: Vista en planta y de perfil de las piezas en verde, tras superar el de-binding en una atmósfera de Argón e Hidrógeno y tras superar la sinterización (a). Imágenes al microscopio de la mejora en las microfracturas que experimentaba la pieza tras su sinterización en una atmosfera inerte (b) [Fuente: elaboración propia].

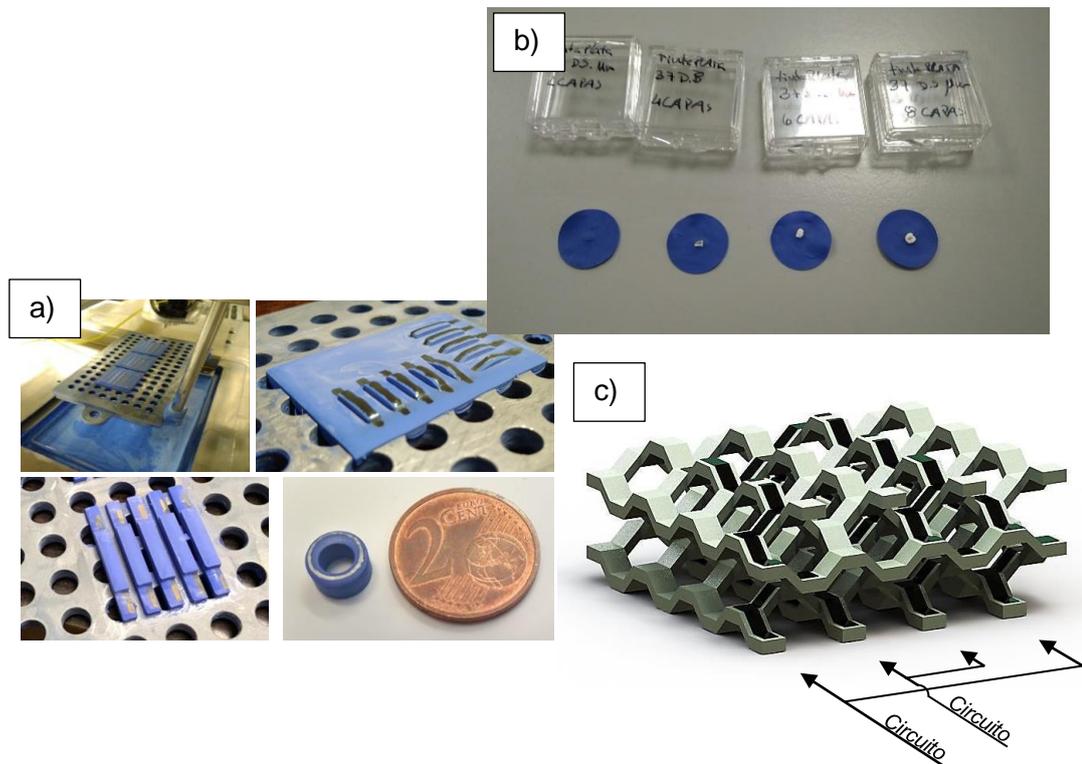


Figura 425: Pruebas recientes realizadas en geometrías simples, en donde los patrones reproducidos con el sistema Inkjet resistieron la sinterización presentando una cierta continuidad eléctrica antes y después del mismo (a). Prueba incrementando la cantidad de los depósitos de planta afín de reducir los efectos de la difusión de ésta, en los circuitos de

las piezas tras la sinterización (2, 4, 6, 8 capas respectivamente contando de izquierda a derecha) b). Tras la mejora en los procesos de sinterización representación de una de las geometrías consideradas como susceptible a ser reproducida por el equipo Nhibrid32D enfatizando la flexibilidad geométrica que estos sistemas híbridos de fabricación aditiva pueden llegar a ofrecer c) [Fuente: elaboración propia].

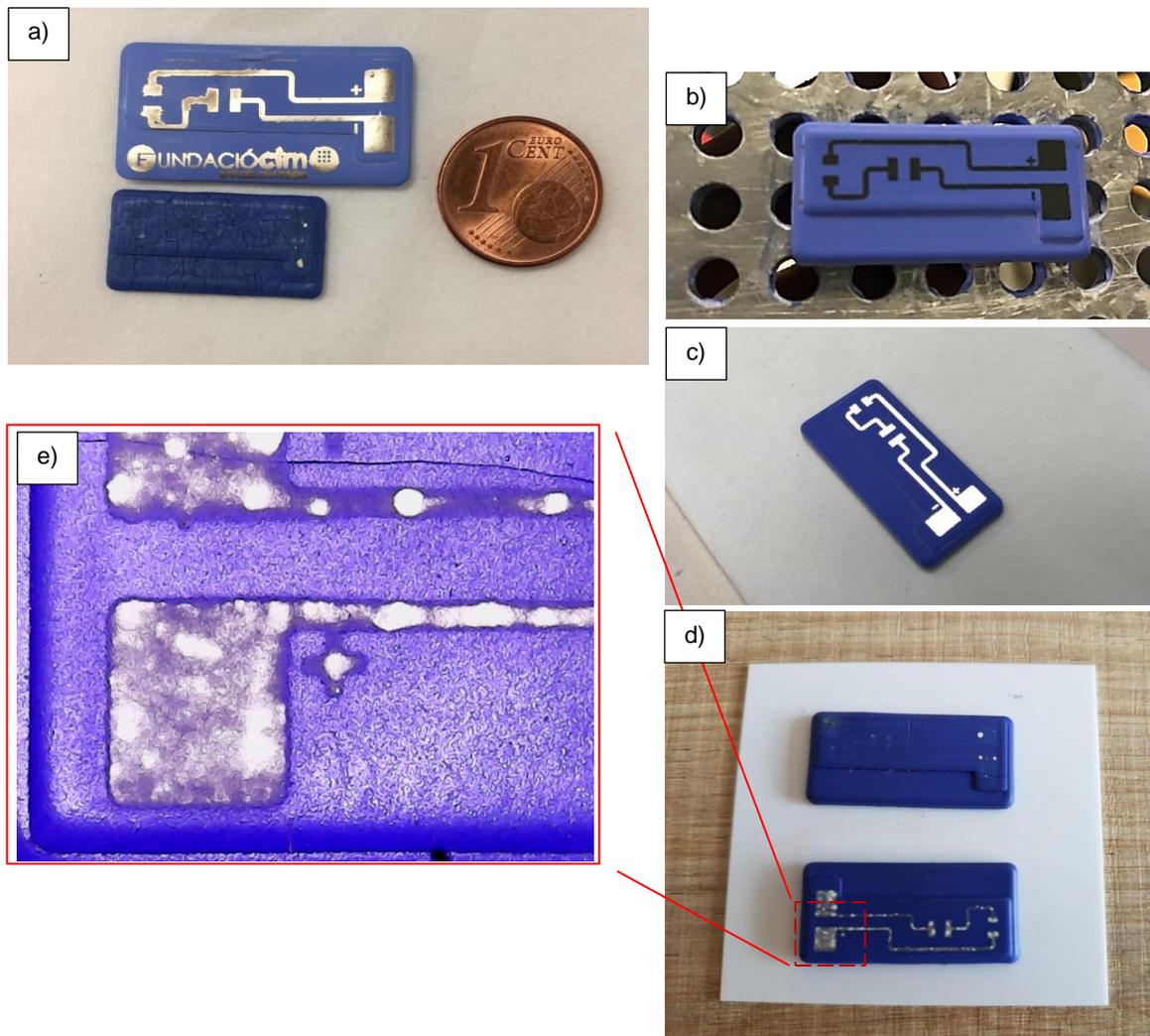


Figura 426: Primeras pruebas realizadas en el equipo Nhibrid32D con piezas cerámicas híbridas sinterizadas a). Tras la evolución de los distintos sistemas, procesos y materiales involucrados, patrón estable reproducido en estado húmedo sobre un sustrato cerámico en verde b). Imagen de la misma pieza tras el curado de la tinta mediante a evaporación forzada de los solventes c) y finalmente dos piezas con el circuito reproducidos mediante 3 y 4 capas de tinta de plata que tras la sinterización de la misma resulto ser insuficiente para la generación de un depósito continuo tras la sinterización d) y ampliación de los electrodos de contacto e) [Fuente: Elaboración propia].

4.2.3.2. Piezas Objetivo (sensores para el mundo automotor).

Siguiendo con la secuencia de eventos descritos en el presente documento, las pruebas realizadas hasta ahora han servido tanto para el desarrollo del equipo de impresión híbrida como para el desarrollo de los materiales involucrados. Sin embargo, el cúmulo de experiencias descritas ha solicitado más tiempo del previsto, por este motivo a continuación se exponen algunas de piezas objetivo o al menos similares a estas que, junto con los partner involucrados se pretenden reproducir en un plazo de tiempo relativamente corto.

Así pues, en el presente (momento en el que esta tesis se ha redactado) todavía quedan muchas problemáticas por solventar; productividad, fiabilidad y precisión son algunas de ellas, de manera que la reproducción de dichos sensores cerámicos destinados al sector automotor, aún se mantienen en desarrollo. Por otro lado, y por motivos de confidencialidad a continuación se muestran algunas imágenes tomadas de internet como posibles piezas susceptibles a ser reproducidas en un sistema híbrido como el expuesto en la presente tesis.

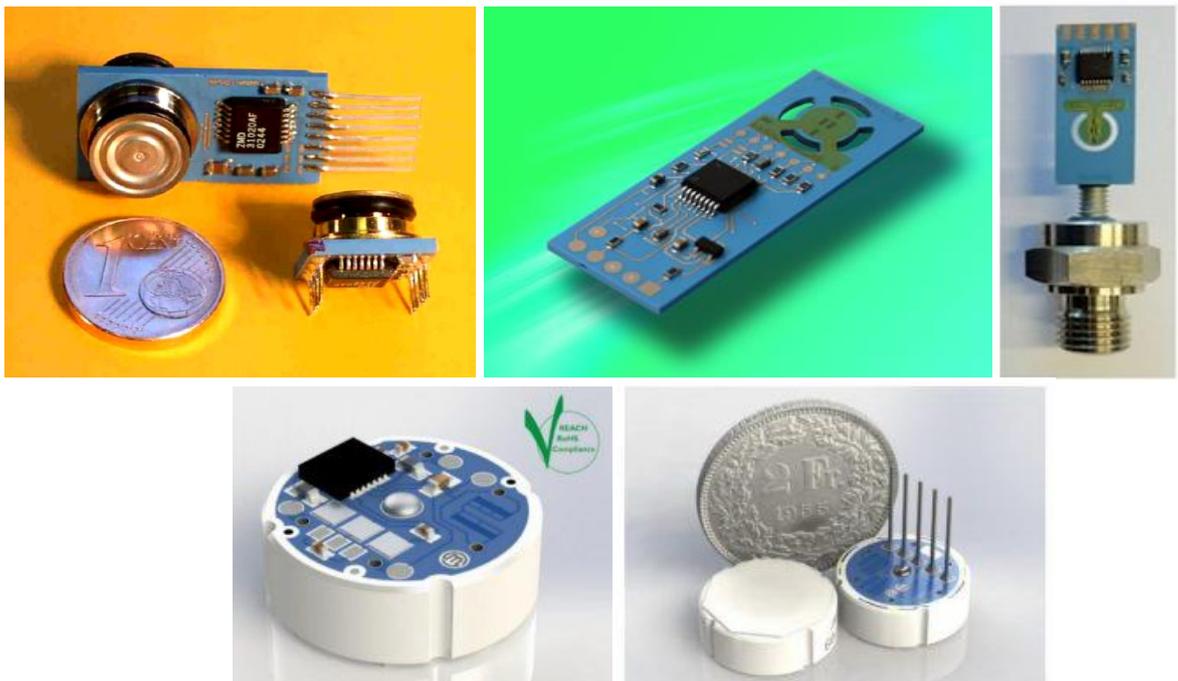


Figura 427: Distintos ejemplos de sensores de presión desarrollados bajo la tecnología *thick film* o de capa gruesa en LTCC [33], [34].

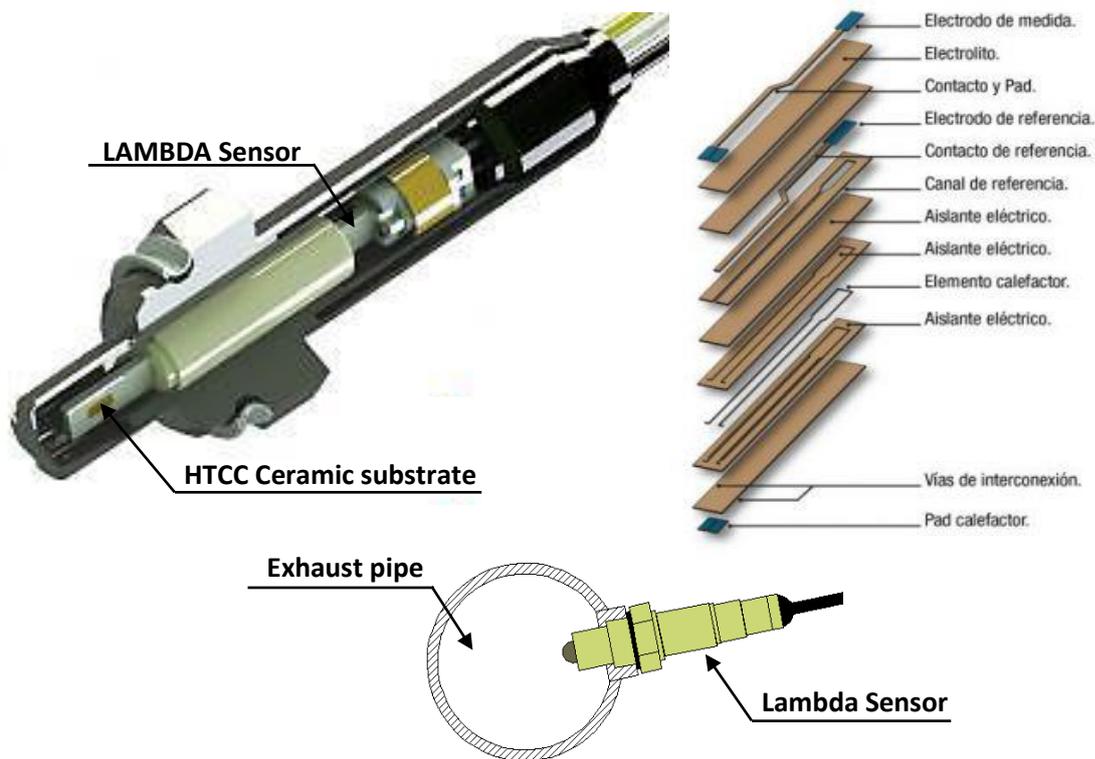


Figura 428: Representación esquemática de una sonda Lambda, comercializada por la empresa Francisco Albero S.A.U (FAE) [Fuente: elaboración propia].

Las ilimitaciones geométricas que los sistemas de híbridos fabricación aditiva ofrecen supondrán sin duda una gran aportación al estado actual de la técnica, permitiendo agregar un gran valor añadido a este tipo de dispositivos electrónicos.

Hasta ahora las técnicas de manufactura destinadas a la fabricación de circuitos híbridos de capa gruesa se limitaban a un mudo bidimensional, en este aspecto la flexibilidad geométrica que plantea el desarrollo de un sistema de impresión híbrido como el expuesto en la presente tesis, permitiría una mayor integración de componentes y la fabricación de geometrías mucho más complejas, en donde por ejemplo mejorar la eficiencia de estos dispositivos con una mejor relación resistencia peso, en donde la estructura cumplirá con nuevas funciones y pudiendo estas ser customizadas a voluntad.

La personalización en este caso volvería ser uno de los pilares fundamentales de la fabricación aditiva con la cual se pretende hacer frente a su elevado coste y baja productividad.

Reproducción de modelos anatómicos tridimensionales físicos y multimateriales.

En paralelo al desarrollo del equipo Nhibrid32D y como consecuencia de la implementación de las tecnologías de aditivas en otros campos como es el médico y en concreto en el de la oncología, a continuación se muestra un ejemplo de la inmersión de los materiales

funcionales dentro de la impresión 3D (motivación de la presente tesis) en el afán de reproducir lo que somos capaces de percibir buscando incrementar la interacción con el objeto impreso. En este aspecto dichos objetivos llevaron al desarrollo de un conjunto de técnicas y procesos fundamentados en la impresión 3D con el objetivo de reproducir físicamente partes anatómicas del cuerpo humano [Patente Europea: Reference number 17-8844 and Submission number: 300264576 EP].

La ilimitación geométrica ofrecida por la impresión 3D proporcionó en este aspecto la capacidad de reproducir geometrías complejas capaces emular en alta fidelidad las complicadas y caprichosas formas de dichos elementos anatómicos deseados a partir de pacientes con cáncer, aunque los materiales disponibles limitaban su capacidad de reproducirlos geometrías blandas, capaces de simular los distintos tejidos o al menos en la semejanza que los médicos y cirujanos solicitaban.

Así pues, teniendo en cuenta que el uso actual en la industria de la impresión 3D, es como complemento a las técnicas tradicionales de manufactura, se empleó ésta en la fabricación de moldes capaces de contener cauchos y siliconas, elementos blandos, flexibles, transparentes y translucidos capaces de proporcionar al usuario, en este caso doctores y cirujanos, distintas propiedades sensoriales a prototipos multi-materiales, en este caso órganos y otros elementos anatómicos.

Por otra parte, la introducción de los materiales funcionales tomados del printing electronics en dichos modelos anatómicos físicos, permitió resaltar venas, arterias y tumores mediante una atribución selectiva a los mismos de la capacidad de emitir luz, es decir mediante la dotación de una capacidad electroluminiscente.

Como ejemplo a dicho desarrollo tecnológico a continuación, se muestra el exitoso caso de una mujer de 70 años de edad cuyo hígado en metástasis presentaba sendos tumores que requerían de su extracción inmediata.

La complejidad de la operación requirió de un modelo tridimensional físico del mismo donde el equipo de médicos y cirujanos pudieran cuestionarse por adelantado las estrategias de la intervención en busca de un mejor enfoque que minimiza los riesgos y posibles complicaciones posteriores. Por otra parte, el uso de materiales blandos y translúcidos simuladores del tejido hepático por su consistencia, permitió ofrecer al cirujano a través de su manipulación la posibilidad de practicar las incisiones correspondientes afín de extraer la mayor cantidad de masa tumoral sin afectar a otras áreas sensibles.

El valor añadido de dicho modelo anatómico en alta fidelidad y constituido por múltiples materiales, no solo se vio incrementada por la dotación al mismo de atributos táctiles (combinación de materiales: duros, rígidos flexibles y elásticos) sino que también se vio incrementada gracias a la dotación de atributos crómicos (coloración, opacidad,

translucidez) así como también y más importante la posibilidad de emitir luz de forma localizada capacitando al mismo de resaltar zonas de interés, en este caso de interés para el cirujano, es decir, mediante la dotación de una propiedad electroluminiscente.

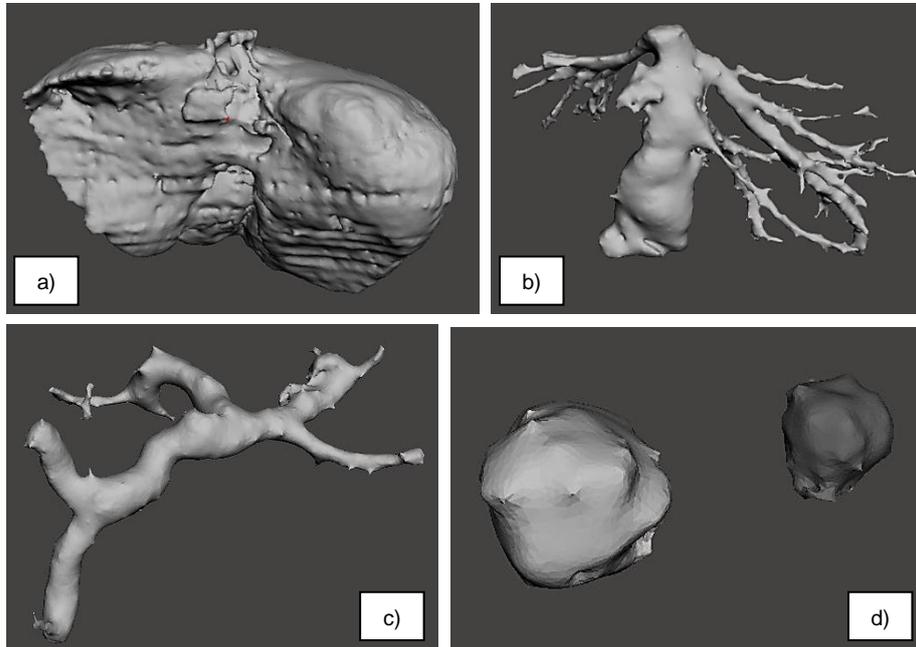


Figura 429: Imágenes DICOM (Digital Imaging and Communication in Medicine) proporcionadas por el departamento de radiología del Hospital Clínic de Barcelona. (a) modelo tridimensional de la superficie hepática, (b) modelo de la vena cava, (c) modelo de la vena porta y (d) sendos nódulos tumorales [Fuente: departamento de radiología del Hospital Clínic de Barcelona].

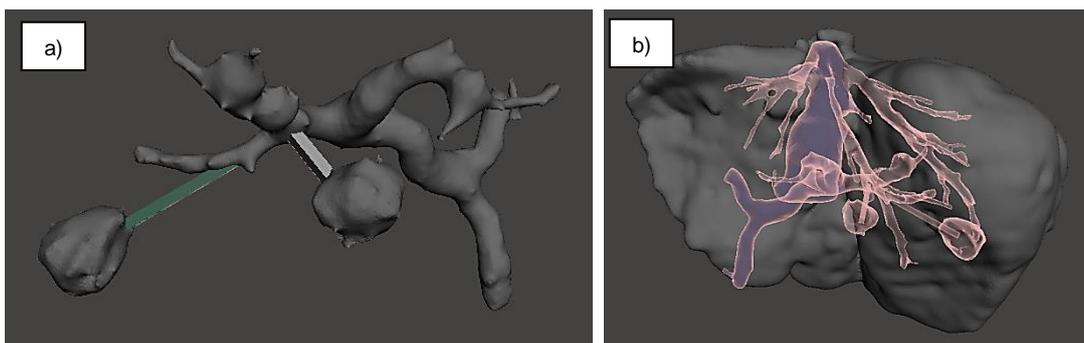


Figura 430: Tras el tratamiento digital de las imágenes anteriores mediante el programa Meshmixer (a) unión mediante vigas de los nódulos tumorales a la vena porta y (b) Resaltado conjunto de vasos y tumores ubicados dentro del tejido hepático generando un archivo digital único imprimible [Fuente: Elaboración propia].



Figura 431: Imagen renderizada realizada a través del programa Keyshot del hígado en cuestión desarrollada a partir de las imágenes DICOM (Digital Imaging and Communication in Medicine) tomadas de una tomografía computarizada junto con una resonancia magnética del paciente [Fuente: elaboración propia].

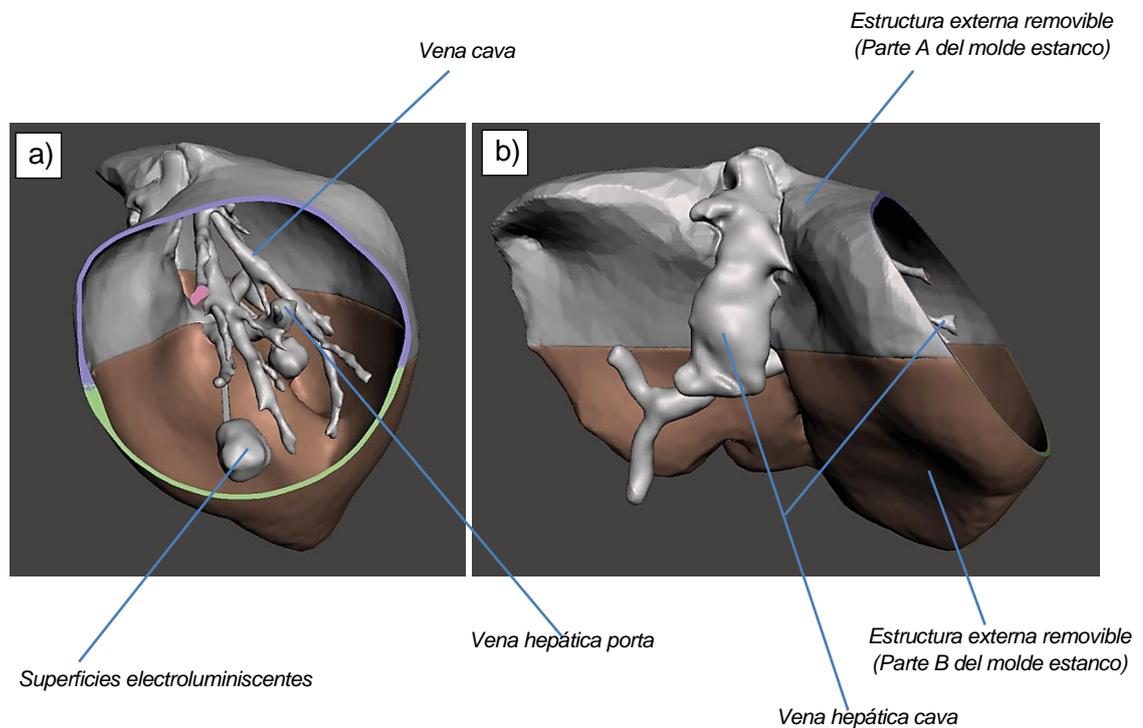


Figura 432: Archivo imprimible del hígado en estudio [Fuente: elaboración propia].

La reproducción del elemento anatómico representado en la Figura 431 requirió de múltiples etapas y procesos los cuales pueden ser apreciados en el artículo por publicar del apartado

6.2 y sin embargo se ven resumidos superficialmente a continuación y mostrados en el esquema la Figura 433.

Cabe destacar que la secuencia de etapas establecidas en dicho esquema, se fundamentan en la impresión 3D pudiendo abarcar todas aquellas tecnologías donde; la deposición del material se realiza por punto, así como también la energía (FDM, FFF), aquellas donde el aporte de material se realiza por línea y la energía por capa (Polyjet), aquellas donde el aporte de material se realiza por capa (lecho) y donde la energía se aporta por punto (SLA, SLS) o por línea (3DP, Multi Jet Fusion) o por capa (MIP-SL, DLP).

Por otro lado, requiere de otros procesos de fabricación más tradicionales y conocidos, como son: el lijado, pulido, el moldeo por gravedad y el pintado manual tanto por pincel o brocha, como por la deposición atomizada o pulverizada de la pintura a través de una pistola HVLP (High Volume Low Pressure) o en spray.

Por otra parte, en la reproducción de dichos modelos anatómicos de forma física y a través de múltiples materiales, hicieron falta múltiples pruebas y el empleo de distintas siliconas y cauchos afín de reproducir las durezas solicitadas por los cirujanos, pero fundamentalmente se puede resumir que su reproducción fue realizada mediante la siguiente secuencia de procesos: primero tras recibir los archivos por separado y tras editarlos generado un archivo imprimible, de extensión STL en este caso, se ha reproducido una geometría a través de la impresora 3D de tecnología FFF, la cual cumple una doble función: reproducir venas, arterias y tumores, así como una cascara estanca exterior cuya concavidad hará las funciones de un molde.

La ilimitación geométrica que ofrece la fabricación aditiva permite reproducir geometrías muy complejas y en este caso geometrías cóncavas de espesores muy delgados que al cumplir una función de recipiente contenedor de las siliconas y/o cauchos permiten su fácil ruptura. Esta propiedad permite la extracción directa de las piezas (modelos tridimensionales anatómicos) del molde mediante la destrucción del mismo.

Así pues, tras la construcción del molde o de los moldes en la secuencia de pasos descrita en la Figura 433, se procede a la eliminación de los soportes (material de sacrificio) y en el caso de que este material sea hidrosoluble como el PVA (Polyvinyl alcohol) dicha eliminación se realiza mediante la inmersión total o parcial del elemento reproducido en agua (ver Figura 434). Finalizada esta etapa se procede a su lijado y pulido afín de reducir la rugosidad interna del mismo y posteriormente se le aplica un recubrimiento epóxico.

Concluida el acondicionamiento de los moldes se procede a la creación de las lámparas electroluminiscentes mediante el pintado localizado de 4 capas funcionales superpuestas, es decir: una primera capa conductora, seguida de una segunda dieléctrica, una tercera electroluminiscente y finalmente una capa conductora transparente.

Finalmente, el proceso de construcción finaliza con el ensamblaje del molde y el vertido de los cauchos y siliconas curables por aditivos catalíticos. Tras su curado la extracción del elemento moldeado se lleva a cabo del mismo mediante la destrucción total o parcial del molde impreso y por último las lámparas electrolumiscentes son conectadas a una fuente de corriente alterna. En el caso mostrado, se emplea un convertidor DC/AC de alta frecuencia alimentado por baterías de 9V.

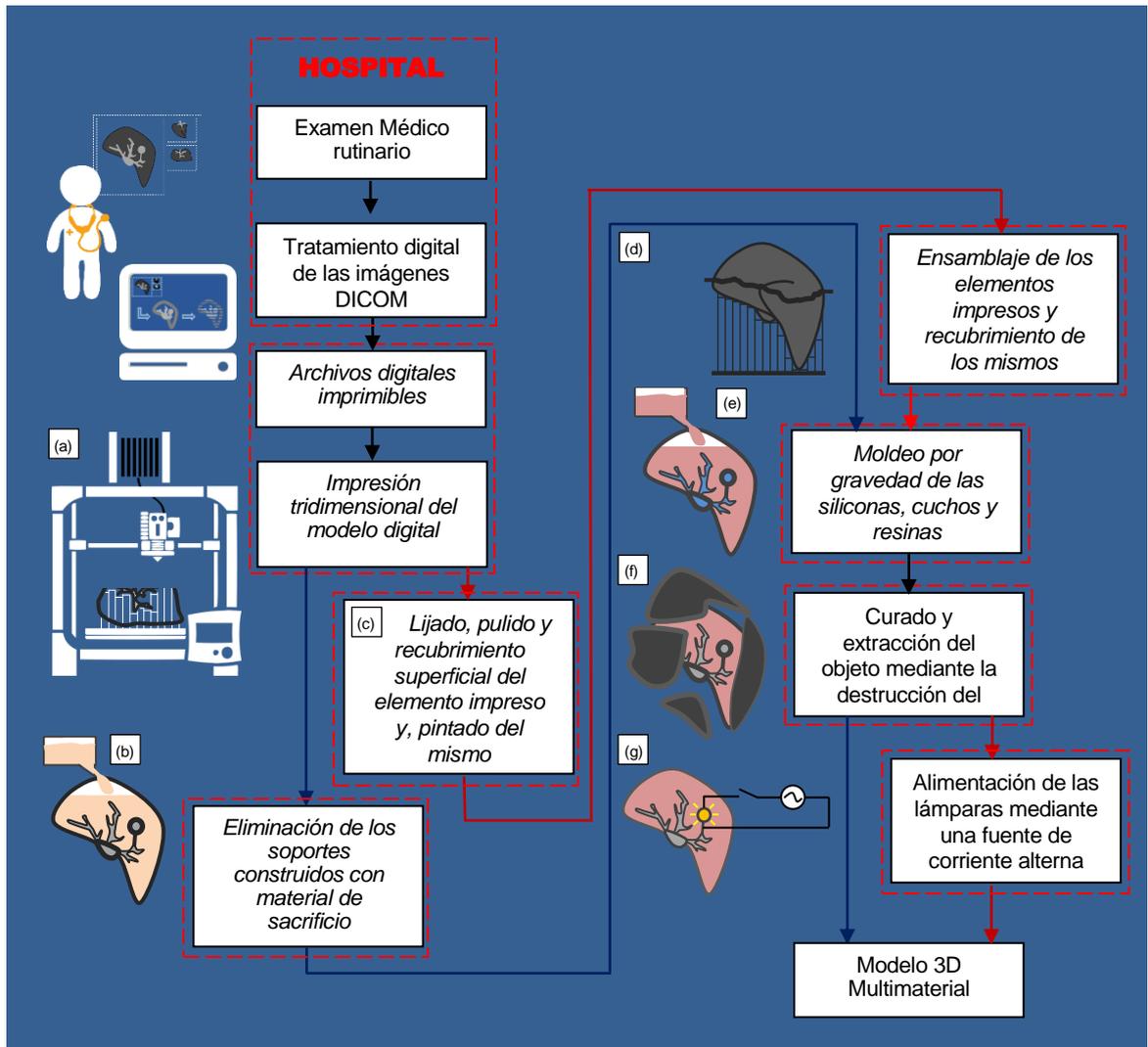


Figura 433: Representación esquemática de la secuencia de etapas que han constituido el proceso de fabricación de los modelos físicos funcionales a partir de un archivo digital mediante un conjunto de técnicas tradicionales, combinadas y fundamentadas en la impresión 3D [Fuente: elaboración propia].

El proceso mostrado esquemáticamente en la figura anterior fue concebido con el objetivo proporcionar al usuario la máxima libertad posible, en este sentido, la tecnología de impresión empleada en la reproducción de los moldes es indiferente, pudiendo ser cualquiera (FFF, SLA, SLS, Polyjet, 3DP, Multi Jet Fusion, MIP-SL, etc.). Debido a su

sencillez ofrece la posibilidad de ser reproducido por cualquiera en cualquier parte, sin necesidad de un conocimiento previo o una mínima cualificación, es decir, con tan solo seguir una secuencia de pasos preestablecida. De esta forma toma un carácter global, ofreciendo la capacidad de reproducir modelos anatómicos complejos en cualquier lugar del planeta, es decir, allí donde exista una ferretería, una impresora 3D y acceso a internet.

Esta secuencia de pasos pone de manifiesto una vez más la desvinculación entre el diseño y la reproducción. La primera corre de la mano de un grupo de especialistas en CAD en asociación con médicos y radiólogos mientras que la segunda, el acto de reproducción en sí, queda abierta a cualquiera. Sin embargo, el grado de variabilidad inducido por el factor humano y las implicaciones de una mala reproducción alejan dicha posibilidad. Cabe destacar, sin embargo, que ante casos de extrema urgencia la propia intervención humana en los distintos procesos y el tiempo requerido en cada uno de ellos pueden llegar a limitar su aplicabilidad debido a su duración.

En este aspecto, en cuanto a la disponibilidad del prototipo en relación al tiempo de fabricación, éste requirió de 158h y 24 min en el prototipo con iluminación y en el prototipo simple dicho tiempo se pudo ver reducido a 85h y 48 min. Por otra parte, un prototipo de estas características impreso completamente mediante la tecnología Polyjet requeriría de 40h aproximadamente. Siendo necesario resaltar que éste último no ofrece la capacidad de reproducir tejido blando al mismo nivel de dureza que a través del empleo de siliconas moldeables, así como tampoco la capacidad de iluminación a día de hoy.

Así, la introducción de múltiples materiales en la reproducción del objeto ha permitido dotar al mismo de distintas propiedades sensoriales, en este caso, visuales y táctiles. A través del empleo de materiales funcionales, la interacción con el modelo impreso se ha visto potenciada, tomando una nueva dimensión, ya que no solo ha ofrecido la posibilidad de resaltar zonas sensibles y a voluntad, como: tumores, venas, arterias, huesos, tendones, etc., sino que, además pueden ser resaltadas de forma separadas, independientes, con distintos colores y de forma secuenciada.

De modo que, un objeto impreso con una geometría particular reproducido de una forma simple y barata ha pasado ahora a ser una herramienta de gran valor más no coste, con la cual los médicos y cirujanos, ante casos complejos, pueden con antelación: estudiar y analizar la mejor forma de proceder minimizando los posibles riesgos y posibles complicaciones posteriores, practicar en ella las incisiones correspondientes y tras finalizar cumplir con una función comunicativa, por ejemplo en la docencia mostrando a otros del gremio el caso que representa, permitiendo así aprender de él.

En el caso presentado anteriormente, el modelo físico mostro un coste muy competitivo (entorno a los 70-120 € en función de si lleva iluminación o no respectivamente, en comparación con los 1500-2000 € que costaría su impresión completa mediante la tecnología Polyjet), es decir, debido que puede ser reproducido por cualquiera en cualquier

parte, haciendo uso de los medios y costes locales, esta tecnología, puede salvar vidas por ejemplo en lugares remotos del tercer mundo sin necesidad de endeudar a una familia durante mucho tiempo.

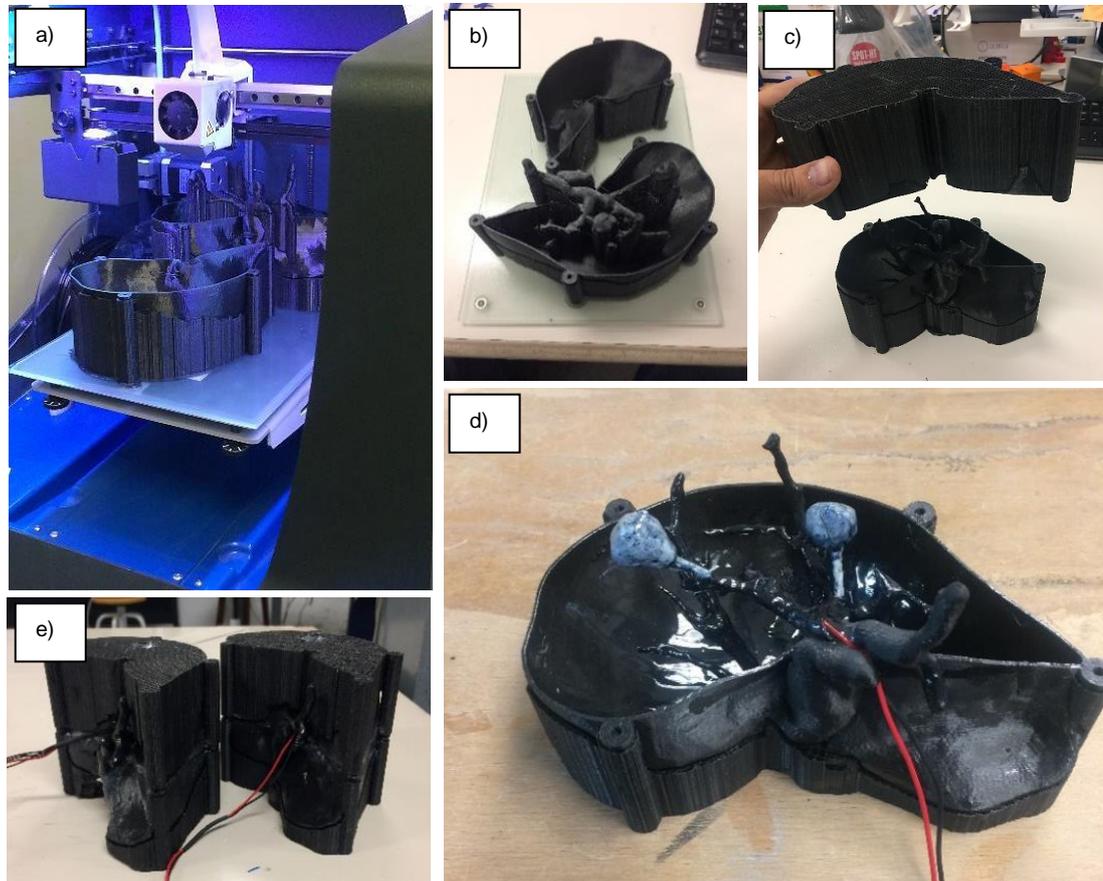


Figura 434: Imagen del modelo reproducido mediante la impresión 3D de un único molde en PLA (ácido poliláctico o poliláctico) y PVA (Alcohol de polivinilo) (a). Eliminación de los soportes hidrosolubles del interior del molde (b) y vertido de la silicona Smooth-On EcoFlex 00-30 (c) [Fuente: Elaboración propia].

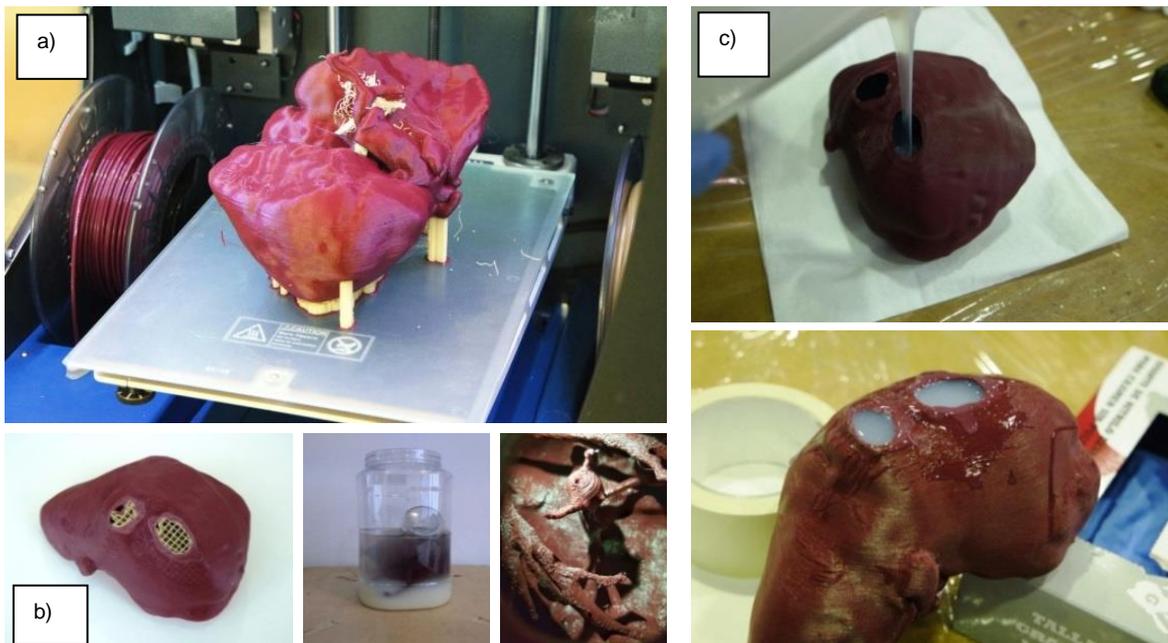


Figura 435: Imagen de la impresión de las partes que constituyen el molde del hígado a reproducir fabricadas completamente con PLA de color negro (a), vista en perspectiva de las piezas impresas sobre plataforma de construcción (b) unión previa de ambas partes del molde (c), imagen del molde inferior una vez pulido y recubierto tras la finalización de la construcción de las lámparas EL (d) y finalmente imagen de sendos molde una vez llenados de la silicona empleada (e) [Fuente: elaboración propia].



Figura 436: Imagen de la extracción del modelo hepático tras la destrucción del molde que lo contiene [Fuente: elaboración propia].

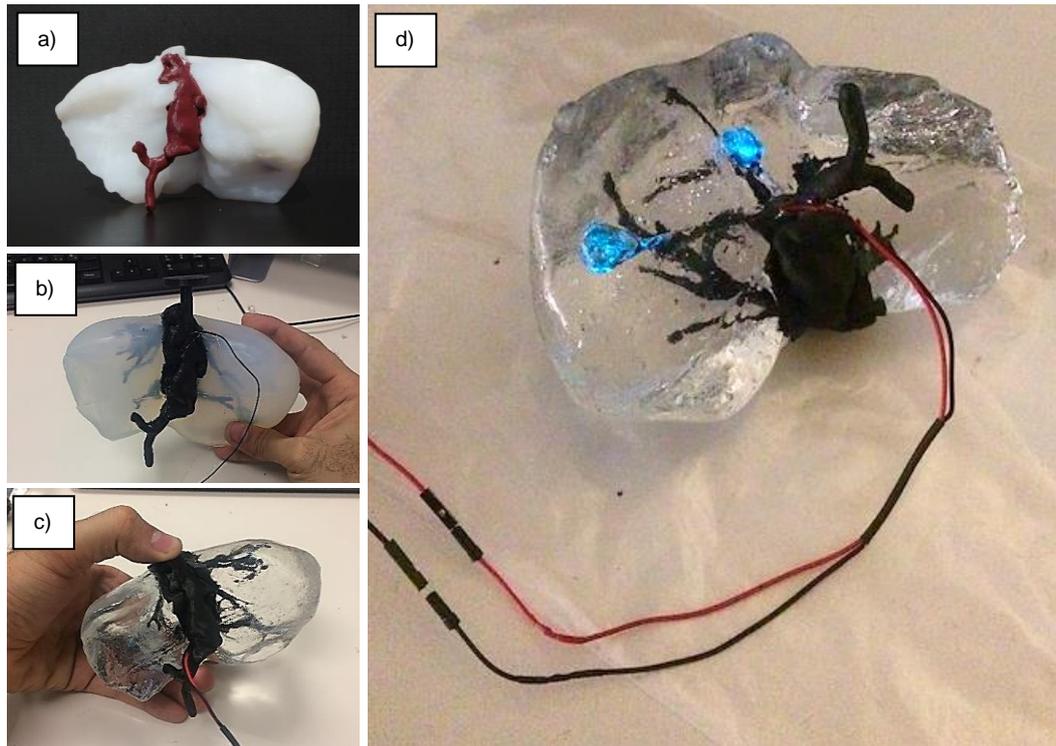


Figura 437: Imágenes de los distintos modelos hepáticos generados. Modelo inicial fundamentado en el empleo de siliconas blandas capaces de emular el tejido hepático (a), modelo capaz de ofrecer cierta transparencia (b) y modelo completamente transparente y translucido sin concesiones en la dureza requerida (c). Finalmente, tumores iluminándose en el interior del modelo anatómico hepático solicitado por el departamento de oncología del Hospital Clínic de Barcelona [Fuente: elaboración propia].

Como se puede intuir a través de las imágenes anteriores, la forma en la que el usuario interactúa con el objeto impreso (relación cirujano-modelo 3D) toma un carácter prioritario, dicha relación se ha establecido en los modelos anteriores a través del tacto y la vista (ver Figura 437). Pero la interacción basada en la iluminación selectiva de superficies, requiere el empleo de siliconas translúcidas cuando en realidad los tejidos no son transparentes (no podemos ver a través de la materia), por tanto, la fidelidad en este aspecto de la reproducción se ve limitada por el hecho de que interactuamos con el objeto a través del tacto y la vista únicamente.

Sin embargo, la capacidad conductiva de algunas de tintas empleadas ha permitido experimentar en la sensibilización de las superficies a voluntad proporcionándoles la habilidad de actuar como un sensor capacitivo y mediante el empleo de un microcontrolador dotarles de una nueva forma de interactuar con el usuario, es decir, siendo estas zonas sensibles capaces de responder ante un estímulo y en consecuencia permitir la habilitación de la iluminación o la habilitación de señal acústica procedente de una altavoz conectado al microcontrolador. De modo que, tras la introducción de un tercer sentido en la interacción

usuario-modelo 3D, el oído, la limitación impuesta por la transparencia de las siliconas queda resuelta (Ver Figura 439, en la patente [Reference number: 17-8844 and Submission number: 300264576 EP] se da detalle de dicha nueva aportación).

Por último, en la búsqueda de incrementar la relación usuario-modelo 3D nuevas pruebas y experimentos se están llevando a cabo mediante la vinculación de los elementos impresos con la realidad aumentada, sin embargo, a día de hoy dicha interacción se limitan únicamente a la visualización geométrica, más la interacción con objetos impresos y funcionalizados es un campo por desarrollar.

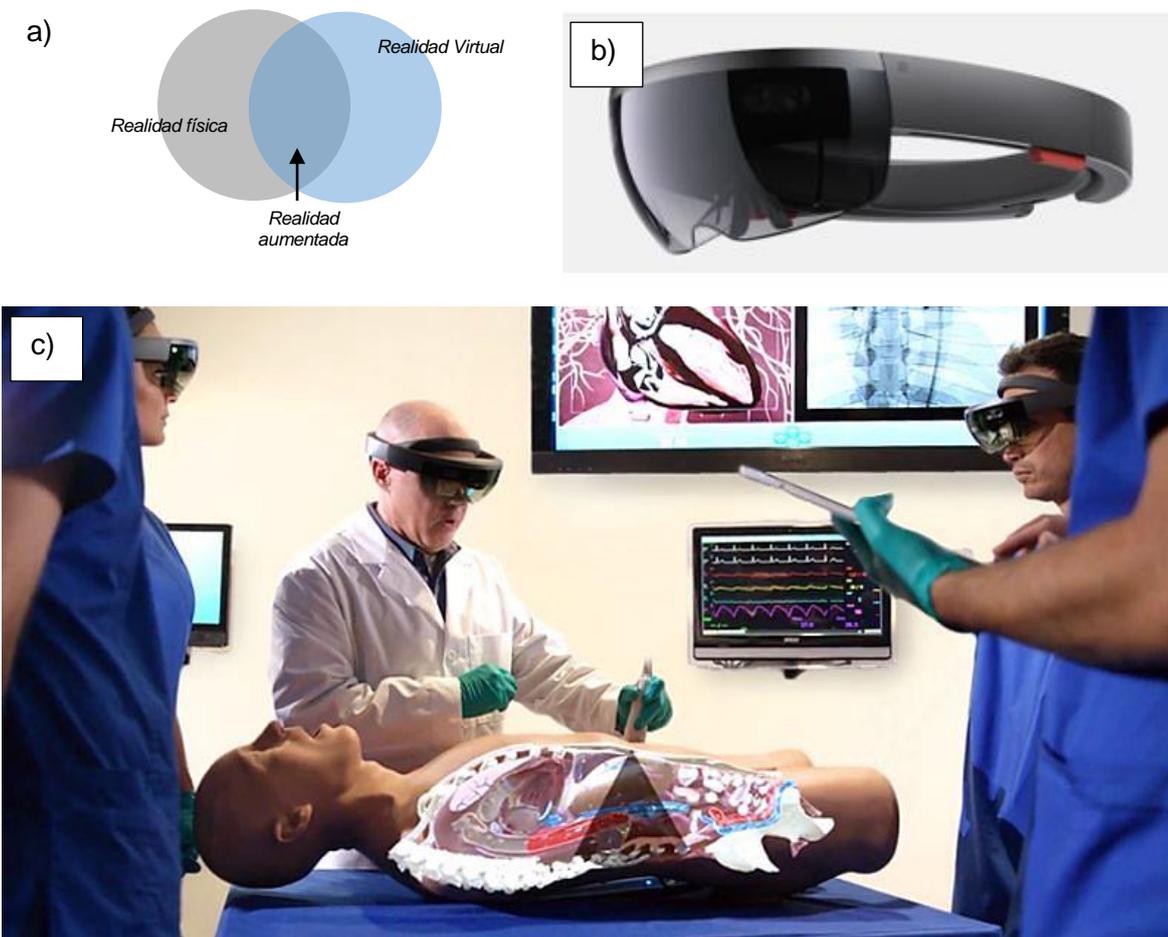


Figura 438: Representación esquemática de la realidad mixta: unión entre la realidad física y la realidad virtual (a), Gafas inteligentes HoloLens de la empresa Microsoft (b) y ejemplo de la implementación de la realidad mixta en el ámbito médico, en donde se realiza un ensayo sobre un modelo anatómico (c) [35].

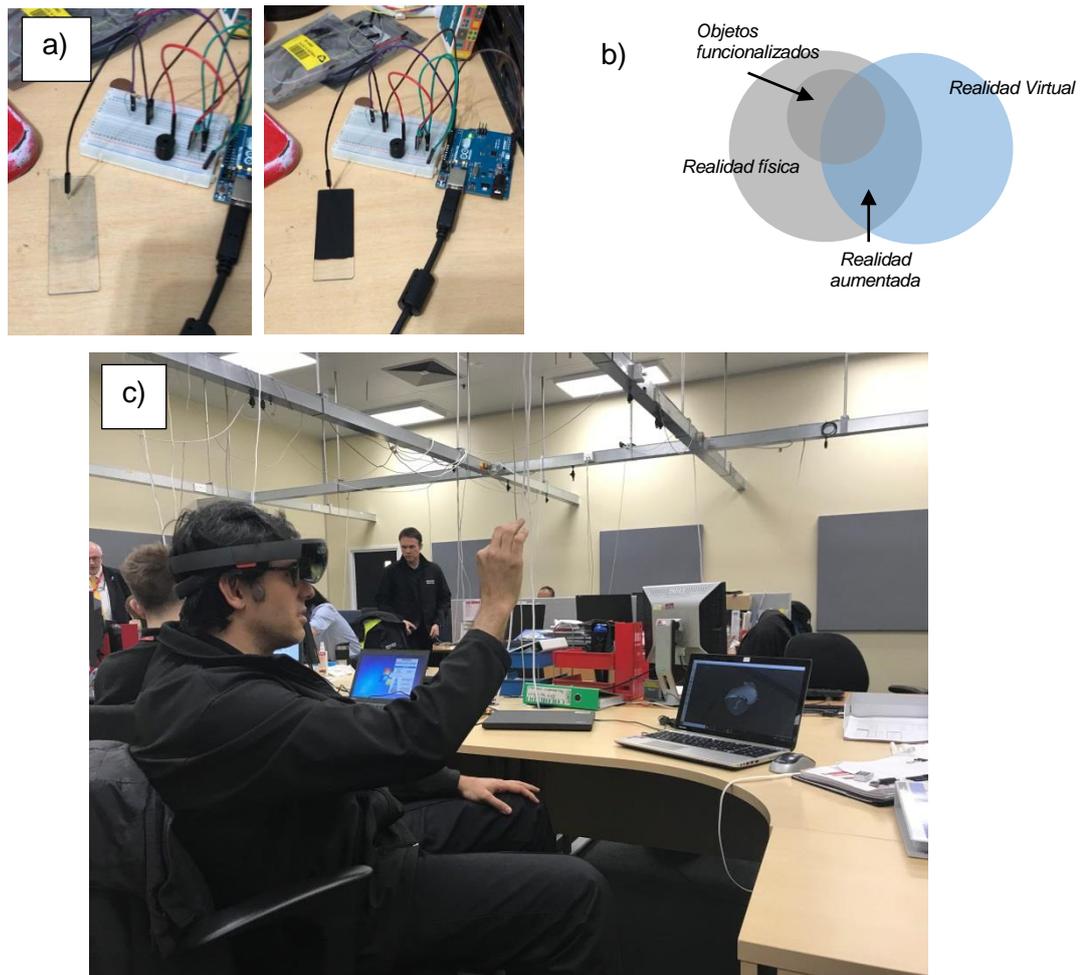


Figura 439: Porta muestras recubierto con tintas conductoras cuya superficie ha sido funcionalizada como un sensor capacitivo (a). Representación esquemática de la unión entre la realidad física y la realidad virtual en un mundo con objetos funcionalizados (b) y finalmente imagen del empleo de las gafas HoloLens en la visualización de la geometría de los modelos anatómicos anteriores (Hígados) reproducido a través del empleo de las tecnologías de la fabricación aditiva (c) [Fuente: elaboración propia].

4.3. CONCLUSIONES Y FUTURAS INVESTIGACIONES

En el presente trabajo de investigación se aglutinan un cúmulo de experiencias y conocimientos obtenidos gracias a la lectura y el análisis múltiples fuentes; documentos, páginas webs, revistas, libros y artículos científicos, entre otros. A título personal, lejos de haber culminado, ha supuesto una gran aventura que ha requerido mucho tiempo, dedicación y esfuerzo. Es por ello que como autor me permito el atrevimiento de expresar cierta satisfacción y orgullo del trabajo realizado y que en definitiva ha permitido el desarrollo de la presente tesis doctoral.

Por otra parte, dada la amplitud y complejidad de la materia, así como su marcado carácter multidisciplinar, es posible que el lector haya encontrado ciertas carencias y por ello se le pide disculpas. Algunos de los temas, argumentos y/o campos que en la presente tesis se abordan puede que considere que deban haber sido analizados en mayor profundidad, pero al contrario de ser visto como un defecto, humildemente el autor ruega que sea visto como una de sus virtudes que, apelando a la curiosidad de terceros y al plantear retos y cuestiones inconclusas a especialistas e investigadores capaces de, al profundizar en sus respectivas áreas de conocimiento, permita que éstos puedan hacer nuevas aportaciones y de este modo, en definitiva, contribuir en el desarrollo de las tecnologías aquí planteadas que tanto potencial tienen para el beneficio del bien común.

4.3.1. Resumen final y conclusiones

Como ya se ha comentado en capítulos y apartados anteriores, la presente tesis doctoral surge gracias al proyecto Nhibrid32D y de las problemáticas a las se tuvo que hacer frente. A través de este proyecto de investigación del programa Retos Colaboración del Ministerio de Economía y Competitividad, se buscó mediante la combinación de múltiples técnicas aditivas en un único equipo híbrido, la reproducción de elementos tridimensionales cerámicos dotados de circuitería embebida. En concreto desarrollar una tecnología capaz de imprimir sensores y componentes electrónicos cerámicos destinados al mundo automotor.

La combinación de forma innovadora de las dos tecnologías a día de hoy, con uno de los ratios más favorables en cuanto a: resolución, velocidad, sencillez y fiabilidad versus coste, requirió de un profundo análisis del estado del arte el cual se ve resumido en el capítulo 1 y con el cual, junto con algunos de los demás capítulos, se ha considerado como alcanzado el primero de los objetivos específicos inicialmente establecidos.

Por otra parte, y pese a que esta tesis surge del desarrollo de equipo de impresión tridimensional híbrido en donde se integran dos sistemas. Dentro de ésta ha habido un claro protagonismo hacia los sistemas Inkjet centrándose en éstos. De hecho, el equipo

Nhibrid32D ha servido como banco de ensayo para el estudio y análisis de toda la fenomenología asociada a la reproducción de líneas, patrones y en consecuencia imágenes sobre un sustrato a partir de la deposición controlada de gotas.

La adecuación de un sistema Inkjet DOD por piezoeléctricos y en concreto de tipo Bend a las particularidades y características de dicho equipo, ha permitido desarrollar un sistema de control de los mismos capaces de reproducir archivos digitales para, dentro del marco de la impresión funcional y en concreto dentro del printing electronics, ser capaz de reproducir pistas eléctricamente conductoras sobre y dentro de un elemento impreso tridimensionalmente.

El segundo de los objetivos específicos planteados a principios del capítulo primero ha sido abordado en profundidad a lo largo del segundo capítulo, en donde se analiza y modeliza la respuesta hidrodinámica de los cartuchos empleados en función de la forma, duración e intensidad de las señales eléctricas de excitación aplicadas a los actuadores piezoeléctricos de éste. En este aspecto, la modelización de los mismos se ha abordado de forma gradual mediante 3 enfoques distintos.

En una primera modelización se ha recurrido a un modelo mono-dimensional mono-cámara mono-nozzle fundamentado en la hidráulica y en la acústica, el cual posteriormente se extendió a un modelo multi-nozzle (en nuestro caso de 16 nozzles, extrapolable a n nozzles) y el cual a su vez fue reinterpretado mediante la analogía fuerza=voltaje y volumen=carga como un circuito eléctrico que, gracias a la aplicación de las leyes de Kirchhoff dicho sistema dinámico pudo verse simplificado en gran medida. Posteriormente, en un segundo enfoque también mecánico (con su equivalente interpretación eléctrica) se plantea ambas interpretaciones del cartucho, es decir, como un sistema mono-cámara mono-nozzle y multi-nozzle, mediante una nueva modelización en donde ahora se acopla a la hidráulica y a la acústica, la mecánica mediante la resistencia de los materiales, y por tanto, se analiza el mismo como un sistema dinámico mecánico-hidráulico-acústico, en el cual debido a una presión externa variable en el tiempo, se deforma una membrana flexible, analizada por elementos finitos como una viga biempotrada y cuya deformación condicionada a la presión interna del sistema hidráulico, es la causante del incremento del volumen de cada cámara de bombeo y ésta la causante a su vez, del desplazamiento del fluido (tinta). Finalmente, en una tercera modelización se introduce a través de los actuadores piezoeléctricos ubicados encima de dichas membranas flexibles a la electricidad en la modelización. Siendo ahora el sistema ya sea mono-nozzle o multi-nozzle bajo este último enfoque, uno eléctrico-mecánico-hidráulico-acústico, el cual como sistema pierde masa a consecuencia de una excitación eléctrica. Cabe destacar, que la temperatura también juega un papel importante en el comportamiento de estos sistemas, sin embargo, éste factor ha sido considerado como estático y cuyos efectos se ven reflejados únicamente en las características reológicas de las tintas.

Por otra parte, tras el control en la eyección de las gotas de tintas funcionales y de distintas características reológicas como primera etapa del proceso de reproducción (impresión), permitió el alojamiento de estos cartuchos sobre una estructura móvil motorizada y tras esto, la coordinación de ambos. Con ello, se ha desarrollado un sistema de control que permite tras tener en cuenta la trayectoria parabólica que describen las gotas eyectadas hasta impactar en el sustrato, depositar éstas de forma controlada y a voluntad sobre una posición concreta del área de impresión. Posteriormente, mediante la superposición de éstos volúmenes discretos de tinta en este caso funcionales, en unas condiciones particulares, y atendiendo a la fenomenología asociada en la deposición de las gotas y a la termodinámica de las superficies, permitió la reproducción de los cordones, líneas y patrones estables en fase líquida sobre un sustrato que eventualmente y tras la formación del depósito (cambio de fase o curado de la tinta) constituirán las, imágenes y/o circuitos conductores pero no antes de haber sido reproducidos múltiples veces generando múltiples capas.

En cuanto al tercero de los objetivos específicos propuestos, a través del presente capítulo se ha podido apreciar que múltiples pruebas se han llevado a cabo, así como la concepción, diseño y reproducción de algunos objetos y múltiples demostradores capaces de evidenciar la validez del equipo de impresión híbrido multi-material desarrollado pese a requerir aun de mucha evolución. Por otra parte, también se ha ahondado en la posibilidad de dotar y/o proporcionar a los elementos reproducidos mediante técnicas aditivas y junto con otras más tradicionales, de nuevas funcionalidades con las cuales establecer una relación con el usuario más allá de su superficie y con ello nos referimos no solo a su color, rigidez, rugosidad y/o forma, quizás una de las contribuciones más importantes del presente trabajo.

En este aspecto, la introducción de materiales funcionales en la impresión 3D, abre un nuevo campo de posibles aplicaciones, donde el aumento del valor añadido de los elementos reproducidos aditivamente puede justificar su elevado coste de fabricación. En la presente tesis se presenta a la tecnología Inkjet como una herramienta, con la cual es posible depositar un algo, en alguna parte dentro del dominio xyz del aparato reproductor, de forma rápida, fiable, eficiente y a voluntad, y de esta forma reproducir físicamente dentro de las capacidades del mismo con más o menos fidelidad, un archivo digital. Planteado la posibilidad de utilizar un medio líquido para el transporte y deposición, en combinación y graduación de ese algo, el cual desde un punto de vista más amplio, es en el momento en el que se requiere combinar múltiples materiales en el que surge la pregunta ¿Por qué, cual es el motivo?, es decir, cual es el propósito, la función de que ésta substancia o material exista en ese elemento a reproducir definido por dicho archivo digital.

Por otra parte, los materiales han sido expuestos y evidenciados nuevamente a través de las pruebas realizadas como una de las mayores limitaciones en la fabricación aditiva, siendo éstos los causantes por la cuales las tecnologías de fabricación aditivas se vean en la actualidad relegadas principalmente al prototipado rápido y más recientemente en la

industria adoptando un papel de complemento, a las técnicas de fabricación convencionales hoy por hoy insustituibles.

Por otra lado, haciendo uso de las ilimitaciones geométricas que ofrecen las tecnologías de fabricación aditiva y nuevamente recurriendo a los materiales funcionales tomados del printing electronics, el desarrollo de un proceso simple de manufactura basado en la impresión 3D para la reproducción de modelos anatómicos complejos y personalizados en alta fidelidad para el sector médico y en concreto dentro de la oncología, ha sido desarrollado durante el presente trabajo de investigación bajo algunos de los conceptos que en él se han expuesto, ofreciendo piezas a un coste sumamente competitivo.

No obstante, la posibilidad de emular tejidos blandos junto con la capacidad de sensibilizar y resaltar los tumores, venas, arterias y/u otras zonas por separado mediante el empleo de tintas EL, así como la posibilidad de funcionalizar éstas dotándoles de la capacidad de ante un estímulo externo de accionar una señal acústica o de establecer una conexión con el mundo electrónico-digital, ofrece una nueva herramienta para los médicos y cirujanos, suponiendo a saber un logro sin precedentes. En donde, gracias a la existencia dicho modelo físico funcionalizado; es posible cuestionarse las estrategias de cualquier intervención previamente, en busca de un mejor enfoque que minimice los riesgos y las potenciales complicaciones posteriores, así como mediante su manipulación, practicar las incisiones correspondientes afín de, por ejemplo, extraer la mayor cantidad de masa tumoral sin afectar otras zonas sensibles. En definitiva, pudiendo ser determinante en el desarrollo de una intervención y quizás llegando a salvar vidas.

Finalmente, en cuanto al cuarto y último de los objetivos específicos, en los distintos capítulos de la presente tesis el lector se habrá dado cuenta que continuamente se hace referencia a la versatilidad de los sistemas de impresión tridimensionales, las posibilidades que ofrece y algunas de sus limitaciones y concreto referido a los sistemas multi-materiales, centrándonos en los sistemas fundamentados en la deposición de materiales en fase líquida en forma de gotas. En el primer capítulo enfocado al estado del arte, se abordan algunas de las aplicaciones actuales de los sistemas de fabricación aditivos, así como otras en donde universidades y centros de investigación trazan nuevos rumbos donde éstas puedan ser útiles. Los sectores: aeronáutico, aeroespacial, biomédico, farmacéutico, energético y electrónicos son como se ha podido apreciar algunos de estos campos.

Por otra parte, como se puede apreciar a finales del capítulo 3 en donde se abordan las particularidades del equipo Nhibrid32D. Considerando a éste como un primer pasó en el desarrollo de futuros sistemas de reproducción digital, híbridos y capaces de combinar múltiples materiales, se esbozan posibles sistemas donde mediante la integración de múltiples tecnologías y sistemas de dispensación y deposición, como pueden ser Inkjet, DIW o FDM en combinación con un carrusel de cubas podrían aportar versatilidad a estos sistemas, aumentando su ya de por si notable pluralidad en cuanto a aplicaciones.

Por último y siguiendo con el cuarto de los objetivos específicos planteados, a finales del segundo capítulo recurriendo a los fundamentos empleados en el desarrollo y control del sistema Inkjet empleado para el equipo Nhibrid32D, en un ejercicio creativo y fundamentados en las tecnologías MJP y Polyjet se extrapolan dichos principios en un intento de abordar las problemáticas que en la actualidad se presentan en la reproducción de lo que previamente se nos ha sido definido, recurriendo a nuestras habilidades y nuestra capacidad perceptiva.

En este aspecto, se ha desarrollado un modelo matemático (el cual aún requiere de refinamiento) con el cual se plantea haciendo uso de la tecnología Inkjet accionada por piezoeléctricos y en concreto del tipo Bend, mediante la deposición discreta de gotas, de una posible simulación completa de la reproducción de un archivo digital multi-atributo mediante la suma de escenarios posibles. Es decir, se plantea la posibilidad de ante una geometría cualquiera multiatributo definida digitalmente, no solo reproducirla (basándonos en la discretización de dicha geometría en un conjunto de imágenes secuenciadas, bidimensionales, rasterizadas y de espesor constante en cuya solapación de píxeles darían origen a vóxeles multiatributo, es decir, constituidos a partir de número finito de variables (materiales) que en graduación y combinación, en función de la profundidad de color/material que disponga el equipo pudieran ofrecer propiedades casi a la carta) sino simular su reproducción con antelación y con ello, mediante: el análisis dimensional de los cabezales (geometría), los materiales constructivos de los mismos, los materiales a eyectar (reología de las tintas) y los parámetros de impresión (resolución, niveles de gotas, velocidades de eyección, drops spacing, frecuencia de eyección, temperatura, waveforms, etc.) conocer con antelación cuanta energía se consumirá, cuanto tiempo tardará y cuanto material se requerirá, permitiéndonos especular sobre la validez de la reproducción en sí, antes de accionar dicho equipo.

Así pues, en este aspecto y a modo de conclusión como ya se ha comentado podemos decir que: el paso previo o que antecede a toda reproducción es la definición, que viene a su vez precedido por el conocimiento. En este sentido puesto que el humano interpreta el entorno a través de sus sentidos y tras un cúmulo de experiencias compartidas y registradas, éste ha adquirido un conocimiento que a través de los años le ha llevado a definir con más o menor acierto lo que percibe y con ello tras una secuencia de acontecimientos e hitos le han permitido predecir el comportamiento del entorno y usarlo a su favor. En la actualidad con herramientas maximizadoras de dichos sentidos iniciales (un microscopio o un telescopio, por ejemplo, supone la extensión de nuestros ojos permitiendo magnificar nuestro sentido de la vista) dicha percepción se ha visto exponencialmente aumentada y con el desarrollo de las TIC's, el registro y la transmisión de dichas percepciones se han visto expandidas como nunca antes. De forma que, en consecuencia, el desarrollo tecnológico nos ha permitido que la definición de nuestro entorno sea más próxima a la realidad de lo que fue con nuestros antecesores y por ende será menor que la

que podrá alcanzar nuestros sucesores. Es decir, que en el campo que nos ocupa, nos encontramos inmersos ante una secuencia de hechos que ha condicionado el estado actual de la técnica y que, a modo de corolario recurrimos a los siguientes razonamientos para tratar de explicar el lugar en el que nos encontramos:

Primero: Para poder reproducir algo, es necesario primero definir lo que se quiere reproducir (modelos, software).

Segundo: Una vez se ha definido lo que se quiere reproducir, es necesario contar con los recursos para poder llevarlo a cabo (energía, materiales).

Tercero: Una vez definido el qué (al estado que la tecnología de nuestro tiempo permita, software) y el con qué (recursos disponibles), es necesario ahora abordar el cómo (los medios), en éste aspecto nos referimos al andamiaje técnico existente limitado por el estado de la técnica actual.

De modo que, en respuesta a la pregunta planteada a principios en de la tesis ¿Qué somos capaces de imprimir? Una respuesta podría llegar a ser; a día de hoy, aquello que seamos capaces de definir en un modelo digital y en consecuencia previamente percibir a través de nuestros sentidos (magnificados o no), en función de los recursos que el estado actual de la tecnología sea capaz de proveer, y limitados por los medios que el estado actual de la técnica ofrezca.

De manera que, se pone en evidencia que el estado actual de la técnica se encuentra harto lejos de poder reproducir todos los matices y graduaciones que a través de nuestros sentidos somos capaces de percibir. Pero si hipotéticamente llegáramos a poder depositar aquello que se necesita de forma rápida y precisa en un dominio espacial, se evidenciaría que las limitaciones no solo se ven impuestas por la técnica existente, si no por nuestra capacidad de definir lo que se necesita afín de reproducir lo que se desea. Y si finalmente, en éste ejercicio racional, partiéramos del supuesto de que somos capaces de depositar lo que se requiere allí donde se necesita porque los recursos con los que contamos nos lo permiten, se evidenciaría la necesidad de contar con los medios necesarios y con ello nos referimos a materiales manipulables y combinables.

La fabricación aditiva se erige con un futuro muy prometedor y con el potencial cambiar al mundo en la medida que éste evolucione, pero estas tecnologías plantean muchos retos y como pocas, la necesidad de integración con éxito de una enorme multitud de disciplinas.

Por otro lado, y desde un punto de vista más amplio podría decirse que la fabricación aditiva puede ser la respuesta a una generación cuya sociedad prescinde de él como elemento inserto en la cadena productiva y en el que ante un inminente desempleo en masa fundamentado por el machine learning, el Big data, la inteligencia artificial y la robótica, grita: *“Dennos algo que hacer, no importa el que. Dennos, la capacidad de soñar, equivocarnos y volver a empezar”*.

Aquellos dotados de una habilidad especial crearán nuevas aplicaciones, nuevos productos, generando nuevos modelos de negocio, formando parte y satisfaciendo nuevos nichos de mercado, mientras que otros menos dotados dispondrán de una nueva herramienta con las cuales dar rienda suelta a sus ideas. En este sentido estas nuevas e incipientes herramientas prometen dotar al humano de una capacidad sin precedentes de transformar su entorno y con ello a la sociedad, esperemos que a una mejor.

4.3.2. Futuras investigaciones.

En el presente, y desde un punto de vista corto plazista; las aplicaciones poco convencionales de los sistemas de fabricación digital centrados en la deposición y consolidación a voluntad, de distintos materiales en combinación y graduación, plantea muchísimas interrogantes sin respuesta ofreciendo un enorme campo para el desarrollo, tanto en las etapas de definición como de reproducción, pasando por el estado de la técnica (medios disponibles), así como también por los materiales y su manipulación (recursos). Finalmente, se ha de traer a colación, que tras la introducción de estas tecnologías en la sociedad se espera que surjan nuevas oportunidades, nichos de mercado y modelos de negocio en donde, por ejemplo, explotar la individualidad de los seres humanos, es decir, la personalización.

La introducción de materiales funcionales por otra parte, limitándonos únicamente al printing electronics (electrónica impresa), plantea un incremento directo en la interacción hombre-objeto impreso y en última instancia la vinculación de éstos con el mundo digital. En este aspecto la dotación de nuevas propiedades comunicativas a los elementos impresos, junto con el desarrollo de las TIC's, plantea nuevos escenarios. Un ejemplo de ellos es la aparición de objetos sensibles dentro de una realidad aumentada o mixta.

Por otra parte, dentro de un horizonte temporal más amplio, el cúmulo de experiencias y aportaciones, registradas y compartidas de investigadores, científicos y especialistas en sus correspondientes campos o área de expertise, permitirá la maduración y el desarrollo de esta técnicas y tecnologías de fabricación aditiva, nutriendo los llamados building blocks (del inglés: bloques de construcción) concepto introducido por Intel en el 2005 como un conjunto de estándares para componentes del ordenador portátil, adoptado por los fabricantes.

Así pues, mediante el desarrollo en paralelo de los Common Building Block (CBB) cabe esperar que la evolución de la fabricación aditiva se vea en conjunto acelerada. Permitiendo gracias a su carácter integrador, acortar los hitos tecnológicos que estas tecnologías solicitan para establecerse como una realidad omnipresente en nuestras vidas acercando las bendiciones que a día de hoy se le atribuyen y podemos vislumbrar.

4.4. CONCLUSIONS AND FUTURE RESEARCH

In the present work of investigation, a cluster of experiences and knowledge obtained thanks to the reading and the analysis of multiple sources, such as documents, web pages, magazines, books and scientific articles, among others, are brought together. Personally, being far from having finished, it has been a great adventure that has involved a lot of time, dedication and effort. That is why, as an author, I allow myself to express some satisfaction and pride in the work that has been done and that ultimately has allowed the development of this doctoral thesis.

On the other hand, given the extent and complexity of the subject, as well as its marked multidisciplinary nature, it is possible that the reader has found certain shortcomings, and, for that reason, the author apologizes. Some of the topics, arguments and/or fields that are addressed in this thesis may be considered to have been analysed in greater depth. However, instead of being seen as a defect, the author humbly asks that it be seen as one of its virtues that, appealing to the curiosity of third parties and posing challenges and unfinished questions to specialists and researchers which are capable of deepening in their respective areas of knowledge, encouraging them to make new contributions and, in this way, ultimately contribute to the development of the technologies proposed here that have so much potential for the benefit of the common good.

4.4.1. Final summary and conclusions

As it was already mentioned in previous chapters and sections, the present doctoral thesis arises thanks to the Nhibrid32D project and some of the problems we had to face up. Through this research project of the Challenges Collaboration program of the Ministry of Economy and Competitiveness, it was sought through the combination of multiple additive techniques in a unique hybrid equipment; the reproduction of three-dimensional ceramic elements equipped with embedded circuitry. Specifically, to develop a technology capable of printing sensors and ceramic electronic components for the automotive world.

The innovative combination of these two technologies, which nowadays offers one of the most favourable ratios in terms of resolution, speed, simplicity and reliability versus cost, required a deep analysis of the state of the art which is summarized in Chapter 1 and with which, together and in combination with some of the other chapters, the first of the specific objectives that were initially established has been considered achieved.

On the other hand, and even though this thesis arises from the development of hybrid three-dimensional printing equipment where two systems are integrated, there has been a clear protagonist towards the Inkjet systems, focusing on them. In fact, the Nhibrid32D equipment has served as a test bench for the study and analysis of all the phenomenology associated

with the reproduction of lines, patterns, and consequently, images on a substrate from the deposition of controlled drops.

The adaptation of an Inkjet DOD system by piezoelectric, and in particular of Bend type, to the particularities and characteristics of said equipment, has allowed the development of a control system of them which is capable of reproducing digital files for the framework of functional printing and, particularly, within the printing electronics in order to be able to reproduce electrically conductive tracks on and within a three-dimensionally printed element.

The second specific objectives that was set out at the beginning of the first chapter has been addressed in depth throughout the second chapter, where the hydrodynamic response of the used cartridges is analysed and modelled according to the shape, duration and intensity of the electrical signals of excitation applied to its piezoelectric actuators. In this aspect, their modelling has gradually been addressed by 3 different approaches.

In a first modelling, a mono-dimensional single-chamber mono-nozzle model based on hydraulics and acoustics was used, which later was extended to a multi-nozzle model (in our case 16 nozzles, extrapolable to n nozzles) and which in turn was reinterpreted by means of the analogy force = voltage and volume = charge as an electric circuit that thanks to the application of Kirchhoff's laws said dynamic system could be greatly simplified. Subsequently, a second approach also limited to mechanics (with its equivalent electrical interpretation) raises both interpretations of the cartridge, that is to say, as a single-chamber mono-nozzle and multi-nozzle system, but now through a modelling where the hydraulics and the acoustics are coupled with the mechanics through the resistance of the materials. Therefore, it is analysed as a mechanic-hydraulic-acoustic dynamical system in which, due to a variable external pressure, a flexible membrane is deformed. The deformation of this membrane, which covers each one of the pumping chambers and conditioned to the internal pressure of the hydraulic system, is analysed by finite elements and, after having been considered as a beam clamped at both ends, it is now the cause of the increase in the volume of each chamber which in turn causing the displacement of fluid (ink). Finally, in a third approach, through the piezoelectric actuators located on top of these flexible membranes, electricity is introduced into the modelling. Under the last approach, the Inkjet system either mono-nozzle or multi-nozzle and as an electric-mechanic-hydraulic-acoustic dynamical system, which from a wider point of view, loses mass as a result of an electrical excitation. It should be noted that temperature also plays an important role in the behaviour of these systems. However, this factor has been considered as static and whose effects are reflected only in the rheological characteristics of the inks.

On the other hand, after the control in the ejection of the drops of functional inks and of the different rheological characteristics as the first stage of the reproduction process (printing), the housing of these cartridges was allowed on a motorized mobile structure and, after this, so was their coordination. With this, a control system has been developed that allows taking

into account the parabolic trajectory described by the ejected droplets until they hit the substrate, depositing them in a controlled manner and at will over a specific position of the printing area. Subsequently, by superimposing these discrete volumes of ink, in this case functional in particular conditions, and taking into account the phenomenology associated with the deposition of the drops and the thermodynamics of the surfaces, the reproduction of the dots, lines and stable patterns in liquid phase on a substrate was allowed which eventually and after the formation of the deposits (phase change or curing of the ink) will constitute the images and/or conductive circuits, but not before having been reproduced multiple times generating multiple layers.

Regarding the third specific objective proposed, through this chapter it has been possible to appreciate that multiple tests have been carried out, as well as the conception, design and reproduction of some objects and multiple demonstrators capable of proving the validity of the equipment of Hybrid multi-material printing which was developed (In spite of requiring a lot of evolution). On the other hand, the possibility of providing to the elements reproduced by additive techniques and in combination with more traditional ones has also been explored, with new functionalities trying to establish a new relationship with the user beyond its surface, that is, not only through its colour, rigidity, roughness and shape, maybe one of the most important contributions of the present work.

In this aspect, the introduction of functional materials in 3D printing opens a new field of possible applications where the increase in the added value of the additively reproduced elements can justify its high manufacturing cost. In the present thesis the Inkjet technology has exposed as a tool with which it is possible to deposit a "something", in "somewhere", within XYZ domain available of the reproducer device, in a fast, reliable, efficient and at will, and in this sense, reproduce physically within the capacity of the same, with more or less fidelity, a digital file. Offering the possibility of using a liquid medium to transport and deposit, in combination and graduation that something. From a broader point of view, is at the moment in which it is required to combine multiple materials in which the question arises: Why, what is the motive?, that is, what is the purpose, the function, for that substance or material to exists in that element to be reproduced defined by said digital file.

On the other hand, the materials have been exposed again and evidenced through the tests which are carried out as one of the biggest limitations in additive manufacturing, being these the causes by which additive manufacturing technologies are currently mainly relegated to rapid prototyping and, more recently in the industry, adopting a complementary role for conventional manufacturing techniques that are now irreplaceable.

On the other hand, by making use of the geometric flexibility offered by the technologies of additive manufacturing and again resorting to the functional materials taken from printing electronics, a manufacturing process based on 3D printing has been developed during the present research work under some of the concepts raised in it, offering the possibility to build

complex and personalized anatomical models in high fidelity for the medical sector and specifically within oncology at a very competitive cost.

However, the possibility of emulating soft tissues together with the ability to sensitize and highlight tumours, veins, arteries and/or other areas of interest separately through the use of EL inks, as well as the possibility of functionalizing these surfaces by offering the possibility of providing them with the ability of, in front of an external stimulus, triggering an acoustic signal or establishing a connection with the digital world. That offers a new tool for doctors and surgeons, entailing as far as we know an unprecedented achievement. Where, thanks to the existence of said functionalized physical model, it is possible to previously question the strategies of any intervention, in search of a better approach that minimizes the risks and the potential subsequent complications. As well as, by means of its manipulation, training surgeons for specific cases and performing the corresponding incisions, for example, to extract the greatest amount of tumour mass without affecting other sensitive areas. In short, being able to be decisive in the development of an intervention and, perhaps, even saving lives.

Finally, regarding the fourth and last specific objective, in the different chapters of this thesis, the reader will have noticed that there is a continuous reference to the versatility of three-dimensional printing systems, the possibilities it offers and some of its limitations, particularly referred to multi-material systems, focusing on systems based on the deposition of materials in liquid phase in the form of drops. In the first chapter which was focused on the state of the art, some of the current applications of additive manufacturing systems are addressed, as well as others where universities and research centres trace new directions where they can be useful. The sectors: aeronautics, aerospace, biomedical, pharmaceutical, energy and electronics are some of these fields.

On the other hand, as it could be seen at the end of chapter 3, where the peculiarities of the Nhibrid32D equipment is addressed and considering this as a first step in the development of future digital reproduction systems, hybrids and capable of combining multiple materials, other possible systems are outlined where through the integration of multiple technologies and systems of dispensing and deposition, such as Inkjet, DIW or FDM in combination with a carousel of tanks versatility could be provide to these systems, increasing their already remarkable plurality in terms of applications.

Finally, and continuing with the fourth specific objective, at the end of the second chapter, by resorting to the fundamentals used in the development and control of the Inkjet system used for the Nhibrid32D equipment, in a creative exercise and based on the MJP and Polyjet technologies, these principles are extrapolated in an attempt to address the problems that currently arise from the reproduction of what has previously been defined to us, drawing on our abilities and our perceptive capacity.

In this regard, a mathematical model has been developed (which still requires refinement) with which it is proposed using Inkjet technology driven by piezoelectric and in particular of the Bend type, by means of the discrete deposition of droplets, of a possible complete simulation of the reproduction of a multi-attribute digital file by the adding of possible scenarios. That is to say, it is posed the possibility of having or defined a multi-attribute geometry not only reproducing it (based on the discretization of said geometry in a set of sequenced two-dimensional rasterized images of a constant thickness, in which by the overlapping of the pixels would give rise to multi-attribute voxels. That is, constituted by a finite number of variables (materials) than in graduation and combination, depending on the depth of colour/material available in the equipment, could offer properties almost on demand), but also the possibility to simulate its reproduction in advance, and with it by: the dimensional analysis of the heads (geometry), the construction materials, the materials to be ejected (rheology of the inks) and the printing parameters (resolution, drop levels, ejection speeds, drops spacing, ejection frequency, temperature, waveforms, etc.) know in advance how much energy will be consumed, how long it will take and how much material will be required, allowing us to speculate on the validity of the reproduction itself, before turning on said hypothetical reproduction equipment.

Therefore, in this aspect and as a conclusion that was already mentioned, we can say that: the previous step or that precedes any reproduction is the definition, which comes in turn preceded by knowledge. In this sense, since human beings interpret the environment through their senses and after a wealth of shared and recorded experiences, they have acquired a knowledge that has led them to define more or less correctly what they perceive over the years, and with it, after a sequence of events and milestones, it has allowed them to predict the behaviour of the environment and use it in their favour. Nowadays, with tools that maximize these senses (a microscope or a telescope, for example, supposes the extension of our eyes allowing to magnify our sense of sight), such perception has been exponentially increased, and with the development of ICTs, the registration and the transmission of such experiences have been expanded as never before. So, as a result, technological development has allowed us to define our environment in a way closer to reality than our predecessors and, therefore, it will be less than what our successors will achieve. That is to say, that in the field that concerns us, we are immersed in a sequence of events that have conditioned the current state of the technique and that, as a corollary, we resort to the following reasoning to try to explain the place where we find:

First: To be able to reproduce something, it is necessary to first define what you want to reproduce (models, software).

Second: Once you have defined what you want to reproduce, you need to have the resources to carry it out (energy, materials).

Third: Once you have defined the “what” (to the state that the technology of our time allows us, software) and the “with what” (available resources), it is now necessary to address the “how” (the means). In this aspect, we refer to the existing technical scaffolding limited by the current state of the art.

Thus, in response to the main question posed earlier in the thesis: what are we capable of printing? An answer today could be: what we are able to define in a digital model and consequently previously perceive through our senses (magnified or not), depending on the resources that the current state of technology is able to provide, which are limited by the means that the current state of the technique can offer.

So the current state of the art is far from being able to reproduce all the nuances and graduations that through our senses we are able to perceive. But, hypothetically, if we could deposit what is needed, quickly and accurately in a spatial domain, it would be made evident that those limitations are not only imposed by the existing technique, but by our ability to define what is needed to reproduce what is desired. Finally, if in this rational exercise, we started from the assumption that we are able to deposit what is required where it is needed because the resources we have allow us to do so, the need to have the necessary means would be proved, and with it we are referring to operable materials.

Additive manufacturing stands with a very promising future and with the potential to change the world as it evolves, but these technologies pose many challenges and, like few others, the need for the successful integration of an enormous multitude of disciplines.

On the other hand, and from a broader point of view it could be said that additive manufacturing can be the answer to a generation whose society dispenses with it as an element inserted in the productive chain and in which, faced with an imminent mass unemployment based on machine learning, Big data, artificial intelligence and robotics, shouts: *"Give us something to do, no matter what. Give us the ability to dream, make mistakes and start over"*.

Those endowed with a special ability will create new applications, new products, generating new business models, being part of and satisfying new niche markets, while others less gifted will have a new tool to give free rein to their ideas. In this sense, these new and incipient tools promise to endow human beings with an unprecedented capacity to transform their environment and with it, the society, hopefully making it a better one.

4.4.2. Future research

In the present, and from a short-term point of view, the unconventional applications of digital manufacturing systems which are focused on the deposition and consolidation at will of different materials in combination and graduation raises many unanswered questions, offering a huge field for development, both in the definition and reproduction stages, going

through the state of the art (available means), as well as the materials and their manipulation (resources). Finally, it should be mentioned that, after the introduction of these technologies into society, new opportunities, market niches and business models are expected, in which, for example, the individuality of human beings can be exploited, that is to say, the customization.

The introduction of functional materials on the other hand, centred only on the printing electronics poses a direct increase in the interaction man-printed object, and ultimately, in the link of these with the digital world. In this aspect, the supply of new communicative properties to printed elements, together with the development of ICTs, poses new scenarios. An example of them is the appearance of sensitive objects within an augmented or mixed reality.

On the other hand, within a broader time horizon, the accumulation of experiences and contributions registered and shared by researchers, scientists and specialists in their corresponding fields or area of expertise will allow the maturation and development of these manufacturing techniques and additive technologies, nourishing the so-called building blocks; concept introduced by Intel in 2005 as a set of standards for laptop components, adopted by manufacturers.

Thus, through the parallel development of Common Building Blocks (CBB), it is expected that the evolution of additive manufacturing will be drastically accelerated. Allowing, thanks to its integrating nature, shortening of the technological milestones that these technologies request to establish themselves as an omnipresent reality in our lives, bringing the blessings that nowadays are attributed to it and we can glimpse.

4.5. PUBLICACIONES EN EL AMBITO DE ESTUDIO

4.5.1. Artículos publicados.

J. Bonada, A. Muguruza, X. Fernandez-Francos, X. Ramis, "Optimization procedure for additive manufacturing processes based on mask image projection to improve Z accuracy and resolution", *Journal of manufacturing process*, vol. 31, pp. 689-702, 2018.

Asier Muguruza, J. Bonada Bo, A. Gómez, J. Minguella-Canela, J. Fernandes, F. Ramos, E. Xuriguera, A. Varea, A. Cirera, "Development of a multi-material additive manufacturing process for electronic devices", *Procedia Manufacturing*, vol.13, pp. 746-753, 2017.

J. Minguella-Canela, A. Muguruza, D.R. Lumbierres, F.-Javier Heredia, R. Gimeno, P. Guo, M. Hamilton, K. Shastri, S. Webb, "Comparison of Production Strategies and degree of Postponement when incorporating Additive Manufacturing to Product Supply Chains", *Procedia Manufacturing*, vol.13, pp. 754-761, 2017.

J. Bonada Bo, Asier Muguruza, X. Fernández –Francos, X. Ramis, "Influence of exposure time on mechanical properties and photocuring conversion ratios for photosensitive material used in Additive Manufacturing" *Procedia Manufacturing*, vol.13, pp. 762-769, 2017.

A. Muguruza Blanco, J. Minguella-Canela "Digital Manufacturing: What Are We Able to Print?" *Journal of Mechanics Engineering and Automation*, Vol. 7, Num. 6, June 2017.

A. Muguruza, Lucas Krauel, Felip Fenollosa "Development of a patients-specific 3D-printed preoperative planning and training tool, with functionalized internal surfaces, for complex oncologic cases" *Rapid Prototyping Journal* [DOI 10.1108/RPJ-03-2018-0063], June 2018.

4.5.2. Artículos en revisión.

F. Heredia, D. Ramon Lumbierres, J. Minguella and A. Muguruza, "Optimal Supply Chain Strategy through Stochastic Programming: application to Additive Manufacturing", *International Journal of Production Economics*, 2017.

A. Muguruza, J. Bonada Bo, J. Minguella-Canela, X. Escaler."Trajectory described by a droplet ejected by a bend type piezoelectric driven Inkjet cartridge, housed in a moving carriage".

4.5.3. Participaciones en congresos y ferias.

Optimal supply chain strategy and postponement degree with 3D printing.

Autores: Daniel Ramon Lumbierres, Asier Muguruza, Robert Gimeno, Feu, Ping Guo, Mary Hamilton, Kiron Shastry, Sunny Webb, Joaquim Minguella, F.-Javier Heredia

Tipo de actividad: Presentación en congreso proyecto Accenture.

Nombre de la edición: 28th EURO European Conference on Operational Research

Ubicación: Poznan, Polonia.

Fecha de publicación: 2016

Fecha de presentación: 2016-07-06

Libro de actas: 28th European Conference on Operational Research, Conference Handbook

Primera página: 330

Última página: 330

Resumen:

In this contribution we would like to present the results of a research project developed by Accenture and BarcelonaTech aiming at studying the advantages of ultra-postponement with 3D printing using the analytical tools of operational research. In this project a new two-stage stochastic programming decision model has been developed to assess (a) the convenience of the introduction of 3D printing in any generic supply chain and (b) the optimal degree of postponement, the so called Customer Order Decoupling Point (CODP), assuming uncertainty in demand for multiple markets. To this end we propose the formulation of a generic supply chain through an oriented graph that represents all the alternative technologies that can be deployed, defined through a set of operations for manufacturing, assembly and distribution, each one characterized by a lead time and cost parameters. Based on this graph we develop a mixed integer two-stage stochastic program that finds the optimal manufacturing technology to meet the demand of each market, the optimal production quantity for each operation and the optimal CODP for each technology. The results obtained with several case studies from real manufacturing companies are presented and analyzed.

Palabras clave: Supply Chain, 3d Printing, Stochastic Programming, Postponment, Modeling.

Grupo de investigación: GNOM - Grupo de Optimización Numérica y Modelización.

TECNOFAB - Grupo de Investigación en Tecnologías de Fabricación.

Development of a Multimaterial Additive Manufacturing Process for Electronic Devices.

Autores: Asier Muguruza, J. Bonada Bo, A. Gómez, J. Minguella-Canela, J. Fernandes, F. Ramos, E. Xuriguera, A.Varea, A. Cirera.

Tipo de actividad: Presentación en congreso de resultados Nhibrid32D

Nombre de la edición: 7th Manufacturing Engineering Society International Conference, MESIC 2017

Ubicación: Vigo, España.

Fecha de publicación: 2017

Fecha de presentación: 2017-06-28

Libro de actas: 7th Manufacturing Engineering Society International Conference Handbook

Primera página: 66

Última página: 66

Resumen:

In order to increase the versatility of additive manufacturing multimaterial processes, a hybrid system has been developed, which is capable of combining 3D printing technology by DLP (Digital Light Processing) with a two-dimensional Drop-on-Demand Inkjet printing system.

Through DLP technology based on digital micromirror devices (DMDs) it is possible to build up 3D geometries layer-by-layer using polymerization of photosensitive resins. Concurrently, while the construction process is performed, the Inkjet printing system is used to deposit tiny drops of conductive inks on the substrate generated, which will thus constitute an electric circuit embedded within the three dimensional structure.

On the other hand, photosensitive resins have been filled with Low Temperature Co-firing Ceramic (LTCC) particles, in order to modify the basis properties of the part by using sinterizable slurries. Finally the challenges in the sintering process for achieving functional parts are discussed and a few prototypes have been built in order to validate this technology.

Palabras clave: Additive Manufacturing, Multimaterial, Printing Electronics.

Comparison of Production Strategies and degree of Postponement when incorporating Additive Manufacturing to Product Supply Chains.

Autores: Joaquim Minguella , Asier Muguruza, Daniel Ramon Lumbierres , F.-Javier Heredia , Robert Gimeno, Feu, Ping Guo, Mary Hamilton, Kiron Shastry, Sunny Webb.

Tipo de actividad: Presentación en congreso de resultados proyecto Accenture.

Nombre de la edición: 7th Manufacturing Engineering Society International Conference, MESIC 2017

Ubicación: Vigo, España.

Fecha de publicación: 2017

Fecha de presentación: 2017-06-28

Libro de actas: 7th Manufacturing Engineering Society International Conference Handbook

Primera página: 67

Última página: 67

Resumen:

Additive Manufacturing is a very promising set of technologies able to deploy unit-to-unit mass customisation and to materialise product manufacturing just in the place where demand occurs.

Postponement is the application of the concept of delaying the supply chain processes as much as possible to the customer purchase, in order to incorporate the maximum features requested by the clients; whilst meeting the supply chain delivery times required.

The moment in time where the acquisition of the product by a customer happens is referred as the Customer Order Decoupling Point (CODP) and serves as a milestone from which the part design is considered as frozen.

Palabras clave: additive manufacturing; ultra-postponement; supply chain.

Influence of exposure time on mechanical properties and photocuring conversion ratios for photosensitive material used in Additive Manufacturing.

Autores: J. Bonada Bo, Asier Muguruza, X. Fernández –Francos, X. Ramis.

Tipo de actividad: Presentación en congreso de resultados Nhibrid32D

Nombre de la edición: 7th Manufacturing Engineering Society International Conference, MESIC 2017

Ubicación: Vigo, España.

Fecha de publicación: 2017

Fecha de presentación: 2017-06-29

Libro de actas: 7th Manufacturing Engineering Society International Conference Handbook

Primera página: 94

Última página: 94

Resumen:

Additive Manufacturing (AM) processes can buildup 3D parts adding material layer by layer. Therefore, it is possible to manufacture complex geometries without using specific tools or fixtures.

One of the main Additive Manufacturing processes uses a light-based technology and photosensitive materials. Consequently, each layer of 3D part is obtained through a photopolymerization reaction of the material after a controlled light emission. Light-based technologies can be mainly classified in stereolithography (SLA) and mask-imageprojection (MIP) or digital light processing (DLP) in function of the light projection system. SLA uses a UV laser and a scanning process to obtain each layer, whereas DLP uses Digital Micromirror Device (DMD) to project the whole layer geometry simultaneously.

Previous research has been done in order to analyse the material photopolymerisation [1] and its cure depth [2]. A right calibration of these parameters is a key factor to obtain a successful 3D printing process and to avoid a non-homogeneity photocuring conversion that could cause several non-desired consequences.

The main goal of this paper is to characterize the mechanical properties of photosensitive materials in function of their photocuring conversion ratio. This could allow a printing process optimization in function of the 3D part mechanical requirements and its mechanical behaviour for a non-uniform photocuring ratio printed part.

Palabras clave: additive manufacturing, material behavior, mechanical properties, photopolymerization.

Additive manufacturing of functionalized LTCC ceramic material for electronic devices.

Autores: J.Gonçalves, M.Blanes, A. Muguruza, J. Bonada, E.Xuriguera, A. Gómez, J. Minguella-Canela, F.Ramos, E. A. Cirera

Tipo de actividad: Presentación de poster de resultados Nhibrid32D

Nombre de la edición: 15th Conference & Exhibition of the European Ceramic Society, ECerS 2017.

Ubicación: Budapest, Hungría.

Fecha de publicación: 2017

Fecha de presentación: 2017-07-09

Resumen:

The hybridization of Digital Light Processing (DLP) and two-dimensional (2D) Drop on Demand Inkjet technologies is presented in this work. This novel combination allows the fabrication of an electric circuit embedded within a three dimensional (3D) ceramic structure, that holds the promise of exploring new materials and designing with new levels of functionality. In our approach the improvement and characterization of Low Temperature Co-firing Ceramic (LTCC) suspension was optimized considering the rheological behavior and its photopolymerization in the developed DLP machine. The hybrid printed parts were characterized regarding their electrical properties.

Palabras clave: additive manufacturing, material behavior, mechanical properties, photopolymerization.

Optimization of a LTCC photo-curable suspension for DLP-based 3D printing.

Autores: J. Gonçalves Fernandes, P. Barcelona, A. Muguruza, J. Bonada, F. Ramos, A. Cirera, E. Xuriguera.

Tipo de actividad: Presentación en congreso.

Nombre de la edición: Young Ceramists Additive Manufacturing Forum.

Ubicación: Padova, ITALY.

Fecha de publicación: 2018

Fecha de presentación: 2017-05-04

Resumen:

Low Temperature Co-fired Ceramic (LTCC) photopolymerizable suspension was optimized for top-down Digital Light Processing (DLP) machine. The LTCC suspension was adjusted considering the rheological and photopolymerization behavior in a visible light range. The effect of the solid load and particle size distribution on the cured depth and the amount of dispersant was taking into account to achieve the optimal photocurable suspension. The debinding and the sintering process was studied and characterized by X-Ray Image, dilatometry, SEM, XRD and DCS-TGA.

The DLP machine is under development and presented in this work, where the main objective is a hybridization of DLP and two-dimensional Drop on Demand Inkjet technologies. This novel combination would allow the fabrication of an electric circuit embedded within a three-dimensional ceramic structure, for example.

4.5.4. Patentes registradas.

A METHOD OF MANUFACTURING A THREE-DIMENSIONAL MODEL AND A THREE-DIMENSIONAL MODEL OBTAINED THEREBY

Submission number: 300264576

Date of receipt: 13 February 2018

3D PRINTING MACHINE AND METHOD

Submission number: 18382697.3

Date of receipt: 02 October 2018

4.6. LISTADO DE FIGURAS DEL VOLUMEN 2

Figura 301: Boceto inicial de la máquina de impresión híbrida (noviembre 2015) [Fuente: Elaboración propia].	535
Figura 302: Grados de libertad y disposición conceptual de los ejes que constituyen a los distintos sistemas integrados en el equipo de impresión híbrido (a). Área y Volumen de impresión referenciada al origen absoluto o cero máquina (b) [Fuente: Elaboración propia].	537
Figura 303: Imagen de la matriz de espejos contenido dentro del chip DMD [14], y esquema de funcionamiento de un proyector DLP [15].	538
Figura 304: Potencia espectral emitida por una lámpara de haluro metálico típica en el uso de los proyectores DLP [16].	539
Figura 305: Ubicación del proyecto en el interior del equipo(a). Vista del conjunto de proyección (b) y detalle de la ubicación y disposición de los leds UV-A (c) [Fuente: Elaboración propia].	540
Figura 306: Conjunto plataforma de construcción vista en alzado y vista tridimensional [Fuente: Elaboración propia].	541
Figura 307: Representación esquemática de la plataforma de construcción [Fuente: Elaboración propia].	542
Figura 308: Imagen esquemática de la cuba o depósito de resina [Fuente: Elaboración propia].	543
Figura 309: Esquema del nivelador o Wiper [Fuente: Elaboración propia].	543
Figura 310: Vista en alzado y en planta del sistema activo nivelador o Wiper (a). Despiece y vista en detalle de los sistemas de ajuste del Wiper (aspecto clave para garantizar su correcto funcionamiento) (b). Integración del sistema de nivelación dentro de la placa soporte depósito de resina (c) [Fuente: Elaboración propia].	544
Figura 311: Vista renderizada de los distintos sistemas que constituyen al equipo de impresión 3D por tecnología DLP de configuración Top-Down que integran al sistema híbrido de impresión multimaterial [Fuente: Elaboración propia].	545

- Figura 312:** Vista en planta y algunas características del perfil de aluminio anodizado (Item 8 40x40 E) utilizado en la estructura (a), y disposición de éstos en el armazón que constituye a la estructura (b) [Fuente: Elaboración propia]..... 545
- Figura 313:** Superposición de la placa Z0 (en azul), la placa soporte del depósito de resina y de la cuba en (orden ascendente) [Fuente: Elaboración propia]. 546
- Figura 314:** Imagen del sistema DLP del equipo híbrido multimaterial con piezas impresas por FDM, tras culminar la reproducción de una pieza de prueba (a). Inicio del barrido del Wiper durante el proceso de impresión (b) y proceso de fotopolimerización (c) [Fuente: Elaboración propia]. 547
- Figura 315:** Representación de una esfera de forma vectorial (CAD) y discretización del mismo a través de un mallado triangular con distintas resoluciones [Fuente: Elaboración propia]. 548
- Figura 316:** Vista en planta de la esfera anterior seccionada a una cota vertical próxima al extremo superior de dicha geometría a una resolución baja (a), representación esquemática de la superficie triangular a partir de sus vértices (b) y representación de un tetraedro (elemento discreto tridimensional) a partir de la combinación de cuatro caras con vértices comunes (c), finalmente mediante la asociación de tetraedros, dos geometrías cualesquiera (d) [Fuente: Elaboración propia]. 549
- Figura 317:** Representación esquemática del área de impresión pixelizada en función de la resolución del proyector (a) y su equivalente tridimensional a través de la voxelización del dominio de impresión, dimensiones del vóxel (b) [Fuente: Elaboración propia]. 550
- Figura 318:** Representación esquemática de una imagen bidimensional pixelada proyectada a máxima intensidad sin graduaciones cromáticas (a) y tras la superposición de éstas secuenciadas el equivalente a elemento tridimensional (b) [Fuente: Elaboración propia]. .. 550
- Figura 319:** Diagrama del sistema de impresión por DLP desarrollado para el equipo de impresión híbrido multimaterial [Fuente: Elaboración propia]. 551
- Figura 320:** Profundidad de curado en función de la dosis recibida siendo dosis $d = 10t$ para una resina con y sin pigmento [21]. 556
- Figura 321:** Representación esquemática del proceso de reproducción de objetos tridimensionales a través de un proceso de impresión 3D basada en la fotopolimerización frontal con bajos coeficientes invariantes de atenuación [Fuente: Elaboración propia]. 556

- Figura 322:** Grado de conversión teórico en capas de 50 μm con distintos coeficientes de atenuación [Fuente: Elaboración propia]. 557
- Figura 323:** Representación conceptual de probetas reproducidas a través de resinas acrílicas que junto con los bloqueadores han sido aditivadas con distintos pigmentos, evidenciado la posibilidad de dotar al objeto reproducido de atributos ópticos como coloración y la opacidad [Fuente: Elaboración propia]. 559
- Figura 324:** Representación conceptual de las probetas anteriores reproducidas a través de resinas acrílicas translucidas ligeramente pigmentadas [Fuente: Elaboración propia]. 560
- Figura 325:** Interacción de las partículas cerámicas inmersas en la resina fotosensible con la luz [25] (a). Pieza de prueba impresa con resina fotosensible sin cargar (b) y pieza impresa con resina cargada con partículas de Alúmina (c) [Fuente: Elaboración propia]... 562
- Figura 326:** Representación renderizada de probetas impresas con distintas barbotinas cargadas tanto de partículas cerámicas como metálicas pudiendo también ser fibras [Fuente: Elaboración propia]. 563
- Figura 327:** Piezas de prueba impresas con resina Spot-LV, sin partículas ferromagnéticas y dotada de partículas ferromagnéticas respectivamente [Fuente: Elaboración propia].... 564
- Figura 328:** Representación esquemática del elemento conjunto estructura Inkjet, vistas en perfil, alzado y plata conjunto (a) y vista tridimensional del mismo (b) [Fuente: Elaboración propia]. 567
- Figura 329:** Vista de perfil y proyectada de los sistema que permite el desplazamiento y posicionamiento del cabezal Inkjet en el eje Y (a). Disposición de dichos sistemas sobre y por debajo del elemento placa Z0 y detalle de la base fija de referencia común a ambos sistemas de impresión existentes (b) [Fuente: Elaboración propia]..... 569
- Figura 330:** Comparativa entre el error de posicionamiento admisible (fijado en los requerimientos) y el error de posicionamiento teórico máximo alcanzado en el plano X-Y [Fuente: Elaboración propia]. 569
- Figura 331:** Imagen del cartucho utilizado (Fujifilm Dimatix DMC-11610) constituido por el módulo de almacenamiento (depósito presurizado translucido y desechable) y el módulo de Eyección (Cabezal del cartucho) [27]. 570
- Figura 332:** a) Representación esquemática del sistema de ajuste de la resolución de impresión a través de la rotación del cartucho de impresión. Cabezal a 90° y tras ser rotado

un ángulo α con desplazamiento horizontal. b) Relación entre resolución y giro del cabezal con desplazamiento horizontal del cabezal [Fuente: Elaboración propia]. 571

Figura 333: *Cabezal de impresión a máxima resolución y a mínima resolución tras el giro del cartucho vista en planta (a, b respectivamente). Detalle del nonius y los ángulos de giro preestablecidos (c) [Fuente: Elaboración propia]. 572*

Figura 334: *Imagen en conjunto del cabezal de impresión explosionado, distintos elementos constitutivos y en detalle el sistema de ajuste por rotación [Fuente: Elaboración propia]... 572*

Figura 335: *Secuencia de imágenes que describe la incorporación de un cartucho de impresión y el ajuste de la resolución del sistema. (1) Cabezal vacío, (2) apertura del sistema de sujeción del cartucho, (3) incorporación del nuevo cartucho. (4) fijación del cartucho a través del sistema de sujeción, (5) ajuste manual de la resolución a través del nonius [Fuente: Elaboración propia]. 573*

Figura 336: *Representación de las señales que controlan el correcto funcionamiento del cartucho FUJIFILM Dimatix DMC-11610 y diseñadas en función de la reología del material eyectado [Fuente: Elaboración propia]. 574*

Figura 337: *Diagrama del sistema de impresión por Inkjet desarrollado para el equipo de impresión híbrido multimaterial [Fuente: Elaboración propia]. 576*

Figura 338: *Imágenes de los distintos elementos integradores de ambas tecnologías de reproducción (DLP e Inkjet) existentes e integradas en el equipo de impresión híbrido multimaterial descrito en la presente tesis [Fuente: Elaboración propia]. 577*

Figura 339: *Vista en planta de las distintas áreas de impresión y su integración (a), imagen general de equipo de impresión híbrido multimaterial (b) y vista en detalle de los distintos planos de trabajo dispuestos en dicho equipo (c) [Fuente: Elaboración propia]. 579*

Figura 340: *Diagrama de flujo del funcionamiento del equipo híbrido [Fuente: Elaboración propia]. 580*

Figura 341: *Representación esquemática de los procesos llevados a cabo en el primer bucle (impresión tridimensional por tecnología DLP) (a), y en el segundo bucle la deposición de las tintas a través del sistema Inkjet (b) [Fuente: Elaboración propia]. 581*

Figura 342: *a) Imagen renderizada del equipo diseñado y b) tras su construcción [Fuente: Elaboración propia]. 582*

- Figura 343:** Diagrama completo del equipo impresión híbrido multimaterial con todos sus sistemas integrados [Fuente: Elaboración propia]..... 583
- Figura 344:** Diagrama de los pasos seguidos en el desarrollo del equipo de impresión multimaterial híbrido de forma cronológica llevado a cabo en el proyecto de investigación Nhibrid32D [Fuente: Elaboración propia]..... 585
- Figura 345:** Representación esquemática de los motores bipolares empleados. Conexiones del bobinado del estator (a,b) e imagen típica de un motor Nema 17 bipolar (c) [Fuente: Elaboración propia]. 586
- Figura 346:** Esquema o diagrama de cableado para la conexión de un microcontrolador a un motor paso a paso bipolar a través de un driver DRV8825 [28]. 587
- Figura 347:** Representación esquemática sistema de control empleado para el sistema DLP del equipo Nhibrid32D [Fuente: Elaboración propia]. 589
- Figura 348:** Protoboard responsable del control de los motores paso a paso del equipo Nhibrid32D [Fuente: Elaboración propia]..... 590
- Figura 349:** (a) Esquema de la electrónica diseñada para generar el tren de pulsos del sistema Inkjet. (b) Señal generada en la simulación [Fuente: Elaboración propia]..... 592
- Figura 350:** Circuito electrónico mostrado de la Figura 349 en un estado inicial, capaz de generar el tren de pulsos (señal de eyección), implementado en un protoboard de forma separada (a1: control temporal de los pulsos, a2: control de la magnitud de los pulsos, a3: unión y salida de los mismos en una única señal). Forma de la señal de eyección aplicada en la generación de las gotas de tinta de plata ANP almacenada en el interior de los cartuchos DIMATIX DMC-11610 (b) e imagen de las conexiones eléctricas de los mismos al sistema de control (c). Finalmente, representación esquemática de las funciones de cada uno de los pines del cartucho (d) [Fuente: Elaboración propia]. 593
- Figura 351:** Sistema actual monodepósito de resina y monocartucho o en su defecto monocabezal (a). Vista del cartucho utilizado (b) [27] y a modo de ejemplo un carrusel de múltiples depósitos dispuestos en línea adaptado para un sistema DLP de configuración bottom-up (c) [29]. 594
- Figura 352:** Diagrama conceptual de equipo de impresión híbrido que bajo la combinación de DLP + Inkjet es capaz de reproducir partir de un archivo digital elementos constituidos por múltiples materiales combinados y en distintas graduaciones (a). Distintas configuraciones

de los cabezales en el carro de impresión (b). Múltiples depósitos dispuestos en un carrusel rotatorio del sistema DLP de configuración Top- Down [Fuente: Elaboración propia]..... 595

Figura 353: Imagen conceptual de una máquina híbrida multimaterial en la que se combinan los sistema MIP-SL + Inkjet PIJ+ DIW, ofreciendo una gran versatilidad gracias a una cúpula rotativa respecto a un conjunto de depósitos fijos e intercambiables. Vista frontal, lateral y en planta del equipo concepto mencionado (a), vista en perspectiva renderizada del mismo (b) y en detalle apertura de la puerta trasera (c) [Fuente: Elaboración propia]. 597

Figura 354: Imagen reproducida sobre distintos sustratos [Fuente: elaboración propia]... 600

Figura 355: Dimensiones relativas del circuito reproducido; Imagen impresa sobre un folio Din A4 de 80 gramos por una impresora doméstica, y arriba a la derecha circuito impreso por el sistema Inkjet desarrollado sobre el mismo sustrato y debajo de ésta una moneda de un céntimo de euro (a). Vista ampliada de la zona resaltada, en la reproducción llevada a cabo con el sistema desarrollado (b). Imagen representativa de las gotas de tinta depositas sobre las fibras del papel y la evolución de estas por los fenómenos capilares(c) [30] [Fuente: elaboración propia]..... 601

Figura 356: Dimensiones relativas del circuito inicial reproducido sobre lámina de cristal o porta muestras [Fuente: elaboración propia]. 602

Figura 357: Detalle ampliado del circuito, depósitos húmedos, reproducción monocapa [Fuente: elaboración propia]..... 602

Figura 358: Imagen del circuito reproducido sobre cristal tras el curado de la tinta, el reflejo de la luz y el brillo de la imagen constatan la presencia de plata en el depósito (a). Detalle del mismo referenciado a una escala milimétrica (b) y zona ampliada en detalle de la imagen reproducida(c) [Fuente: elaboración propia]..... 602

Figura 359: Depósito húmedo multicapa: 3 capas de tinta sin curado intermedio sobre sustrato de cristal [Fuente: elaboración propia]. 603

Figura 360: Distorsión de la imagen por el contacto y arrastre del cabezal de impresión con aparición de gotas satélites (a). Detalle de una zona del circuito donde se aprecia la heterogeneidad del depósito (b). Imagen del depósito curado tras comprobar su continuidad en la más columna gruesa con la correspondiente ruptura de los depósitos de plata al estar poco curada (c) [Fuente: elaboración propia]. 604

Figura 361: Superado el contacto y arrastre, circuito de prueba impreso húmedo con tinta no diluida monocapa sobre un porta muestras de cristal [Fuente: elaboración propia]. 605

- Figura 362:** Reproducción del circuito de prueba con menor drop spacing en Y. Circuito húmedo monocapa sobre un porta muestras de cristal (a, b). Imagen ampliada de parte del circuito vista a contraluz (c) [Fuente: elaboración propia]. 605
- Figura 363:** Imágenes del circuito reproducido y curado por temperatura, depósitos secos [Fuente: elaboración propia]. 606
- Figura 364:** Reproducción bicapa sin curado intermedio del circuito de prueba con drop spacing en X,Y de 40 y 25 μm respectivamente, imágenes de los depósitos húmedos [Fuente: elaboración propia]. 607
- Figura 365:** Reproducción del circuito de prueba sobre sustrato de resina fotosensible FunToDo Deep black polimerizado en una etapa previa. Dimensiones relativas del circuito y el sustrato iguales a las pruebas anteriores (a). Vista completa en plata del circuito (b). Imagen en detalle del área resaltada en pruebas anteriores (c) [Fuente: elaboración propia]. 608
- Figura 366:** Imagen en máquina de la plataforma de construcción sujetando al sustrato de resina fotosensible curado en donde se ha reproducido el circuito de prueba (a, b). Vista en planta de la reproducción (c) [Fuente: elaboración propia]. 609
- Figura 367:** Imagen en detalle del circuito reproducido monocapa en estado húmedo sobre el sustrato resina fotosensible (a). Detalle del área resaltada en pruebas anteriores vista a tras luz en estado húmedo (b) y curado por temperatura (c) [Fuente: elaboración propia]. 610
- Figura 368:** Imagen completa en plata del circuito reproducido (a), y detalles de distintas áreas resaltadas en las pruebas anteriores (b, c) [Fuente: elaboración propia]. 610
- Figura 369:** Imágenes tomadas a través de microscopio SEM en bajo vacío de la reproducción del circuito de prueba sobre el sustrato de resina una vez curado por temperatura (a). Zona del circuito ampliada (b) y detalle de la topografía del sustrato de resina cubierto por la tinta de plata (c). Imagen en detalle de la pista vertical y defecto en el sustrato fotopolimerizado (d). Imagen de la composición de la vista anterior resaltado en blanco el material depositado en este caso plata sobre resina (e) [Fuente: elaboración propia]. 611
- Figura 370:** Circuito de prueba reproducido mediante 4 capas superpuestas de tinta de plata sin curado intermedio (a). Interacción de los solventes de la tinta con el sustrato de resina fotosensible (b) [Fuente: elaboración propia]. 612

- Figura 371:** Imagen de una lámina flexible de resina fotosensible curada, circuito de prueba reproducido sobre dicha resina flexible [Fuente: elaboración propia]. 612
- Figura 372:** Impresión del circuito de prueba sobre un sustrato más traslucido resina Spot-A HT sin pigmentar [Fuente: elaboración propia]. 613
- Figura 373:** Aspecto de los circuitos mostrados con anterioridad tras ser expuestos a la intemperie durante 8 meses sobre un sustrato de resina fotosensible y barbotina de LTCC [Fuente: elaboración propia]. 613
- Figura 374:** Imagen renderizada de la pieza de prueba inicial a reproducir por DLP (Proof of concept 2) (a). Pieza reproducida sobre plataforma maciza de PLA impresa en 3D por FDM (b). Pieza reproducida satisfactoriamente sobre plataforma modificada (c) [Fuente: elaboración propia]. 614
- Figura 375:** Imágenes del depósito mojado por las resinas antes y durante el procesos de impresión por DLP con la particularidad de utilizar resinas con distintas propiedades ópticas (a,b respectivamente). Representación esquemática de las distintas soluciones probadas en relación a las geometrías del depósito (c, d respectivamente) [Fuente: elaboración propia]. 615
- Figura 376:** Primeras pruebas llevadas a cabo con el sistema de impresión DLP haciendo uso de formulaciones basadas en alúmina (Presentación de scattering) [Fuente: elaboración propia]. 616
- Figura 377:** Representación esquemática del proceso completo de reproducción y consecuencias del ciclo térmico tras la impresión (a). Experiencias obtenidas desde la impresión hasta la sinterización de las probetas realizadas bajo una formulación a base de alúmina al 50 wt.% (b) [Fuente: elaboración propia]. 617
- Figura 378:** Imágenes de la formación de la estructura cerámica tras el proceso de sinterización obtenidas del Microscopio electrónico de barrido SEM [Fuente: elaboración propia]. 617
- Figura 379:** Imágenes de las probetas impresas en verde (a) y tras el proceso de sinterizado (b) haciendo uso de una formulación de LTCC cargada al 50 Wt.%. Detalle al visto al SEM de la formación del estado de la cerámica tras la sinterización (c) [Fuente: elaboración propia]. 618
- Figura 380:** Elementos constitutivos de la resina Spot-LV y del polvo LTCC utilizados en dichas formulaciones [Fuente: elaboración propia]. 619

- Figura 381:** *Imágenes de la pieza impresa (a) al microscopio SEM de la estructura cerámica de las piezas impresas con LTCC tras el proceso de sinterización bajo distintas concentraciones (b) [Fuente: elaboración propia].*..... 619
- Figura 382:** *Evolución de la densidad de la botina de LTCC con resina Spot-LV y contracción dimensional respecto al porcentaje de carga en sólidos [Fuente: elaboración propia].*..... 620
- Figura 383:** *Evolución de la viscosidad de la botina de LTCC con resina Spot-LV en función del porcentaje de carga en sólidos [Fuente: elaboración propia].*..... 620
- Figura 384:** *Imagen al microscopio SEM de la superficie de las piezas impresas y tras el ciclo de sinterización de dos barbotinas distintas de LTCC al 50 wt.% [Fuente: elaboración propia].*..... 621
- Figura 385:** *Evolución de la viscosidad en una barbotina de LTCC y resina Spot-LV en función del porcentaje de dispersante utilizado en la formulación [Fuente: elaboración propia].*..... 621
- Figura 386:** *Vista en alzado de una sección de la pieza impresa en verde antes y después del sinterizado (a, b), vista en plata de la misma tras el proceso de sinterizado (c). Imagen tomada del dilatómetro óptico al principio y al final del ciclo térmico de sinterización (d) [Fuente: elaboración propia].*..... 622
- Figura 387:** *Imagen de la pieza de prueba o probeta impresa por DLP utilizando una rudimentaria de resina Spot-LV con partículas ferromagnéticas (a). De talle de dicha pieza suspendida por la atracción de un imán (b) [Fuente: elaboración propia].* 623
- Figura 388:** *Captura de pantalla del programa CAD en donde se ha diseñado las estructuras Lattice impresas (a). Imagen del equipo Nhibrid32D y de las piezas impresas sobre plataforma de construcción (b) y detalle de una de ellas (c) [Fuente: elaboración propia].*..... 624
- Figura 389:** *Imagen de la reproducción completa de una segunda estructura Lattice. Vista en alzado y en planta de la geometría del elemento a reproducir a través de la visualización del archivo stl a través del Meshmixer (a). Representación del mismo a través de la Herramienta matemática Matlab (b) e imágenes generadas y enviadas al proyector DLP, tras la discretización de la geometría tridimensional en un conjunto de capas de espesor fijo (c). Finalmente, imágenes de la reproducción de la geometría en el equipo Nhibrid32D (d) y vista de la pieza final en alzado (e) [Fuente: elaboración propia].* 625

- Figura 390:** Pieza de Impresa a través del sistema DLP del equipo Nhibrid32D haciendo uso de la resina Spot-HT [Fuente: elaboración propia]. 626
- Figura 391:** Piezas en verde impresas por el equipo Nhibrid32D usando barbotina fotosensible LTCC (a, b). Imagen al microscopio SEM de la superficie en verde de la pieza b (c) [Fuente: elaboración propia]..... 627
- Figura 392:** Piezas anteriores impresas tras el proceso de sinterización (a, b). Imagen al microscopio SEM de la superficie pieza b tras el ciclo térmico (c) [Fuente: elaboración propia]. 627
- Figura 393:** Comparación entre dos piezas idénticas tras la contracción dimensional sufrida durante el ciclo de sinterizado. Imágenes en planta, perfil e inclinadas [Fuente: elaboración propia]. 628
- Figura 394:** Lamina de barbotina con LTCC y cordones de tinta estables impresos con tinta de plata ANP silverjet DGP HRA curada a 170°C tras el ciclo térmico de sinterización del sustrato [Fuente: elaboración propia]. 628
- Figura 395:** Estructura Lattice impresa en verde bajo una condiciones de 50/8 $\mu\text{m/s}$ a partir una nueva formulación de barbotina de LTCC vista en de perfil y en planta con sus respectivas vista ampliadas (a, b). Vista lateral y detalle ampliado de la misma geometría impresa bajo condiciones de 25/4 $\mu\text{m/s}$ 24h después [Fuente: elaboración propia]..... 629
- Figura 396:** Imágenes al SEM topográfico de la estructura Lattice en verde reproducido bajo las condiciones de 25/4 $\mu\text{m/s}$. Vista en planta de la estructura en verde (a) y vista lateral en detalle de la superposición de capas (b) [Fuente: elaboración propia]. 629
- Figura 397:** Comparación entre pieza de reproducidas con capas de 50 y 25 μm con la misma formulación de resina sedimentada tras el transcurso de 24h [Fuente: elaboración propia]. 630
- Figura 398:** Estructura Lattice impresa antes y después del ciclo térmico de sinterización (a). Vista en planta al SEM de la pieza tras la sinterización reproducido en condiciones de 25/4 $\mu\text{m/s}$ (b). Vista lateral en detalle de la superposición de las capas en las columnas de la estructura tras la sinterización (c, d) [Fuente: elaboración propia]. 631
- Figura 399:** Imágenes en rayos x de la estructura Lattice impresa en condiciones de 50/8 $\mu\text{m/s}$ en verde. Vista en plata (a), vista en alzado de la misma y en detalle (b, c) [Fuente: elaboración propia]..... 632

- Figura 400:** Sedimentación de las partículas cerámicas. Un exceso de dispersante en la formulación afín de reducir la viscosidad de la misma fomenta un a velocidad sedimentación excesiva [Fuente: elaboración propia]..... 632
- Figura 401:** Vista renderizada del bloque cerámico impresión con estructura Lattice interna [Fuente: elaboración propia]..... 633
- Figura 402:** Vista del bloque impresión en verde (a), detalle de la estructura interior del bloque visto a través de los múltiples agujeros existente (b) y agrupación de bloque con reproducción fiel de pieza renderizada (c) [Fuente: elaboración propia]..... 633
- Figura 403:** Vista en perspectiva del elemento reproducido tras la sinterización (a). Detalle de la estructura interna del bloque (b). Comparativa de la contracción dimensional a través de las imágenes en planta y perfil del cubo (c). Finalmente, imagen de un conjunto de piezas impresas y posteriormente sinterizadas (d), y en detalle cubo entero y cortado antes y después de la sinterización (e) [Fuente: elaboración propia]..... 634
- Figura 404:** Imagen de una segunda estructura Lattice impresa con el equipo Nhibrid32D mediante el uso de resina Spot-HT con 50 μm de espesor de capa a 1,9 s de exposición a máxima intensidad (a). Piezas sobre la plataforma de construcción (b). Pieza ubicada sobre la base del molde y en sus sucesivas etapas de su construcción (c, d, e y f). Pieza bimaternal final (g) [Fuente: elaboración propia]. 635
- Figura 405:** Elementos utilizados en la pieza de prueba inicial de izquierda a derecha resistencia y led ambos del tipo SMD [Fuente: elaboración propia]. 637
- Figura 406:** Representación del elemento a reproducir como prueba inicial del equipo de impresión híbrido multimaterial; vista en planta, alzado y perfil (a), y vista tridimensional renderizada del mismo (b) [Fuente: elaboración propia]..... 637
- Figura 407:** Impresión del demostrador anterior en el equipo Nhibrid32D mediante el uso de tinta de plata ANP silverjet DGP HRA y resina Spot-HT. a) Reproducción monocapa del circuito. b) Reproducción bicapa sobre el sustrato de resina sin secar con bordes ligeramente curvados. c) Reproducción monocapa sobre el sustrato de resina previamente secado y expuesto a luz ultravioleta [Fuente: elaboración propia]..... 638
- Figura 408:** Impresión del demostrador tras el curado de las tintas por temperatura. a,b) Degradación del sustrato de fotopolimérico a consecuencia de una exposición prolongada a alta temperatura de circuito de 4 capas [Fuente: elaboración propia]. 639

- Figura 409:** *Demostrador anterior reproducido sobre un sustrato cerámico de LTCC en verde impreso con capas de 50 μm y un tiempo de exposición de 3 s, sobre este sustrato y mediante el uso de tinta ANP silverjet DGP HRA con un drop spacing en X e Y de 40 μm circuito eléctrico bicapa a escala 1:1 [Fuente: elaboración propia]..... 640*
- Figura 410:** *Imagen del circuito reproducido (a). Representación a través del Matlab de una zona del patrón a reproducir mediante el solapamiento de gotas (b). Imagen topológica a través del SEM de la misma área del circuito impreso sobre un sustrato de LTCC en verde mediante una única capa de tinta de plata después de su curado (c). Vista detallada de como los pixeles de la imagen de mascara proyectada sobre la superficie polimerizada por el sistema DLP y que posteriormente constituye el sustrato, afectan la reproductibilidad de los patrones (d) [Fuente: elaboración propia]. 641*
- Figura 411:** *Demostrador impreso tras el proceso de sinterización (aparición de fisuras y absorción del circuito mono-capa de plata) [Fuente: elaboración propia]..... 642*
- Figura 412:** *Pieza a reproducir con el sistema híbrido: Avión de juguete con $\frac{1}{2}$ estructura a la vista [Fuente: elaboración propia]..... 642*
- Figura 413:** *Imágenes de parte del avión de juguete impreso con resina sin carga aun sobre la plataforma de construcción y sin aporte de material por el sistema Inkjet (prueba inicial) [Fuente: elaboración propia]..... 643*
- Figura 414:** *Reproducción completa de la geometría tridimensional que define al avión de juguete (a) y tras un post-proceso de pulido y pintado imágenes de la pieza impresa acabada (b,c) [Fuente: elaboración propia]. 643*
- Figura 415:** *Elementos que conforman la pantalla electroluminiscente reproducida en el ala del avión de juguete impreso por el equipo híbrido desarrollado [Fuente: elaboración propia]. 644*
- Figura 416:** *Imagen de la geometría reproducida con parte del circuito impreso sobre el ala izquierda del mismo (a), tras la deposición de las tintas funcionales (b) y con la inserción del motor aun sin conectar a la base (c). Por último, representación renderizada del Juguete en su estado final [Fuente: elaboración propia]..... 644*
- Figura 417:** *Imágenes tomadas del microscopio óptico a diferentes aumentos de las partículas fosfóricas contenida en el interior de la pintura EL, cuyos diámetros superan la limitación impuesta por el diámetro de los nozzles ($\phi P < 0,2 \mu\text{m}$) [Fuente: elaboración propia]..... 645*

Figura 418: *Imágenes de una linterna impresa alimentada por una batería. Representación renderizada a través del CAD de la pieza a imprimir (a). Vista de la pieza en máquina tras finalizar el proceso de reproducción (b) y en detalle de la fidelidad alcanzada por el equipo (c) e impresión de las pistas del circuito rampas de 45° por medio del sistema Inkjet (d)* [Fuente: elaboración propia]..... 646

Figura 419: *Vista en planta de la fidelidad alcanzada en la reproducción tras reducir la altura de capa a 25 µm previo a la deposición de la tinta y tras el ajuste del Inkjet (a). Vista de la pieza inmersa en la cuba cargada de la misma resina dotada de un colorante rojo traslucido durante su construcción (b) y tras su plegado (c).* [Fuente: elaboración propia]..... 647

Figura 420: *Imágenes del demostrador de la Figura 406 modificado, ahora con el circuito totalmente funcional embebido en la geometría tridimensional; Estructura 3D de resina (a), Geometría 3D con múltiples materiales funcionales (b) y elemento final reproducido (c)* [Fuente: elaboración propia]..... 648

Figura 421: *Elemento de revolución reproducido mediante la tecnología híbrida descrita en la presente tesis doctoral, tras la optimización de tanto de los materiales (Barbotina) como de los parámetros de impresión y el ciclo térmico de sinterizado. Imagen renderizada de la pieza a reproducir (a), vista en planta de la misma antes y después del sinterizado (b) y finalmente imagen de la pieza tras culminar el proceso de reproducción* [Fuente: elaboración propia]..... 648

Figura 422: *Imágenes de las fracturas y micro-grietas presentes en las piezas en función de la velocidad en la que se incrementa la temperatura en la etapa del de-binding (a) y vista en rayos x de las mismas (b)* [Fuente: elaboración propia]. 649

Figura 423: *Imágenes a rayos x de una pieza cilíndrica tras superar la etapa del calcinado y del sinterizado en un ciclo térmico optimizado realizado en una atmosfera de aire (a). Imágenes al microscopio óptico de las fisuras producidas por una contracción irregular del mismo (b)* [Fuente: elaboración propia]. 650

Figura 424: *Vista en planta y de perfil de las piezas en verde, tras superar el de-binding en una atmósfera de Argón e Hidrógeno y tras superar la sinterización (a). Imágenes al microscopio de la mejora en las micro-fracturas que experimentaba la pieza tras su sinterización en una atmosfera inerte (b)* [Fuente: elaboración propia]. 651

Figura 425: *Pruebas recientes realizadas en geometrías simples, en donde los patrones reproducidos con el sistema Inkjet resistieron la sinterización presentando una cierta*

continuidad eléctrica antes y después del mismo (a). Prueba incrementando la cantidad de los depósitos de planta afín de reducir los efectos de la difusión de ésta, en los circuitos de las piezas tras la sinterización (2, 4, 6, 8 capas respectivamente contando de izquierda a derecha) b). Tras la mejoría en los procesos de sinterización representación de una de las geometrías consideradas como susceptible a ser reproducida por el equipo Nhibrid32D enfatizando la flexibilidad geométrica que estos sistemas híbridos de fabricación aditiva pueden llegar a ofrecer c) [Fuente: elaboración propia]. 651

Figura 426: Primeras pruebas realizadas en el equipo Nhibrid32D con piezas cerámicas híbridas sinterizadas a). Tras la evolución de los distintos sistemas, procesos y materiales involucrados, patrón estable reproducido en estado húmedo sobre un sustrato cerámico en verde b). Imagen de la misma pieza tras el curado de la tinta mediante a evaporación forzada de los solventes c) y finalmente dos piezas con el circuito reproducidos mediante 3 y 4 capas de tinta de plata que tras la sinterización de la misma resulto ser insuficiente para la generación de un depósito continuo tras la sinterización d) y ampliación de los electrodos de contacto e) [Fuente: Elaboración propia]. 652

Figura 427: Distintos ejemplos de sensores de presión desarrollados bajo la tecnología thick film o de capa gruesa en LTCC [33], [34]. 653

Figura 428: Representación esquemática de una sonda Lambda, comercializada por la empresa Francisco Albero S.A.U (FAE) [Fuente: elaboración propia]. 654

Figura 429: Imágenes DICOM (Digital Imaging and Communication in Medicine) proporcionadas por el departamento de radiología del Hospital Clínic de Barcelona. (a) modelo tridimensional de la superficie hepática, (b) modelo de la vena cava, (c) modelo de la vena porta y (d) sendos nódulos tumorales [Fuente: departamento de radiología del Hospital Clínic de Barcelona]. 656

Figura 430: Tras el tratamiento digital de las imágenes anteriores mediante el programa Meshmixer (a) unión mediante vigas de los nódulos tumorales a la vena porta y (b) Resaltado conjunto de vasos y tumores ubicados dentro del tejido hepático generando un archivo digital único imprimible [Fuente: Elaboración propia]. 656

Figura 431: Imagen renderizada realizada a través del programa Keyshot del hígado en cuestión desarrollada a partir de las imágenes DICOM (Digital Imaging and Communication in Medicine) tomadas de una tomografía computarizada junto con una resonancia magnética del paciente [Fuente: elaboración propia]. 657

- Figura 432:** Archivo imprimible del hígado en estudio [Fuente: elaboración propia]..... 657
- Figura 433:** Representación esquemática de la secuencia de etapas que han constituido el proceso de fabricación de los modelos físicos funcionales a partir de un archivo digital mediante un conjunto de técnicas tradicionales, combinadas y fundamentadas en la impresión 3D [Fuente: elaboración propia]..... 659
- Figura 434:** Imagen del modelo reproducido mediante la impresión 3D de un único molde en PLA (ácido poliláctico o poliácido láctico) y PVA (Alcohol de polivinilo) (a). Eliminación de los soportes hidrosolubles del interior del molde (b) y vertido de la silicona Smooth-On EcoFlex 00-30 (c) [Fuente: Elaboración propia]. 661
- Figura 435:** Imagen de la impresión de las partes que constituyen el molde del hígado a reproducir fabricadas completamente con PLA de color negro (a), vista en perspectiva de las piezas impresas sobre plataforma de construcción (b) unión previa de ambas partes del molde (c), imagen del molde inferior una vez pulido y recubierto tras la finalización de la construcción de las lámparas EL (d) y finalmente imagen de sendos molde una vez llenados de la silicona empleada (e) [Fuente: elaboración propia]. 662
- Figura 436:** Imagen de la extracción del modelo hepático tras la destrucción del molde que lo contiene [Fuente: elaboración propia]..... 662
- Figura 437:** Imágenes de los distintos modelos hepáticos generados. Modelo inicial fundamentado en el empleo de siliconas blandas capaces de emular el tejido hepático (a), modelo capaz de ofrecer cierta transparencia (b) y modelo completamente transparente y translucido sin concesiones en la dureza requerida (c). Finalmente, tumores iluminándose en el interior del modelo anatómico hepático solicitado por el departamento de oncología del Hospital Clínic de Barcelona [Fuente: elaboración propia]. 663
- Figura 438:** Representación esquemática de la realidad mixta: unión entre la realidad física y la realidad virtual (a), Gafas inteligentes HoloLens de la empresa Microsoft (b) y ejemplo de la implementación de la realidad mixta en el ámbito médico, en donde se realiza un ensayo sobre un modelo anatómico (c) [35]..... 664
- Figura 439:** Porta muestras recubierto con tintas conductoras cuya superficie ha sido funcionalizada como un sensor capacitivo (a). Representación esquemática de la unión entre la realidad física y la realidad virtual en un mundo con objetos funcionalizados (b) y finalmente imagen del empleo de las gafas HoloLends en la visualización de la geometría de

los modelos anatómicos anteriores (Hígados) reproducido a través del empleo de las tecnologías de la fabricación aditiva (c) [Fuente: elaboración propia]. 665

4.7. LISTADO DE TABLAS DEL VOLUMEN 2

<i>Tabla 10: Distanciamiento de los nozzles en sentido vertical y horizontal en función del ángulo de inclinación α y su relación con el error máximo de posicionamiento asumible</i> [Fuente: Elaboración propia].	571
<i>Tabla 11: Distintos modos de control de los motores paso a paso</i> [Fuente: Elaboración propia].	588
<i>Tabla 11: Resumen de datos y condiciones en la reproducción de piezas simples de LTCC</i> [Fuente: elaboración propia].	626

4.8. REFERENCIAS DEL VOLUMEN 2

- [1] F. Medina, a. J. Lopes, a. V. Inamdar, R. Hennessey, J. a. Palmer, B. D. Chavez, D. Davis, P. Gallegos, and R. B. Wicker, "Hybrid Manufacturing: Integrating Direct-Write and Stereolithography," *Proc. 2005 Solid Free. Fabr. Symp.*, pp. 39–49, 2005.
- [2] A. J. Lopes, E. MacDonald, and R. B. Wicker, "Integrating stereolithography and direct print technologies for 3D structural electronics fabrication," *Rapid Prototyp. J.*, vol. 18, no. 2, pp. 129–143, 2012.
- [3] E. MacDonald, R. Salas, D. Espalin, M. Perez, E. Aguilera, D. Muse, and R. B. Wicker, "3D printing for the rapid prototyping of structural electronics," *IEEE Access*, vol. 2, pp. 234–242, 2014.
- [4] D. Espalin, D. W. Muse, E. MacDonald, and R. B. Wicker, "3D Printing multifunctionality: Structures with electronics," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 72, no. 5–8, pp. 963–978, 2014.
- [5] S. J. Leigh, R. J. Bradley, C. P. Purssell, D. R. Billson, and D. a. Hutchins, "A Simple, Low-Cost Conductive Composite Material for 3D Printing of Electronic Sensors," *PLoS One*, vol. 7, no. 11, pp. 1–6, 2012.
- [6] K. H. Church, H. Tsang, R. Rodriguez, P. Defembaugh, and R. Rumpf, "Printed circuit structures, the evolution of printed circuit boards," *IPC APEX EXPO Conf. Exhib. 2013, APEX EXPO 2013*, vol. 2, pp. 1242–1261, 2013.
- [7] S. D. Hoath, *Fundamentals of Inkjet Printing*, Wiley-VCH. Weinheim, Germany: Wiley & Sons, 2016.
- [8] S. Maruo, K. Ikuta, and T. Ninagawa, "Multi-polymer microstereolithography for hybrid opto-MEMS," *Tech. Dig. MEMS 2001. 14th IEEE Int. Conf. Micro Electro Mech. Syst. (Cat. No.01CH37090)*, pp. 151–154, 2001.
- [9] R. Wicker, F. Medina, and C. Elkins, "Multiple material micro-fabrication: extending stereolithography to tissue engineering and other novel applications," *Proc. 15th ...*, pp. 754–764, 2004.
- [10] A. Inamdar, M. Magana, F. Medina, Y. Grajeda, and R. Wicker, "Development of an Automated Multiple Material Stereolithography Machine," *Proc. 17th Annu. Solid Free. Fabr. Symp. Austin, TX*, no. Lm, pp. 624–635, 2006.
- [11] J. W. Choi, H. C. Kim, and R. Wicker, "Multi-material stereolithography," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 211, no. 3, pp. 318–328, 2011.
- [12] J. Choi, E. Macdonald, and R. Wicker, "Multiple Material Microstereolithography," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 49, pp. 543–551, 2009.
- [13] C. Zhou, Y. Chen, Z. Yang, and B. Khoshnevis, "Development of a Multi-material Mask-Image-Projection-based Stereolithography for the Fabrication of Digital Materials," *Annu. Solid Free. Fabr. Symp.*, pp. 65–80, 2011.
- [14] R. Wilson, "Designing MEMS-based DLP pico projectors," *Electronicsweekly.com*, 2014. [Online]. Available: <http://www.electronicsweekly.com/news/products/displays-2/designing-mems-based-dlp-pico-projectors-2014-07/>. [Accessed: 08-Jan-2016].
- [15] "How does DLP® work?," *Optoma*. [Online]. Available: <http://www.optoma.es/projectortechnology/DLP>. [Accessed: 08-Jan-2016].

- [16] Wikipedia, "Metal-halide lamp." [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Metal-halide_lamp. [Accessed: 05-Feb-2016].
- [17] C. Carrillo and M. Monroy, "Materiales de resinas compuestas y su polimerización," *Rev. ADM organo Of. la Asoc. Dent. Mex.*, vol. LXV, pp. 10–17, 2009.
- [18] T. Cabral and J. F. Douglas, "Propagating waves of network formation induced by light *," *Polym. Div. Natl. Inst. Stand. Technol.*, vol. 46, pp. 4230–4241, 2005.
- [19] A. Vitale, M. G. Hennessy, O. K. Matar, and J. T. Cabral, "A Unified Approach for Patterning via Frontal Photopolymerization," *Adv. Mater.*, pp. 6118–6124, 2015.
- [20] J. Alvankarian and B. Y. Majlis, "A Modified Lithography Technique Exploiting the Oxygen Inhibitory Effect on UV Curing in Microfabrication: A Modified Lithography Technique," *PLoS One*, no. March, 2015.
- [21] J. Bonada, A. Muguruza, X. Fernández-Francos, and X. Ramis, "Influence of exposure time on mechanical properties and photocuring conversion ratios for photosensitive materials used in Additive Manufacturing," *Procedia Manuf.*, vol. 13, 2017.
- [22] L. Ji, W. Chang, M. Cui, and J. Nie, "Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry Photopolymerization kinetics and volume shrinkage of 1,6-hexanediol diacrylate at different temperature," *Journal Photochem. Photobiol. A Chem.*, vol. 252, pp. 216–221, 2013.
- [23] L. Batch and W. Macosko, "Oxygen inhibition in differential scanning calorimetry of free radical polymerization," in *Thermochimica Acta*, 1990, vol. 166, pp. 185–198.
- [24] T. A. I. Y. Lee, W. Kaung, and E. S. Jo, "Synthesis and Photopolymerization of Novel Multifunctional Vinyl Esters," *Polym. Sci.*, vol. 42, no. 17, pp. 4424–4436, 2004.
- [25] C. Sun and X. Zhang, "The influences of the material properties on ceramic micro-stereolithography," *Sensors Actuators, A Phys.*, vol. 101, no. 3, pp. 364–370, 2002.
- [26] M. Griffith and J. W. Halloran, "Freeform fabrication of ceramics via stereolithography," *J.*, vol. 79, pp. 2601-08, 1996.
- [27] Fujifilm, "Dimatix Materials Cartridge." [Online]. Available: http://www.fujifilmusa.com/products/industrial_inkjet_printheads/deposition-products/materials-cartridge/index.html. [Accessed: 09-Feb-2017].
- [28] P. R. & Electronics, "DRV8825 Stepper Motor Driver Carrier, High Current (md20a)." [Online]. Available: <https://www.pololu.com/product/2132>. [Accessed: 20-Jan-2016].
- [29] R. Holtrup, "Xzeed DLP," University of twente, 2015.
- [30] J. Ducreé, "Ink-Jet Technology," *Ducreé, J.* [Online]. Available: http://www.dcu.ie/~ducreeje/myfluidix/Materials/08_Ink-Jet.pdf. [Accessed: 10-Sep-2017].
- [31] P. C. Duineveld, "The stability of ink-jet printed lines of liquid with zero receding contact angle on a homogeneous substrate," *J. Fluid Mech.*, vol. 477, pp. 175–200, 2003.
- [32] P. J. Smith, D. Y. Shin, J. E. Stringer, B. Derby, and N. Reis, "Direct ink-jet printing and low temperature conversion of conductive silver patterns," *J. Mater. Sci.*, vol. 41, no. 13, pp. 4153–4158, 2006.
- [33] "Fraunhofer: Application - Sensors." [Online]. Available:

https://www.ikts.fraunhofer.de/en/departments/electronics_microsystems/hybrid_micro_systems/Microsystems_LTCC/HTCC/Application_Sensors/Pressure_Sensors.html. [Accessed: 05-Jul-2018].

- [34] SensorsONE, “Ceramic Pressure Transducer Cells for OEM Design.” [Online]. Available: <https://www.sensorsone.com/ceramic-pressure-transducer-cells-for-oem-design/>. [Accessed: 05-Jul-2018].
- [35] Yeltic, “La realidad mixta: por qué es considerada la tecnología del 2017,” *Medium*, 2017. [Online]. Available: <https://medium.com/@YelticVR/la-realidad-mixta-por-qué-es-considerada-la-tecnología-del-2017-3e5abe9b686e>. [Accessed: 25-Apr-2018].

