

## Aplicación de la fabricación aditiva en la obtención de moldes para termoconformar gráficos tangibles orientados a personas con discapacidad visual

J. Gual Ortí, J. Serrano Mira, M. J. Mañez Pitarch

---

**RESUMEN:**

Los gráficos tangibles obtenidos mediante termoconformado de láminas de plástico son un tipo de producto muy común en los distintos ámbitos relativos a la educación y al acercamiento a la cultura de las personas con discapacidad visual, fundamentalmente para la realización de gráficos en relieve. Este tipo de gráficos tangibles termoconformados requieren de un molde para su fabricación, el cual suele ser caro para realizar series de producción media y grande. Las cada vez más habituales técnicas de fabricación aditiva, popularmente conocidas como «impresión en 3D», abren un amplio campo de posibilidades para la realización de gráficos tangibles de forma directa, rápida y económica. En este trabajo se presenta un estudio sobre la viabilidad técnica y económica de la aplicación de las técnicas de fabricación aditiva de bajo coste para la obtención de moldes para el termoconformado de gráficos tangibles.

**PALABRAS**

Materiales en relieve. Gráficos táctiles. Gráficos tangibles. Termoconformado.

**CLAVE:**

Fabricación aditiva. Impresión 3D.

**ABSTRACT:**

**Use of additive manufacturing to obtain moulds to thermoform tactile graphics for people with visual disability.** The raised graphics obtained by thermoforming plastic membranes are standard items in educational and cultural activities geared to people with visual disability. Manufacturing this type of thermoformed tactile graphics calls for moulds, which are fairly expensive for medium and large production runs. Increasingly popular additive manufacturing or «3D printing» techniques are paving the way for the direct, speedy, and inexpensive production of tactile graphics. This article discusses a study on the technical and economic feasibility of using low-cost additive manufacturing technology to produce moulds for thermoformed tactile graphics.

**KEY WORDS:**

Relief materials. Tactile graphics. Thermoforming. Additive manufacturing. 3D printing.

### 1. Introducción

El objetivo del trabajo expuesto a continuación es mostrar las posibilidades que presentan las técnicas de fabricación aditiva de bajo coste, comúnmente denominada «impresión 3D», a la hora de ser empleadas como medio para obtener, de una forma directa, los moldes necesarios para termoconformar gráficos tangibles portables orientados a personas con discapacidad visual.

Estos gráficos tangibles portables se fabrican en series pequeñas o medias, y tienen como principal particularidad la de su corto ciclo de vida, es decir, su uso es temporal (en muchas ocasiones, incluso único). Por ello, deben ser muy económicos, tanto en materiales como en costes de producción, lo que implica que se deberán obtener por técnicas de fabricación similares a las empleadas

en producciones en serie, requiriéndose generalmente en estos casos la obtención de moldes para poder producir las piezas finales. Además, respecto a su usabilidad, cabe destacar que deberán ser ligeros, resistentes, de un tamaño adecuado para facilitar su manipulación (con un tamaño máximo limitado a un formato DIN A3) y con relieves convenientes para su exploración háptica.

Por otra parte, se ha de indicar que, por la orientación y uso de este tipo de gráficos, el proceso de diseño y fabricación de los mismos debe ser muy flexible y rápido, lo que implicará rapidez y sencillez en el diseño y fabricación del utillaje o moldes requeridos para su producción, lo cual redundará en la facilidad de hacer cambios y/o variantes y en la reducción de costes.

Antes de iniciar el resto de la exposición del trabajo, se considera conveniente establecer las definiciones de un conjunto de conceptos, algunos de los cuales, en determinados ámbitos, son desconocidos o utilizados inapropiadamente, motivado en ciertos casos por su relativa novedad. Estos son (Gual, Serrano y Mañez, 2015):

- **Prototipado rápido** (*Rapid Prototyping, RP*): Conjunto de técnicas que permiten producir modelos o prototipos físicos de piezas o conjuntos a partir de los datos de un modelo CAD tridimensional, pudiéndose así obtener, en cuestión de horas, prototipos casi idénticos a los modelos diseñados mediante CAD, y consiguiendo una drástica reducción en los tiempos y costes de fabricación. Su finalidad original es la de fabricar piezas modelo o prototipos de piezas.
- **Fabricación Rápida** (*Rapid Manufacturing, RM*): Aplicación de técnicas de prototipado rápido para la obtención directa de piezas para uso final.
- **Fabricación Rápida de Utillaje** (*Rapid Tooling, RT*): Aplicación de técnicas de prototipado rápido para la obtención, directa o indirecta, de utillaje de una forma rápida y más económica que mediante técnicas convencionales, principalmente mediante mecanizado. Estos utillajes (moldes, matrices, etc.) son requeridos por otros procesos para fabricar series de piezas finales.
- **Fabricación aditiva** (*Additive Manufacturing, AM*): Proceso de fabricación o construcción de piezas en las que el material se va depositando poco a poco, conformando así, de un modo progresivo, la geometría de la pieza. Generalmente, la deposición de material se hace por capas, de modo que la geometría se va obteniendo mediante la consolidación de finas capas de material apiladas unas sobre otras de forma sucesiva, por lo que también se las conoce en estos casos como *técnicas de fabricación por capas*. La casi totalidad de las técnicas de prototipado rápido son técnicas de fabricación aditiva por capas.
- **Fabricación sustractiva** (*Subtractive Manufacturing*): Proceso de fabricación en las que el material se va eliminando progresivamente para conformar la geometría de la pieza. Los procesos de mecanizado mediante control numérico (CNC) se consideran técnicas de fabricación

sustractiva, siendo este concepto de aparición reciente y por contraposición al de *fabricación aditiva*.

- **Impresión en 3D:** Término con el que se conocen también las técnicas de fabricación aditiva por capas. Sin embargo, el uso de este término se debe restringir a los casos en los que la técnica constructiva utiliza un cabezal que se desplaza en un plano X-Y a la vez que va depositando un material o un aglutinante para conformar la pieza. Además de que se cumpla este requisito, es conveniente ceñir su uso a aquellos equipos que son de bajo coste.
- **Técnica en base de polvo con proyección de aglutinante (3DPrinting®, 3DP®):** Técnica de fabricación aditiva por capas consistente en que un cabezal similar al de una impresora de inyección de tinta proyecta gotas finísimas de un aglutinante sobre una superficie en la que se encuentra una fina capa de polvo, el cual se consolida en aquellas zonas en las que impacta el aglutinante, conformando así la pieza.
- **Modelado por deposición de hilo fundido (Fused Deposition Modelling®, FDM®):** Técnica de fabricación aditiva por capas consistente en que un cabezal calienta un filamento de termoplástico hasta fundirlo y lo extruye a su través para depositarlo por capas a la vez que se desplaza en el plano para materializar la geometría de la pieza. Dado que se trata de un nombre registrado, es habitual utilizar el término *fabricación por filamento fundido (Fused Filament Fabrication, FFF)*. Se trata de la técnica más extendida hoy en día, y la casi totalidad de los equipos de impresión 3D personales de bajo coste utilizan esta técnica.

## **2. El termoconformado de gráficos tangibles**

Las piezas obtenidas mediante termoconformado de láminas de termoplásticos (proceso que, en adelante, se denominará simplemente «termoconformado»), presentan, como características básicas, un espesor delgado, uniforme y con geometrías siempre abiertas. Vienen a representar, en el caso de los termoplásticos —es decir, plásticos que se reblandecen con la temperatura—, lo que para metales serían las piezas de chapa obtenidas por estampación o embutición.

A continuación, se va a realizar una breve descripción del proceso de termoconformado, indicándose, además, algunas recomendaciones de diseño, y, posteriormente, se comentará su aplicación al caso de los gráficos tangibles.

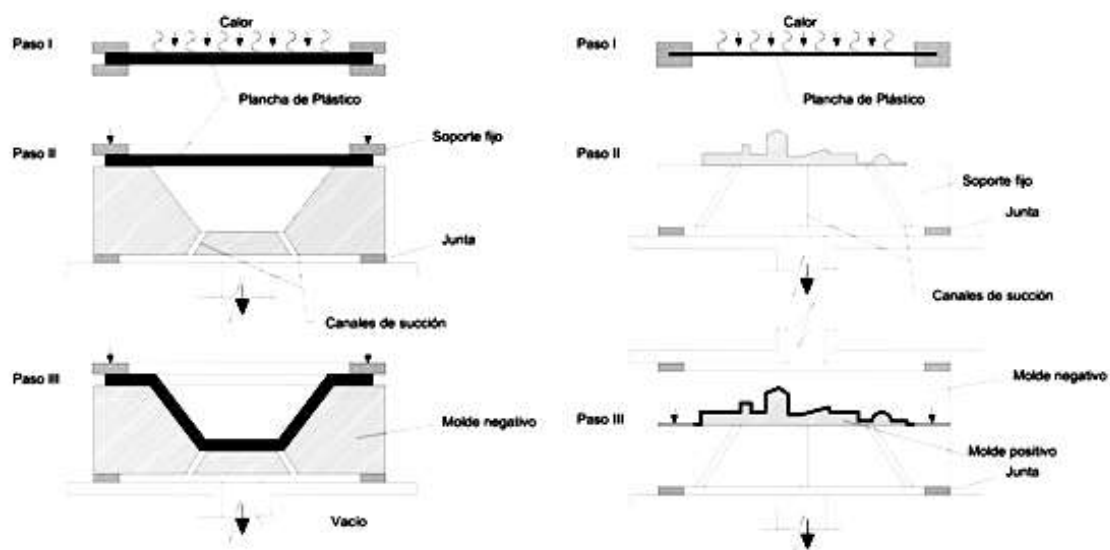
### **2.1. El proceso de termoconformado de láminas termoplásticas**

El proceso de termoconformado de láminas de plástico es un sistema de fabricación muy extendido en diversos sectores industriales. Uno en los que se emplea con mayor profusión es el del envasado de productos no líquidos de uso habitual (principalmente, de alimentación, limpieza y aseo, así como, por

ejemplo, pequeños productos eléctricos y electrónicos), tratándose de un proceso muy económico y completamente adaptado a la producción en serie.

En términos generales, este proceso consiste en dar una forma determinada, conformar una lámina de polímero termoplástico, haciendo que se adapte a un molde o matriz mediante la aplicación de calor y presión. Este proceso se ejecuta en cuatro etapas: 1) aplicación de calor a la lámina de polímero hasta que se reblandezca lo suficiente (hasta alcanzar el estado gomoplástico); 2) descenso de la lámina hasta contactar con el molde conformando un cierre estanco; 3) estirado de la lámina caliente, adaptándose al molde por medio de la acción de vacío o de, conjuntamente, presión y vacío; 4) enfriado de la lámina hasta que mantenga la forma y posterior desmoldeo o retirada del molde. Existen diferentes variantes del proceso, pero la más sencilla es la de vacío. A su vez, esta técnica de vacío presenta dos variantes: la de vacío con molde negativo o hembra, y la de molde positivo o macho. En la Figura 1 se presentan los esquemas del proceso de termoconformado mediante vacío en molde negativo (izquierda) y en molde positivo (derecha), mostrándose las tres primeras etapas del proceso.

*Figura 1. Esquema y etapas del proceso de termoconformado de láminas de termoplástico mediante vacío, mostrándose la variante en molde negativo (izquierda) y en positivo (derecha)*



El termoconformado da como resultado un producto ligero que, dependiendo del termoplástico empleado y del grosor de la lámina, puede tener mayor o menor rigidez o flexibilidad, siendo, por lo tanto, un método versátil en cuanto a las calidades y productos obtenidos, a lo que se ha de añadir la simplicidad, la rapidez y el bajo coste del proceso, así como un coste de los moldes muy inferior a los de inyección de plásticos, de ahí su adaptación y arraigo en la industria.

Sin embargo, presenta ciertos inconvenientes y limitaciones, entre los que cabe destacar:

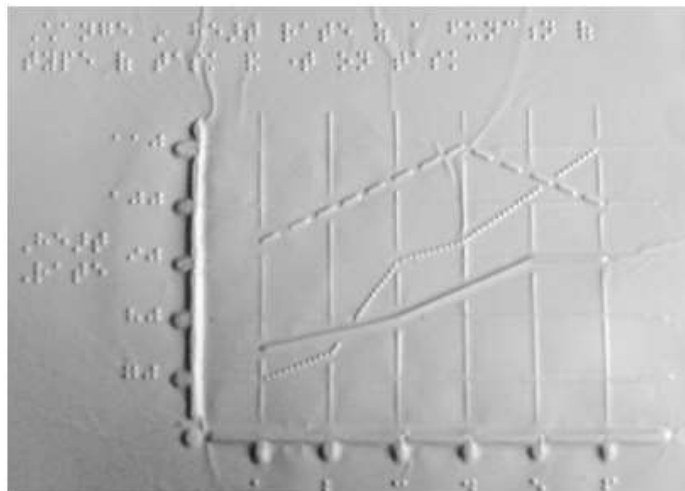
- Baja fidelidad de reproducción de la geometría, en particular, de detalles muy pequeños.
- Bastante menor precisión dimensional que en otros procesos para plásticos.
- Las geometrías siempre tienen que ser abiertas, las cuales no se pueden cerrar ni siquiera parcialmente sobre sí mismas.
- No se pueden definir cambios de espesor en la pieza, la cual, por diseño, es de espesor constante (al igual que en las piezas de chapa metálica).
- Cuando los cambios de geometría, las alturas de salientes o la profundidad de depresiones son grandes, se producen reducciones locales del espesor de la lámina que pueden superar el 50 %.

Respecto a los diseños de piezas que han de ser termoconformadas, es necesario tener presente una serie de recomendaciones de diseño, con el fin de que las piezas se puedan fabricar de forma económica garantizando su calidad. Entre estas recomendaciones cabe resaltar:

- Las láminas para termoconformado serán de un espesor mínimo de 0,05 mm, si bien en la práctica es entorno a 0,1 mm.
- Las piezas, por diseño, serán de espesor constante.
- Las geometrías siempre tienen que ser abiertas, no pudiéndose cerrar ni siquiera parcialmente sobre sí mismas.
- Las paredes laterales no deberán tener salientes ni entrantes, a no ser que sean de muy poco relieve, para facilitar la extracción de la pieza.
- Cualquier cambio de orientación o doblez en la lámina deberá realizarse de un modo suave, y estar dotado de un radio de acuerdo mayor de dos veces el espesor de la lámina.
- La profundidad de la cavidad no deberá superar dos veces su diámetro en el caso de conformado en molde negativo y una vez en el caso del uso de molde positivo.
- Las paredes laterales deberán estar dotadas de ángulos de salida o de despuhle lo más generosos posible, con un valor mínimo de  $\frac{1}{4}^{\circ}$  en caso de molde negativo y de  $1^{\circ}$  si se trata de molde positivo o macho.
- Las tolerancias dimensionales obtenibles son bastante grandes, estando entre un  $\pm 0,8\%$  y  $\pm 1,0\%$  según las condiciones de proceso.

## 2.2. Gráficos tangibles termoconformados

Figura 2. Imagen de gráfico termoconformado para su exploración háptica



Los especialistas y técnicos en rehabilitación emplean el termoconformado en la elaboración de gráficos accesibles a personas invidentes o con baja visión, para que estas puedan acceder a la información gráfica mediante exploración háptica (Figura 2).

El uso de este tipo de gráficos presenta múltiples ventajas:

- Son agradables al tacto.
- La lámina de termoplástico puede reproducir colores mediante impresión de los mismos en la lámina previamente al termoconformado, aunque comúnmente se producen en monocromo.
- El desgaste por el uso es mucho menor que en el caso de gráficos con base de papel.
- No se ven afectados por los líquidos ni absorben suciedad, como sucede con los de base de papel en ambos casos. Al contrario, se pueden lavar muy fácilmente con agua y con múltiples productos de limpieza.
- La resistencia y durabilidad son bastante elevadas.
- Una vez se dispone del molde, se pueden reproducir gran cantidad de copias en poco tiempo.
- El proceso de termoconformado es muy simple para este tipo de producto, no requiriendo personal especializado para el manejo de las máquinas de termoconformado, las cuales son relativamente económicas y de sencillo mantenimiento para el caso de los tamaños y requerimientos de este producto.
- El molde requerido se puede realizar con medios manuales, por ejemplo empleando kits especiales, aunque también se puede utilizar máquinas

fresadoras de CN con las que automatizar el proceso, fundamentalmente, cuando se requieren series largas del mismo gráfico.

- El molde se puede realizar tanto en formato positivo como en su versión negativa (macho frente a hembra). Desde el punto de vista de la fabricación por mecanizado del mismo, es más económico si es negativo; sin embargo, desde el punto de vista de diseño es más sencillo el positivo al presentar menos problemas en el diseño y la realización de las salidas de aire necesarias para que el vacío sea efectivo.

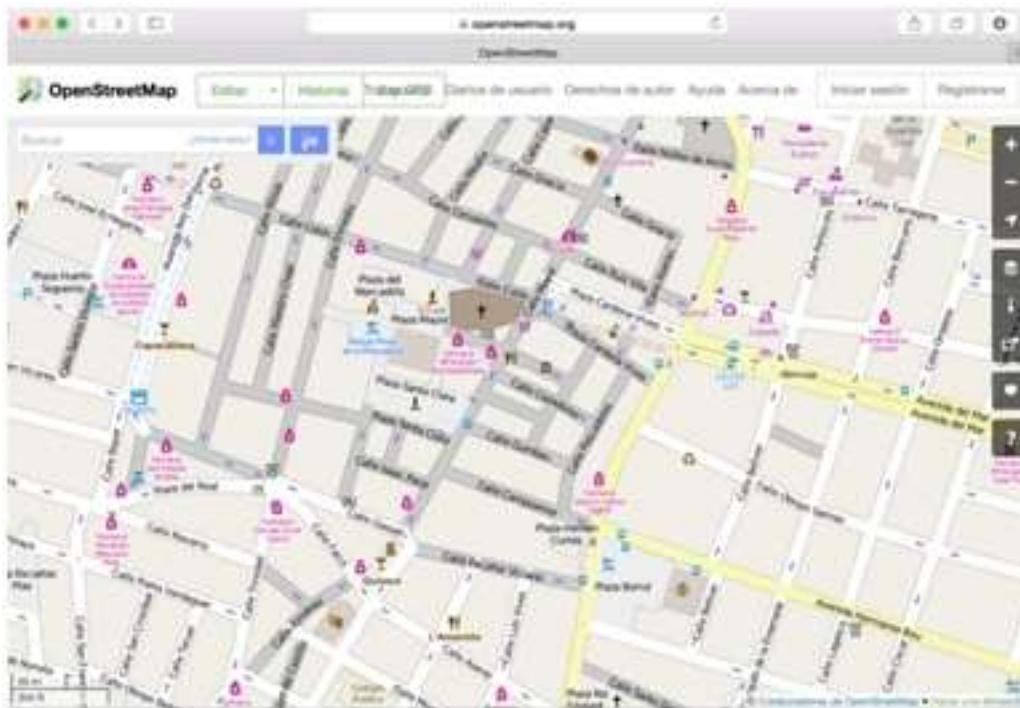
### **3. Gráficos tangibles obtenidos mediante técnicas de prototipado rápido**

Ciertas tipologías de gráficos táctiles pueden obtenerse como producto final mediante técnicas de prototipado rápido.

En este sentido, y centrado en el caso de los gráficos tangibles, las experiencias son numerosas. Los propios autores de este artículo han participado con diferentes contribuciones en publicaciones científicas de alcance internacional, las cuales muestran un interés creciente por la aplicación de estos sistemas al mundo del aprendizaje de las personas con deficiencia visual (Gual, Puyuelo y Lloveras, 2014, 2015a, 2015b; Gual, Puyuelo, Lloveras y Merino, 2012).

Ya en 2009, Voženílek y su equipo realizaron una compilación de las técnicas de impresión 3D aplicadas a planos táctiles (Voženílek Kozáková, Štávová, Ludíková, Růžičková y Finková, 2009). En el año 2012, Brown y Hurst explicaron en un artículo (Brown y Hurst, 2012), la herramienta informática *VizTouch*, la cual permitía generar el relieve digital de los gráficos matemáticos después de introducir la fórmula correspondiente, relieves que, posteriormente, se imprimían físicamente mediante la técnica de prototipado rápido FDM. Unos años más tarde, el equipo de Volpe, en Italia, desarrolló un sistema novedoso, denominado *T-VedO*, que consistía en obtener imágenes pictóricas en relieve, las cuales, posteriormente, podían ser impresas en tres dimensiones mediante impresión 3D (Volpe, Furferi, Governi y Tennirelli, 2014). Ese mismo año, Götzelmann y Pavkovic propusieron un método semiautomático para generar planos táctiles a partir del proyecto de código abierto *OpenStreetMap* (Figura 3), del que se derivaban planos impresos que beneficiarían la autonomía de personas con discapacidad visual (Götzelmann y Pavkovic, 2014).

Figura 3. Imagen de la plataforma cartográfica de código abierto OpenStreetMap, desde la que algunos proyectos científicos basan sus estudios para convertir las imágenes en relieve de manera automática



Otros grupos científicos, como el de Williams, reproducen imágenes de tejidos orgánicos microscópicos en relieve mediante impresión 3D (Williams, Zhang, Lo, Gonzales, Baluch y Duerstock, 2014) a partir de imágenes en escala de grises, con la finalidad de enseñar la histología a usuarios con discapacidad visual. También es posible encontrar estudios y talleres en los que se vincula a jóvenes programadores informáticos invidentes con la impresión en 3D (Kane y Bigham, 2014).

Estos son solo algunos ejemplos del ámbito de los gráficos tangibles que han tenido cierto impacto en el mundo científico, es decir, en la investigación. Si extendiéramos el estudio añadiendo las experiencias en las aplicaciones en maquetas y modelos tridimensionales táctiles, podríamos encontrar unos cuantos ejemplos más.

En cuanto a un ámbito divulgativo y aplicado, las experiencias son más numerosas, si cabe. Conviene destacar, entre ellas, las que ya son una realidad, como la de la empresa italiana de base tecnológica Tooteko, la cual acaba de presentar un producto realizado en impresión 3D que se adhiere al dedo y que, junto, con unos auriculares y unos sensores, permite tener *feedback* auditivo por *Bluetooth* de planos táctiles impresos en 3D mientras se va explorando el gráfico en relieve. Su aplicación en el ámbito de la museística y la orientación es amplio y variado, y sus fundamentos surgen, precisamente, de una tesis doctoral presentada por Serena Ruffato, cofundadora de la empresa Tooteko, en la Universidad de Venecia (Tooteko, 2014).

En Finlandia, la empresa Versoteq, entre otros trabajos con impresión 3D para generar gráficos táctiles, anuncia que ha instalado el primer plano táctil impreso



en 3D a todo color en la ciudad de Espoo (Versoteq, 2015), e invita a que los usuarios lo prueben e introduzcan mejoras, ya que, como ellos comentan, es fácil y rápido imprimir una nueva versión mejorada en el mismo sitio debido a la flexibilidad del sistema (Figura 4).

*Figura 4. Imagen del plano táctil impreso en 3D a todo color por la empresa Versoteq (autor: Rauno Huttunen, fuente: <http://versoteq.com>)*



En España, la técnica denominada Didú, desarrollada por Estudios Durero, en la que la ONCE ha participado desde las primeras fases, ha permitido imprimir digitalmente en relieve fotografías y reproducciones de cuadros a gran tamaño (Estudios Durero, 2014), dando fe de la efectividad de este sistema el propio Museo del Prado. Por otro lado, también en España, desde el proyecto de código abierto RepRap en Barcelona se han desarrollado ciertas experiencias para realizar planos táctiles de bajo coste mediante el sistema que allí se desarrolla (RepRapBCN, 2014).

Otros proyectos se realizan desde centros universitarios, y en ellos los planos de los campus son producidos en relieve mediante impresión 3D para su percepción háptica por parte de estudiantes con discapacidad visual. Este es el caso de la University of Central Missouri en EE. UU., que, desde su Office of Accessibility Services, ha generado un plano del campus en colaboración con estudiantes, o el diseñado por el Center for Inclusive Design and Environmental Access en la Universidad de Buffalo, en colaboración con la empresa de material háptico Touch Graphics, Inc. (Hsu, 2014).

### **3.1. Utilización de la fabricación aditiva como herramienta de *Rapid Tooling***

Como se aprecia en los ejemplos indicados en el apartado anterior, realizar gráficos táctiles para personas con discapacidad visual mediante impresión 3D

es una actividad posible y tratada ya en bastantes estudios. Y, además, algunas empresas emergentes continúan el hilo conductor de la impresión 3D para mejorar los recursos comunicativos orientados a personas con discapacidad visual.

Una característica común a todas estas experiencias es que son ideales para realizar piezas únicas o series muy cortas de piezas. Sin embargo, son pocos los trabajos que se hayan centrado en aplicar estas técnicas como herramienta de *Rapid Tooling*, es decir, para la obtención de los moldes o utillajes necesarios para generar piezas finales que puedan servir para ampliar las series de producción y reducir sustancialmente el coste de las mismas.

En realidad, el equipo de Zhang, Richardson y Surana, de la Universidad de Maryland en EE. UU., ya trabajaron este enfoque a mediados de los años noventa (Zhang, Richardson, Surana, Dwornik y Schmidt, 1996), y escogieron como caso de estudio aplicado un molde de termoconformado, producido mediante mecanizado de control numérico, que reproducía las partes del corazón humano para su exploración háptica. Estos científicos realizaron un estudio de costes para la obtención del citado molde, comparando técnicas de fabricación aditiva con técnicas sustractivas convencionales (mecanizado). Así, los costes estimados obtenidos fueron de 2265 dólares para el caso del uso de una técnica aditiva —la estereolitografía (SLA)—, frente a 2880 dólares en el caso del molde obtenido mediante mecanizado CNC. De este mismo grupo, y también en el ámbito de la medicina, en 1997 se derivó una tesis doctoral que estudió la posibilidad de emplear las técnicas de fabricación aditiva para la obtención de moldes destinados a fabricar piezas mediante colada de resinas en cámara de vacío. Uno de los aspectos que se destacaba en este profundo trabajo eran sus ventajas económicas (Surana, 1997), debido a su menor coste.

Así, el empleo de las técnicas aditivas como herramientas para el *Rapid Tooling* también ha tenido su espacio en los antecedentes científicos, aunque con un tratamiento notablemente inferior al del empleo de estas mismas técnicas para la fabricación directa de gráficos táctiles finales.

Más allá de aplicaciones en el mundo de los gráficos táctiles, como la mostrada anteriormente por el equipo de Zhang, el ámbito clínico y de la ingeniería son pioneros en utilizar la impresión 3D en la obtención moldes y luego termoconformar con ellos. Así, cabe destacar el trabajo realizado por Chimento, Highsmith y Crane (2011), un equipo multidisciplinar compuesto por ingenieros y un especialista en rehabilitación clínica, que analizaron las posibilidades de emplear la técnica de fabricación aditiva del tipo 3DP para obtener moldes para termoconformar prótesis médicas, destacando la flexibilidad que implica este sistema de fabricación. También en el ámbito clínico, recientemente, el equipo de Jiménez, Romero, Domínguez y Espinosa (2015) de la Universidad de Comillas de Madrid y de la UNED, en España, han trabajado la posibilidad de realizar prótesis dentales termoconformadas, utilizando técnicas de prototipado rápido para fabricar los moldes de estas piezas dentales.

También en esta línea de trabajo, respecto a emplear este tipo de técnicas para termoconformar productos finales, cabe destacar el estudio de Junk y Tränkl

(2011), quienes destacan el empleo de la técnica 3DP para reducir tiempos y sus ventajas económicas respecto a métodos alternativos basados en el empleo de tecnologías láser.

#### **4. Estudio experimental**

De todo lo expuesto anteriormente se deriva el interés en generar un breve estudio preliminar relativo a las posibilidades de utilizar las técnicas de fabricación aditiva de bajo coste para la realización de moldes para termoconformar gráficos tangibles, el cual se expone en el presente trabajo aplicando un par de técnicas de fabricación. Las dos técnicas utilizadas han sido la impresión 3D con base de polvo (3DP) y la de deposición de hilo de fundido (FDM), ambas asequibles económicamente, en particular la segunda.

Se ha empezado por el estudio sobre una plantilla «tipo» con sus elementos en relieve, y que contiene los principales «ingredientes» de un gráfico tangible, incluyendo obviamente el código de lectoescritura braille.

##### **4.1. Metodología**

Para la realización de los estudios objeto del presente trabajo se han planteado las siguientes tareas bajo una dinámica experimental en la que se han derivado resultados y análisis, tanto cuantitativos como cualitativos.

- Elaboración de plantillas de moldes con elementos en relieve de diversa naturaleza: gráficos elevados, puntos, líneas, texturas y volúmenes, y código de lectoescritura braille. Se trata de elementos que se emplean normalmente en la composición de gráficos tangibles. Los moldes se elaboran tanto en configuración positiva, como negativa.
- Construcción directa de los moldes de las plantillas a utilizar (*Direct Rapid Tooling*), mediante las técnicas 3DP y FDM (usando como materiales poliméricos en este último caso el PLA y el ABS).
- Estudio de los modelos obtenidos, evaluando: geometría, dimensiones, reproducibilidad, rugosidad/aspereza y aspecto. Para ello, se ha realizado una inspección visual cualitativa y la obtención valores de mediciones de diferentes características mediante el empleo de un reloj comparador y de un proyector de perfiles (Figura 5).

Figura 5. Medición, mediante proyector de perfiles, de las geometrías de los moldes



- Termoconformado de láminas utilizando como moldes los modelos obtenidos anteriormente. Las láminas utilizadas para termoconformar han sido las de PVC de 0,2 mm de espesor.

Figura 6. Equipos de conformado utilizados: a) Máquina termoconformadora; b) Equipo de fabricación aditiva mediante tecnología 3DP, modelo Zprinter 310 plus de ZCorporation



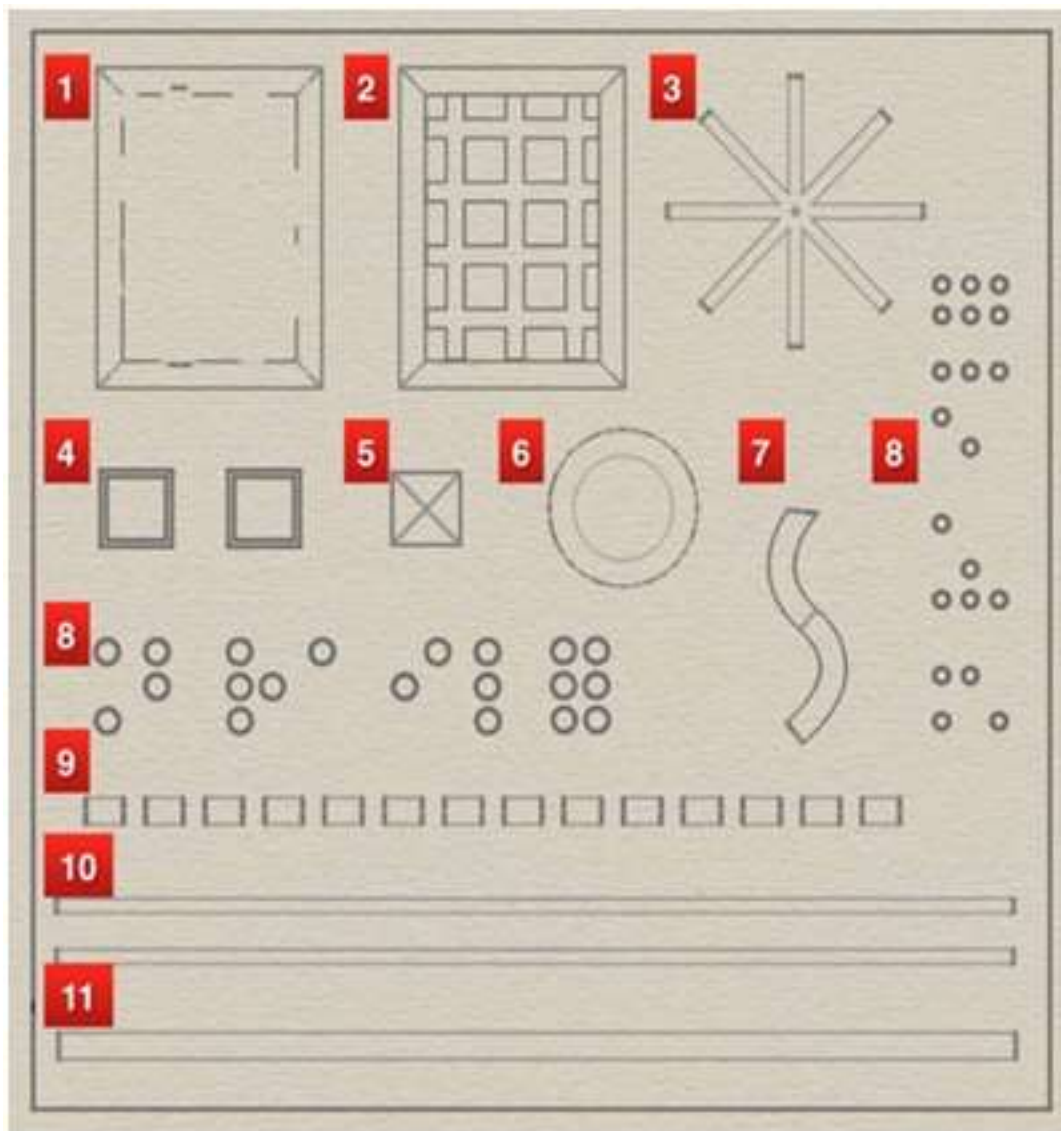
#### 4.2. Diseño de geometrías o plantillas para los moldes

Siguiendo estos aspectos, se han diseñado varias plantillas con el fin de fabricar moldes a partir de ellas y realizar una serie de pruebas experimentales con ellos.

En primer lugar, una plantilla cuadrada de 85 mm de lado (Figura 7) con la que se pretende observar la fidelidad geométrica, fundamentalmente mediante la observación de su vista de proyección en planta, en la reproducción mediante las dos técnicas de *Additive Manufacturing* seleccionadas (3DP y FDM), así como su comportamiento como molde para termoconformado. En este sentido, se han diseñado dos moldes, uno en positivo (macho) y su correspondiente en negativo (hembra).

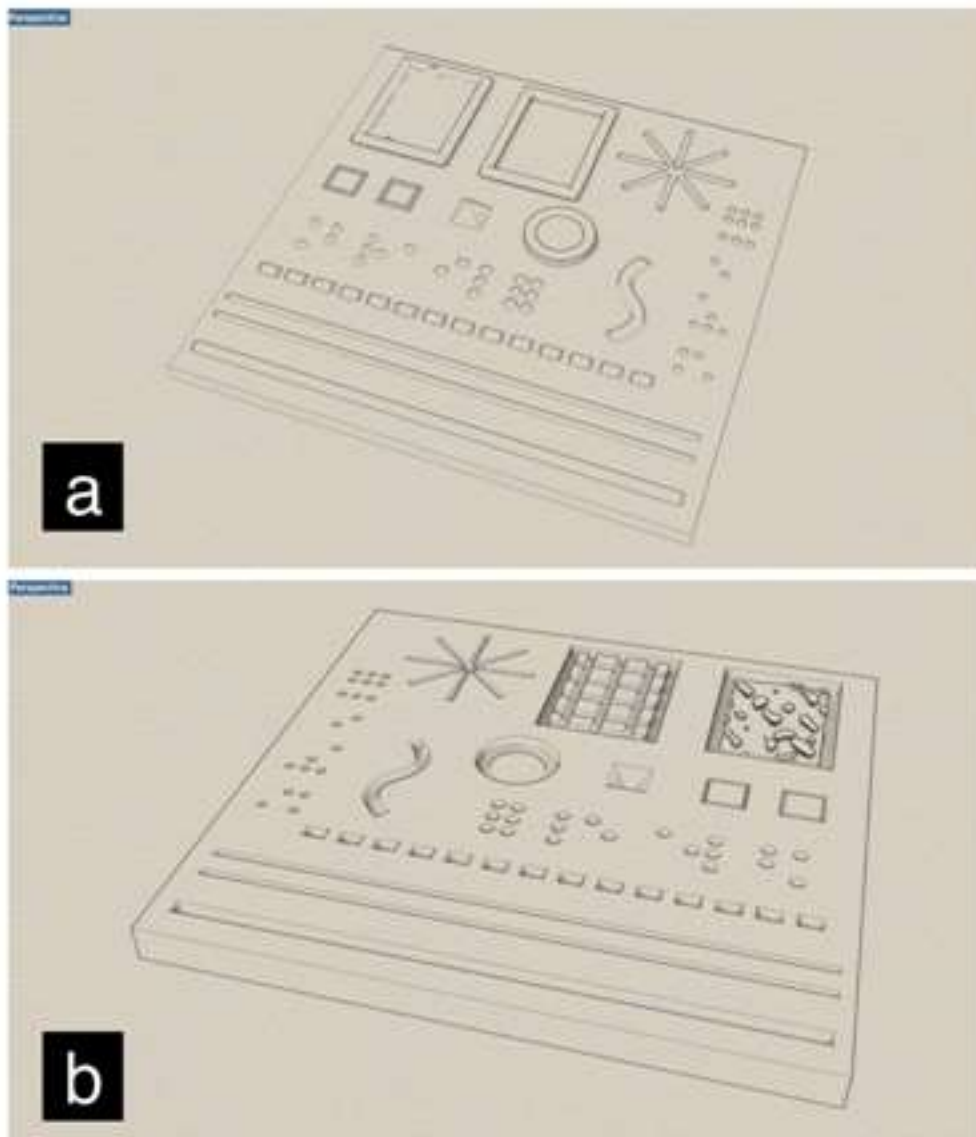
La plantilla cuadrada presenta diferentes elementos táctiles de diseño susceptibles de ser empleados en un gráfico tangible, elementos puntuales, elementos lineales, volúmenes, texturas y código de lectoescritura braille. Según se indica en la Figura 7, se ha seguido una numeración del 1 al 11 para cada elemento o grupo de elementos táctiles. Así se aprecian, en primer lugar, un par de texturas, la primera irregular (1) y la segunda regular (2). Se trata de dos tipos de texturas comúnmente empleadas en planos táctiles y fácilmente discriminables entre sí al tacto. La numeración 3 representa un grupo de líneas rectas en diferentes ángulos, que muestran situaciones bastante comunes en el diseño de gráficos tangibles, principalmente en planos de movilidad, es decir, muestran diferentes inclinaciones de línea y, al menos, una intersección entre ellas. Las numeraciones 4, 5 y 6 presentan una serie de tres elementos puntuales difícilmente confundibles al tacto entre ellos: cuadrados en diferentes alturas de relieve (4), una pirámide con un alto contraste al tacto debido a su altura (5) y un elemento circular de gran tamaño fácilmente legible con la yema de los dedos (6). El elemento táctil 7 representa una línea en forma de «s», cuya finalidad es expresar el concepto de curvatura, el cual se emplea normalmente en la traducción al tacto de contornos pictóricos de obras de arte. El grupo 8 representa una serie de puntos pertenecientes al código de lectoescritura braille según las dimensiones máximas y mínimas recomendadas. Por último, el grupo de elementos 9 y 10 muestran un grupo de tres líneas rectas fácilmente discriminables entre sí y de un uso muy común en planos cartográficos: una línea discontinua (9), una línea doble (10) y, finalmente, una línea de mayor relieve en altura y espesor (11). Los elementos en relieve empleados han sido diseñados siguiendo las recomendaciones para su correcta percepción háptica. Principalmente, en lo referente a alturas de relieve, distancias entre líneas, anchos de estas, separaciones en líneas dobles, etc. En este sentido, se han tomado como referencia estudios contrastados en la literatura, principalmente la popular guía de Polly Edman (Edman, 1992), documentación de la Comisión Braille Española (Comisión Braille Española, 2012) y de The Braille Authority of North America con la Canadian Braille Authority (Braille Authority of North America y Canadian Braille Authority, 2011), así como la experiencia de los autores con usuarios con discapacidad visual en trabajos experimentales (Gual, 2013).

Figura 7. Esquema en planta de la plantilla diseñada con la numeración de los diferentes elementos en relieve propuestos



En la siguiente figura se aprecia la imagen de las plantillas de los moldes diseñados, tanto su versión en positivo como en negativo (Figuras 8a y 8b, respectivamente), en volumen digital realizados con técnicas de Diseño Asistido por Ordenador, mediante el software 3D *Rhinoceros*. Se ha diseñado un entramado inferior nervado que facilita el paso del aire en la succión para generar el vacío, y que, además, permite reducir costes respecto de la versión maciza en un 23 % por ahorro de tiempo y material.

Figura 8. Imagen de la plantilla teórica en 3D, vista en perspectiva, realizada mediante el programa de diseño de superficies NURBS en 3D denominado Rhinoceros. (a) Molde en positivo, y (b) molde en configuración negativa. Ambas imágenes corresponden al archivo digital en perspectiva en formato STL para impresión posterior

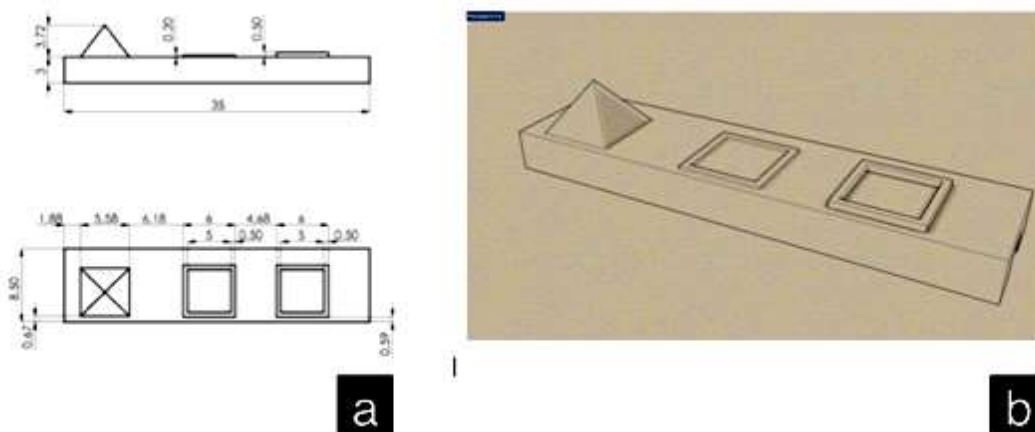


En segundo lugar, a partir de elementos ya empleados en la plantilla anterior, se han diseñado un par de plantillas longitudinales de 8,5 mm de ancho que representan elementos puntuales y en volumen (Figura 9). Estas plantillas se han usado para analizar en detalle la geometría representada en la sección de los perfiles obtenidos en las diferentes pruebas realizadas con ellas. La necesidad de las mismas surgió por el hecho de que no podía constatarse mediante el análisis geométrico de la planta, ni tampoco mediante el uso del reloj comparador, siendo necesaria la utilización de un proyector de perfiles.

En este sentido, se han diseñado un par de piezas, denominadas Pieza 2.1 y Pieza 2.2. La pieza 2.1 (Figura 9) incluye elementos táctiles puntuales y volumétricos, consistentes en una pirámide —que puede ser fácilmente perceptible al tacto por su sencillez geométrica y por contraste de altura— y dos

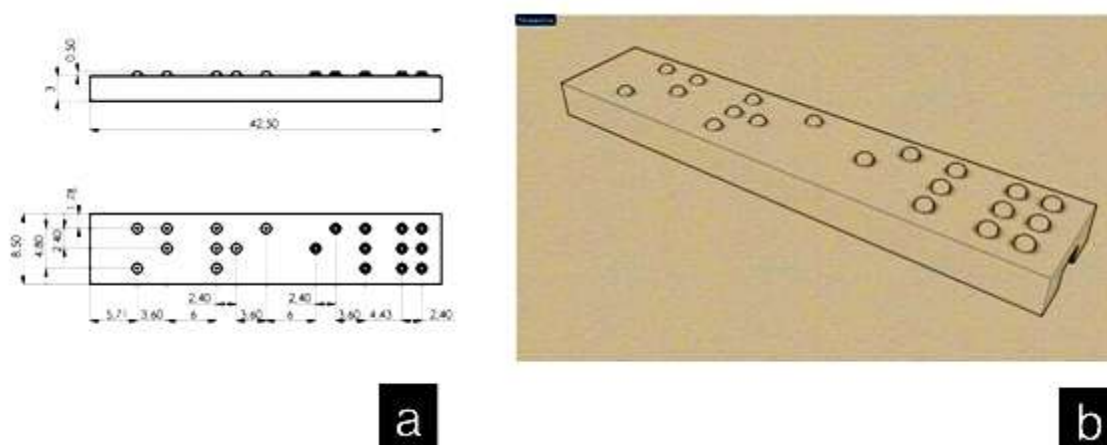
contornos de cuadrados en relieve de diferentes alturas (0,2 mm y 0,5 mm, respectivamente). Como se ha explicado anteriormente, esta pieza se emplea a modo de probeta sobre la que comparar los perfiles obtenidos desde su sección.

Figura 9. (a) Imagen del plano de la Pieza 2.1 con dimensiones de la plantilla longitudinal, en la que se aprecia su geometría en planta y alzado; (b) vista de la pieza en perspectiva correspondiente al archivo en formato STL para imprimir



La Pieza 2.2 (Figura 10) representa una serie de puntos en código braille con una altura de 0,5 mm, resueltos en dos tipos de geometrías diferenciadas, una mediante casquetes esféricos y otra con cilindros con aristas superiores redondeadas.

Figura 10. (a) Plano de la Pieza 2.2 en la que se aprecia su geometría en planta y alzado y sus dimensiones; (b) vista de la pieza en perspectiva en formato STL para imprimir



## 5. Resultados y análisis

A continuación, se exponen los principales resultados obtenidos en la parte experimental del estudio en el que se comparan las dos técnicas de fabricación aditiva utilizadas y mencionadas con anterioridad (FDM y 3DP). En ambas técnicas se ha empleado la máxima calidad permitida por las máquinas usadas,



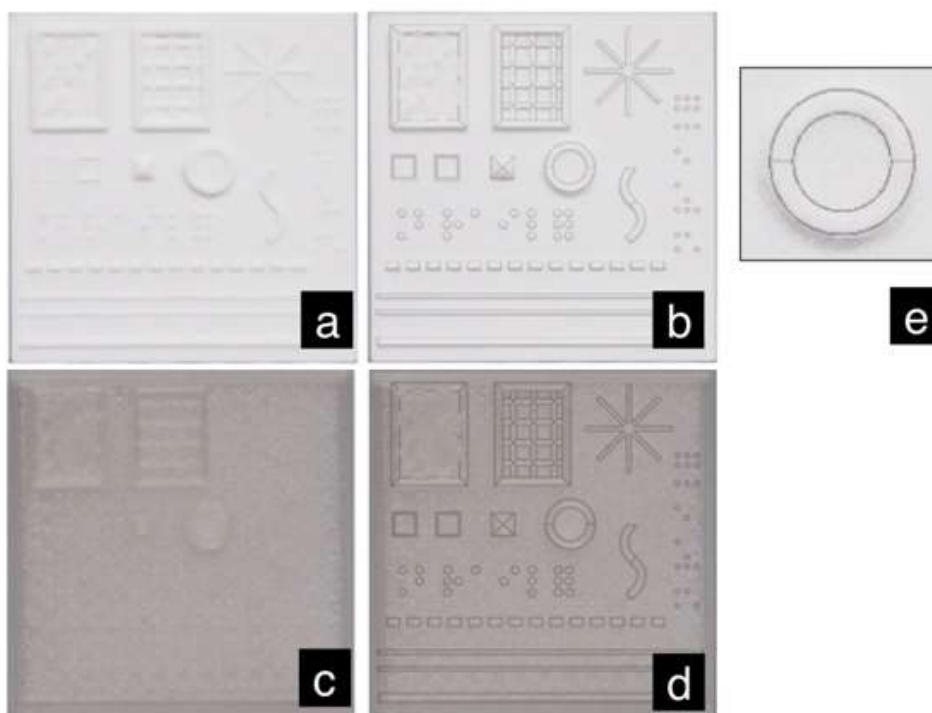
correspondiente a un espesor de capa de 0,125 mm. El material utilizado para el estudio ha sido polvo en base yeso para la técnica de 3DP y plástico PLA (ácido poliláctico) para la FDM.

En primer lugar, se muestra el estudio de representación geométrica de los moldes para termoconformar obtenidos mediante las técnicas 3DP (positivo y negativo) y FDM (solo positivo). En segundo lugar, se presentan los resultados obtenidos de la medición de las alturas mediante reloj comparador de las piezas molde fabricadas con ambas técnicas. En tercer lugar, se muestran las secciones de los perfiles de la pieza y, en último lugar, se presentan los resultados de las mediciones realizadas sobre un conjunto de gráficos táctiles obtenidos por termoconformado utilizando los moldes anteriores.

### 5.1. Estudio de representación de la geometría en vista en planta

Tras realizar una inspección visual y superponer la fotografía ortogonal —corregida en sus distorsiones ópticas por el efecto de la cámara— del molde obtenido con la plantilla teórica (Figura 11), el estudio muestra que ambas técnicas representan correctamente las geometrías teóricas diseñadas bajo el sistema CAD, apreciándose tan solo una muy ligera desviación en la realización del elemento puntual de base circular (Figura 11e) en el caso del molde construido con 3DP, desviación que, por otro lado, es imperceptible al tacto. La versión del molde en negativo mediante FDM no pudo realizarse, tal y como se justificará más adelante.

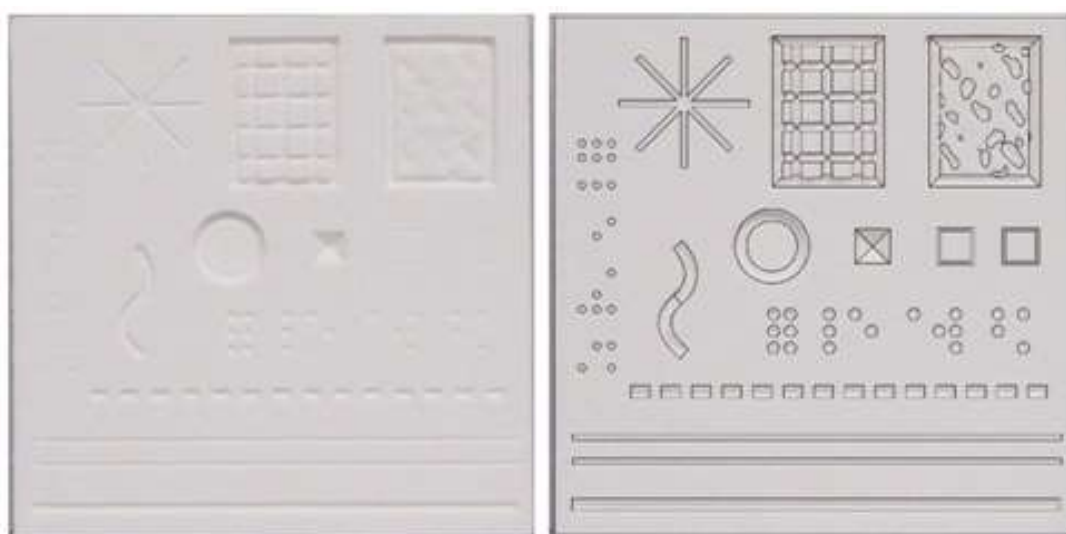
*Figura 11. Fotografías con las vistas en planta de los moldes positivos impresos en 3D: (a) molde obtenido mediante la técnica 3DP; (b) superposición de la geometría teórica diseñada sobre el molde en 3DP; (c) molde obtenido mediante la técnica FDM; (d) superposición de la geometría teórica diseñada sobre molde FDM; (e) detalle del círculo en el que se aprecia un pequeño defecto, casi imperceptible, en su parte inferior derecha*



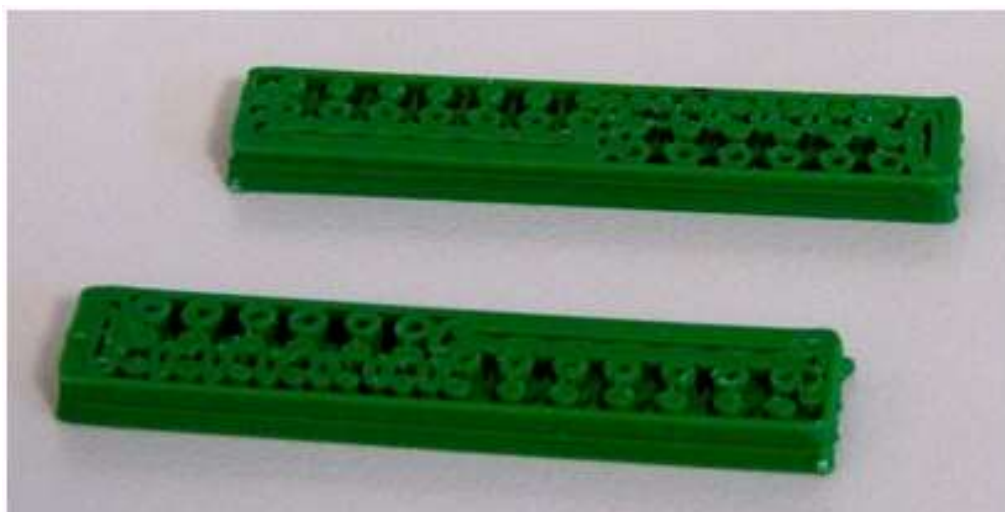
Conviene destacar que la reproducción en planta es buena en ambos casos y muy fiel a la teórica, aunque es preciso mencionar notables diferencias en lo referente a su rugosidad, siendo que las piezas impresas en 3DP presentan una superficie rugosa debido al polvo, y las de FDM, además de cierta rugosidad, muestran los conductos del hilo perceptibles al tacto y claramente observables visualmente.

Además, se realizó el estudio de representación en molde negativo de la pieza plantilla producida mediante 3DP, como se aprecia en la imagen (Figura 12). En ella no se aprecian desviaciones notables en la geometría, produciéndose una reproducción correcta de esta.

*Figura 12. Imagen del molde en negativo (izquierda) y su superposición fotográfica con la geometría teórica diseñada (derecha)*



*Figura 13. Imagen de pieza FDM de prueba en la que se aprecia la poca precisión de este sistema para reproducir geometrías en negativo, pues la pieza diseñada era una superficie plana que disponía de tres filas de agujeros. Esto es debido a que al haber una depresión, el equipo primero conforma el perímetro de dicha depresión y, posteriormente, rellena los huecos entre depresiones, pero si el detalle es muy pequeño, entonces el grosor del hilo depositado es demasiado grande y no cabe en los huecos libres entre depresiones o agujeros*



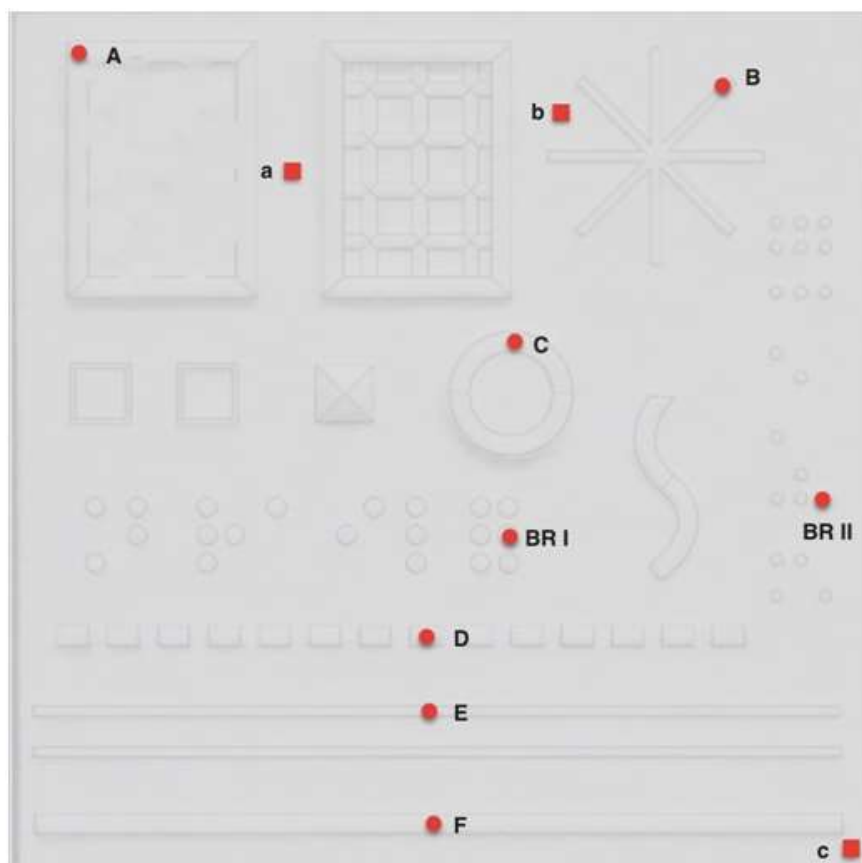
Adicionalmente, se realizaron pruebas previas que demostraron la dificultad de realizar moldes en negativo con la técnica de FDM. En este caso, se diseñó y fabricó un pequeño molde negativo que contuviera los puntos del código de lectoescritura braille. Sin embargo, los resultados de este mostraron una nula fidelidad en la reproducción en negativo, como se aprecia en la imagen (Figura 13), hecho que motivó el descarte de la alternativa de realizar moldes en negativo mediante la técnica FDM.

Consecuentemente, los termoconformados de prueba realizados con molde negativo se llevaron a cabo sobre moldes fabricados en 3DP, técnica notablemente más adecuada para este caso.

## 5.2. Medición de alturas de los relieves de las piezas molde fabricadas mediante las técnicas 3DP y FDM

Para el estudio del grado de reproducción de las alturas de los relieves presentes en las piezas fabricadas según el diseño de la plantilla cuadrada, se ha procedido a tomar medidas sistemáticas de las alturas de diversos puntos, según se muestra en la imagen de la Figura 14. Los puntos a y b representan la cota 0 de referencia, y el resto de puntos se toman sobre cotas máximas de diversos elementos en relieve, líneas, puntos, texturas y código de lectoescritura braille. Para la realización de las medidas se ha utilizado un reloj comparador sobre mármol.

*Figura 14. Imagen de los puntos de la plantilla cuadrada sobre los que se ha realizado la medición de la altura de los elementos en relieve*



Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 1, en la que se exponen las medidas correspondientes a cada punto medido en las plantillas cuadradas realizadas mediante las técnicas de fabricación aditiva FDM y 3DP, así como la dimensión teórica que deberían tener y sus respectivas diferencias en valores absolutos. De estos datos se obtiene la media de cada caso y su desviación respectiva.

*Tabla 1. Medidas en altura correspondientes a los puntos indicados realizadas sobre los moldes fabricados en 3DP y FDM, y sus desviaciones en valor absoluto respecto de las teóricas. Mediciones realizadas con reloj comparador sobre mármol*

<b>Medidas en altura de la plantilla 1</b> (medidas en milímetros)					
<b>Punto de medida</b>	<b>FDM</b>	<b>3DP</b>	<b>Teórica</b>	<b><math>\Delta 1 = \text{FDM} - \text{Teórica}</math></b>	<b><math>\Delta 2 = \text{3DP} - \text{Teórica}</math></b>
<b>a</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>b</b>	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01
<b>c</b>	0,14	0,02	0,00	0,14	0,02
<b>A</b>	1,80	1,64	1,70	0,10	0,06
<b>B</b>	0,25	0,55	0,50	0,25	0,05
<b>C</b>	1,63	1,98	1,94	0,31	0,04
<b>D</b>	0,91	0,99	1,00	0,09	0,01
<b>E</b>	0,22	0,53	0,50	0,28	0,03
<b>F</b>	0,74	0,99	1,00	0,26	0,01
			<b>Media</b>	<b>0,16</b>	<b>0,03</b>
			<b>Desviación típica</b>	0,12	0,02

Así, como se aprecia en la Tabla 1 se obtiene que la técnica 3DP es más precisa que la de FDM, ya que su media de desviación respecto a la dimensión teórica es mayor (0,16 en FDM, frente a 0,03 en 3DP) y también presenta una mayor desviación típica (0,12 en FDM, frente a 0,02 en 3DP), hecho que indica una mayor fiabilidad en la técnica de impresión 3DP basada en polvo respecto

a la de deposición de hilo fundido. En cualquier caso, los datos obtenidos muestran errores siempre muy por debajo del milímetro, aspecto que desde la óptica visual es imperceptible, y desde la perspectiva del tacto aún lo es más. Por lo tanto, ambas técnicas presentan una buena reproducción en altura.

Respecto a los datos obtenidos al medir la altura del código braille, de altura teórica de 0,5 mm, se aprecia en la Tabla 2 que las medidas obtenidas en altura mediante la técnica 3DP es, de nuevo, más precisa que la técnica de FDM, con un valor medio estimado de 0,44 mm respecto a 0,37 mm de la técnica de FDM. Se realizaron hasta 6 medidas sobre la cúspide de los puntos braille, destacándose que, en ningún caso, los valores superaron la altura prevista de 0,5 mm.

*Tabla 2. Medidas de las alturas de los puntos de código braille en los moldes realizados en FDM y en 3DP. Mediciones realizadas con reloj comparador sobre mármol*

<b>Medidas de altura del código braille en la plantilla 1 (mediadas en mm)</b>			
<b>Medidas del código Braille en su cúspide</b>	<b>FDM</b>	<b>3DP</b>	<b>Teórica</b>
Medida 1	0,29	0,53	0,50
Medida 2	0,33	0,52	0,50
Medida 3	0,34	0,53	0,50
Medida 4	0,40	0,30	0,50
Medida 5	0,43	0,42	0,50
Medida 6	0,45	0,33	0,50
<b>Media</b>	<b>0,37</b>	<b>0,44</b>	
<b>Desviación típica</b>	<b>0,06</b>	<b>0,10</b>	

### 5.3. Mediciones relativas al perfil de las piezas 2.1 y 2.2

En la pieza 2.1 (Figura 9) se representaban una pirámide y dos contornos de cuadrados en relieve a diferentes alturas (0,2 y 0,5 mm). La pirámide tenía una dimensión teórica en altura de 3,72 mm y una base cuadrada de 5,58 mm de lado. Se midieron estas dimensiones con ayuda de un proyector de perfiles mediante uso de coordenadas relativas de las reproducciones en 3DP y FDM.

Como se aprecia en las tablas (Tablas 3 y 4), ambas técnicas han tenido un buen comportamiento a la hora de reproducir las geometrías en términos de altura.

*Tabla 3. Tabla con los datos obtenidos en las mediciones realizadas en la pirámide. Mediciones realizadas con el proyector de perfiles*

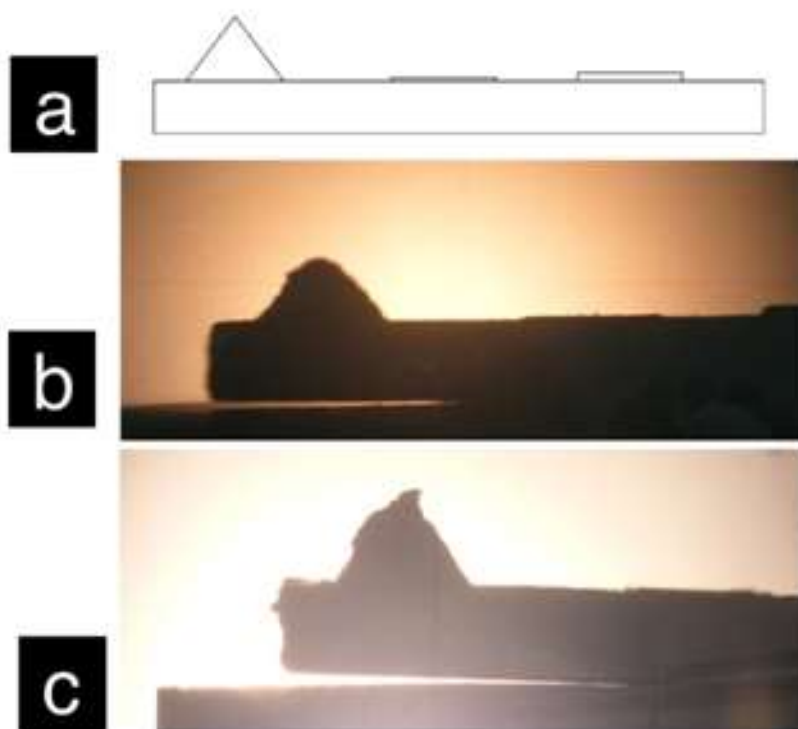
<b>Pirámide</b>	<b>Teórico</b>	<b>FDM</b>	<b>3DP</b>	<b><math>\Delta 1 = \text{FDM} - \text{Teórica}</math></b>	<b><math>\Delta 2 = \text{3DP} - \text{Teórica}</math></b>
<b>Altura</b>	3,72	2,95	2,95	0,77	0,77
<b>Anchura base</b>	5,58	5,70	6,18	-0,12	-0,60

*Tabla 4. Tabla con los datos obtenidos con las mediciones realizadas en las alturas de los cuadrados. Mediciones realizadas con el proyector de perfiles*

<b>Altura teórica cuadrado</b>	<b>FDM</b>	<b>3DP</b>	<b>Diferencia FDM</b>	<b>Diferencia 3DP</b>
0,20	0,21	0,17	0,01	-0,03
0,50	0,45	0,51	-0,05	0,01

Ahora bien, las imágenes extraídas de esta técnica metrológica de medición (Figura 15) indican que la técnica de FDM reproduce peor la geometría en altura en el caso de la pirámide (Figura 15c), y que su base tiende a deformarse debido a las tensiones térmicas producidas en el proceso de deposición de hilo, si bien se ha de indicar que algunos materiales empleados con este sistema de prototipado son más sensibles a este fenómeno, como es el caso del ABS. Las vistas ampliadas también ponen de manifiesto una reproducción de la geometría poco exacta, aunque esta falta de exactitud es imperceptible al tacto. La punta de la pirámide aparece redondeada en el caso de la pieza reproducida en 3DP, y en el caso de la pieza resuelta en FDM se aprecia una clara desviación del vértice en la dirección de avance del hilo.

Figura 15. Imagen del perfil de la pieza 2.1: (a) alzado; (b) vista del proyector de perfiles correspondiente a la pieza ejecutada en 3DP; (c) vista del proyector de perfiles correspondiente a la pieza ejecutada en FDM



Por otra parte, en la Pieza 2.2 (Figura 10), en la que se reproducía código braille, nuevamente se aprecia una reproducción en altura ( $h$ ) y diámetro ( $a$ ) de las piezas obtenidas por ambas técnicas (Tabla 5). Curiosamente, la técnica 3DP obtiene para este caso unos valores menos satisfactorios en cuanto a las dimensiones del diámetro, hecho que podría indicar ciertos problemas a la hora de reproducir geometrías circulares o, incluso, algunos problemas menores de calibración de la máquina empleada, tal como se ha visto anteriormente.

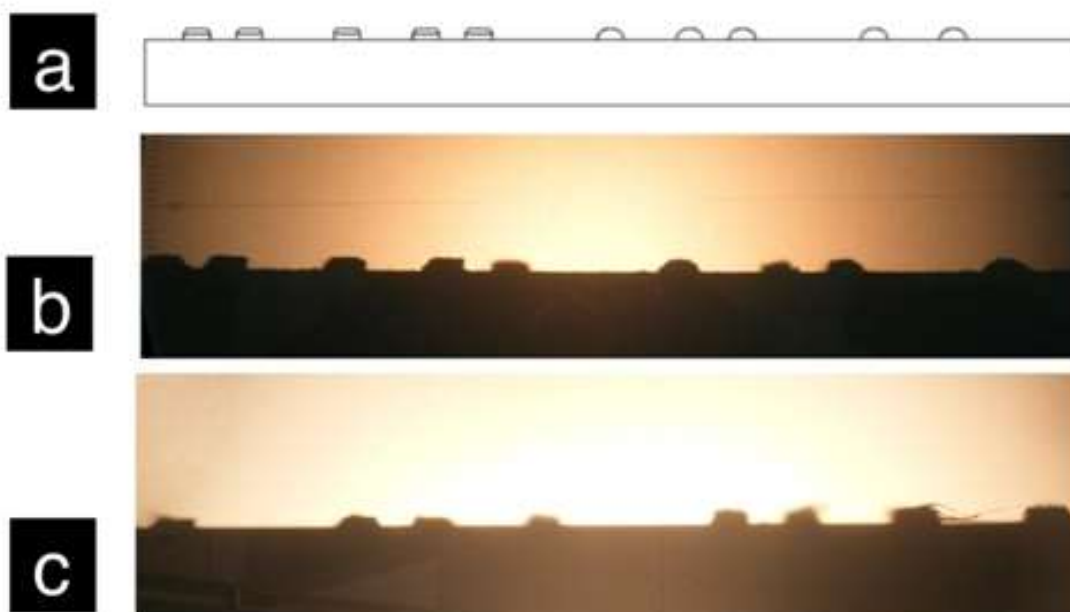
Tabla 5. Tabla con los datos obtenidos al medir la altura ( $h$ ) y diámetro ( $a$ ) de los puntos braille en la Pieza 2.2. Mediciones realizadas con el proyector de perfiles

Medidas	FDM		3DP		Teóricas	
	$h$	$a$	$h$	$a$	$h$	$a$
Medida 1	0,49	1,39	0,49	1,59	0,5	1,2
Medida 2	0,48	1,36	0,50	1,50	0,5	1,2
Medida 3	0,32	1,24	0,50	1,55	0,5	1,2

	FDM		3DP		Teóricas	
Medida 4	0,33	1,40	0,46	1,55	0,5	1,2
<b>Media</b>	<b>0,41</b>	<b>1,35</b>	<b>0,49</b>	<b>1,55</b>		
<b>Desviación típica</b>	<b>0,09</b>	<b>0,07</b>	<b>0,02</b>	<b>0,04</b>		

La Figura 16 muestra la sección de la Pieza 2.2 ampliada por el proyector de perfiles. En ella se aprecia la irregularidad de la altura de los puntos respecto a la geometría teórica. La reproducción de los puntos braille en la técnica FDM (Figura 16c) es geoméricamente más irregular en su sección, hecho que indica una peor ejecución del código de lectoescritura braille de este método de fabricación aditiva respecto al de 3DP.

*Figura 16. Imagen en sección de la Pieza 2.2, con la ampliación del perfil, en la que se aprecia el alzado teórico (a); la proyección del perfil en la técnica 3DP (b), y su correspondiente sección en la técnica FDM, habiéndose obtenido (b) y (c) mediante el proyector de perfiles*



#### 5.4. Piezas termoconformadas con moldes obtenidos mediante fabricación aditiva

En las secciones anteriores se ha realizado un breve estudio de las piezas obtenidas, comparando las dos técnicas de fabricación aditiva utilizadas (FDM y 3DP). De los resultados obtenidos se deduce un comportamiento similar a nivel geométrico entre ambas técnicas, pero una peor reproducción del código braille en el sistema FDM y también de las piezas en negativo.



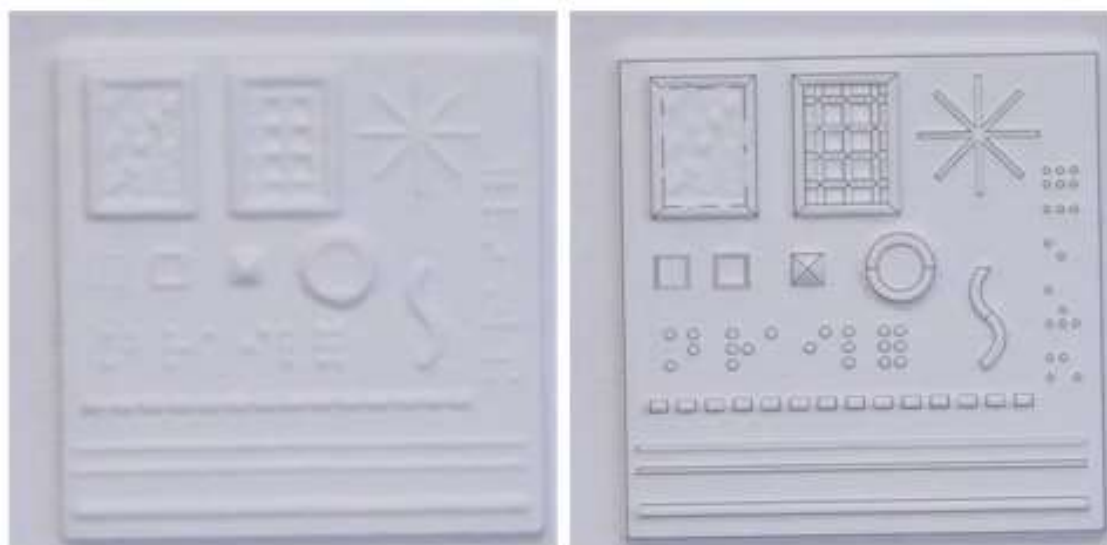
De este último hecho se deriva que, finalmente, se haya decidido realizar las pruebas de termoconformado, tanto en configuración positiva y negativa, únicamente con los moldes fabricados con la técnica de 3DP. Los moldes se emplearon en crudo, es decir, tal y como se imprimieron, sin tener tratamiento posterior de infiltrado para endurecer su superficie y/o mejorar su resistencia.

Inicialmente se realizaron una serie de pruebas previas con la máquina termoconformadora para ajustar las condiciones de temperatura y presión de vacío más adecuadas. Una vez ajustados los parámetros de proceso, se procedió a termoconformar una lámina de PVC de 0,2 mm utilizando los moldes mencionados. Para el caso de la lámina utilizada, las condiciones de procesado que mejores resultados dieron fueron 120 °C de temperatura de la lámina y 0,7 bares de depresión para realizar el vacío.

Los resultados fueron positivos con la configuración del molde en positivo (Figura 17). Sin embargo, la lámina de PVC termoconformada con el molde en configuración negativa (Figura 18) presentó una menor definición.

En la versión en positivo, se obtuvo una buena reproducción de la geometría del molde en relieve, incluyendo los elementos más críticos, como son los puntos del código braille. Por ello, se puede concluir que es posible emplear esta técnica para realizar moldes para gráficos tangibles.

*Figura 17. Imagen del termoconformado sobre molde en positivo (izquierda), y su superposición fotográfica con la geometría teórica diseñada (derecha)*



*Figura 18. Imagen del termoconformado sobre molde en negativo (izquierda), y su superposición fotográfica con la geometría teórica diseñada (derecha). Se aprecia una menor reproducción de los detalles*



Un aspecto destacable, observado durante las pruebas de termoconformado, es que para el caso de un molde realizado con la técnica 3DP no es necesario el taladrado de orificios para mejorar el proceso de succión de aire por la acción del vacío provocado durante el termoconformado, pues, debido a su porosidad, el vacío se produce de manera homogénea a través de toda la superficie. Por otro lado, el molde soportó diversos contactos de carga de la lámina de PVC sin una erosión destacable, así como las temperaturas a las que fue expuesto, a pesar de que, como se ha comentado, no fue sometido a un infiltrado para endurecerlo.

Además, también se termoconformaron las Piezas 2.1 y 2.2 con unos resultados positivos (Figura 19).

*Figura 19. Perfiles termoconformados de las Piezas 2.1 y 2.2. Se puede apreciar la menor resolución geométrica de la lámina termoconformada respecto el molde original realizado en 3DP*





## **6. Tiempos y costes de fabricación de los moldes**

Una vez estudiada y demostrada la viabilidad técnica del uso de la técnica de fabricación aditiva 3DP como técnica directa de fabricación rápida de utillaje para la obtención de moldes para el termoconformado de gráficos táctiles que se produzcan en mini series de producción, a continuación se va a realizar un estudio comparativo frente a otras técnicas de fabricación de utillaje, analizándose tanto tiempos como costes, tomando como referencia la fabricación más característica de este estudio, que ha sido la pieza molde en positivo para la plantilla cuadrada de 85 mm de lado mostrada en la Figura 7.

En cuanto al estudio de tiempos, se ha procedido a comparar únicamente los tiempos de fabricación en máquina de la pieza molde realizada con la técnica 3DP, mediante mecanizado CNC de una resina y mediante la técnica FDM.

Así, el tiempo exclusivo de máquina para la obtención de la pieza mediante 3DP con la máxima calidad posible fue de 12 minutos. En comparación, la misma pieza mecanizada en Control Numérico requirió 3 veces más (36 minutos), realizándose el mecanizado sobre una resina de poliuretano de fácil mecanizado, que es un material polimérico habitual en la fabricación de prototipos mediante fresado. A diferencia de los anteriores, el tiempo empleado por un equipo FDM de bajo coste fue de algo más de 3 horas para un espesor de capa de 0,25 mm, y de nada menos que 6,5 horas para 0,125 mm de espesor de capa. Para tamaños más grandes, obviamente las diferencias se acentuarían mucho más, y normalmente un gráfico tangible suele tener dimensiones entre un formato de página A4 y A3 para una óptima exploración háptica. Como ejemplo, y a título únicamente orientativo, se puede estimar que los tiempos serían del orden de ocho veces más, esto es: 1,8 horas en 3DP, 5,4 horas con fresado CNC y 58,5 horas mediante FDM.

A los tiempos exclusivamente de fabricación en máquina, indicados anteriormente, se han de añadir los requeridos para preparar el material, bastante relevante en el caso del mecanizado, los de posprocesado de la pieza obtenida (importante en el de 3DP), así como los de revisión de la geometría de partida y generación del programa en código máquina a lanzar en cada una de las máquinas (bastante importante en el caso del mecanizado CNC).

En cuanto al estudio de costes, se ha procedido a solicitar presupuestos a diferentes empresas para la fabricación de la pieza de referencia, de dimensión 85x85 mm. Los precios obtenidos para diferentes técnicas y materiales, incluyendo portes y tasas, han sido los siguientes (Tabla 6):

Tabla 6. Tabla con costes de diferentes técnicas para fabricación de moldes para termoconformar

Técnica	Material	Precio (€)
3DP	Polvo de yeso aglutinado	25,78
Mecanizado CNC	ABS	339,04
Mecanizado CNC	PA30FV (poliamida o nailon + 30 % fibra vidrio)	379,06
SLA Acrílica	Fotopolímero	64,00
SLS Metal	Polvo de acero inoxidable infiltrado con cobre	99,75

Hay que tener en cuenta que el cálculo de costes puede variar significativamente en función de la disponibilidad de los equipos y la evolución del mercado. En este caso, se ha tomado el peor de los casos: que es que se producen los moldes externamente. Se aprecia, por ejemplo, que la técnica de SLA (no de bajo coste) es del orden de casi tres veces más cara que la técnica en base polvo (3DP).

## **7. Conclusiones e implicaciones para los técnicos en rehabilitación, productores y diseñadores de gráficos tangibles**

De acuerdo a los resultados expuestos en este trabajo, los técnicos de rehabilitación que trabajan con personas con discapacidad visual y, en general, los responsables, diseñadores y productores de gráficos táctiles para su exploración háptica. Deberían tener en cuenta esta nueva posibilidad, consistente en utilizar las técnicas de prototipado rápido como técnicas de fabricación rápida de utillaje para elaborar los moldes necesarios para termoconformar gráficos tangibles.

Estas técnicas utilizadas como *Rapid Tooling* permiten obtener moldes para termoconformado de series pequeñas, e incluso medias (según la técnica), de una manera rápida, permitiendo un alto nivel de flexibilidad y, por lo tanto, de modificaciones. Además, los costes no son demasiado elevados si se comparan con el correspondiente a la obtención de moldes por técnicas convencionales, y en el caso de que la serie sea pequeña (unas decenas de gráficos), la técnica 3DP es rápida y muy económica.

En cuanto a la estrategia de termoconformado, el estudio realizado demuestra que es más apropiado termoconformar sobre moldes en positivo que sobre moldes en negativo.

Finalmente, y comparando exclusivamente las dos técnicas analizadas en este trabajo, se concluye que la técnica de 3DP da unos resultados de reproducción de detalles (líneas, braille, texturas, etc.) suficientes, siendo, en la actualidad, más adecuada para realizar estos moldes que la técnica FDM, la cual ofrece resultados bastante pobres en la reproducción de los niveles de detalle exigidos para la realización de gráficos táctiles, además de producirse deformaciones por las contracciones térmicas cuando las piezas son delgadas y relativamente planas. Concretamente, en la reproducción de código braille, se ha comprobado que la técnica de FDM no lo reproduce con la precisión requerida a nivel geométrico, aunque podría subsanarse este hecho realizando el relieve del braille con un método diferente para adherirlo con posterioridad al molde.

Por contra, en cuanto a la resistencia de las piezas, las obtenidas por FDM son muy resistentes, mientras que las obtenidas mediante 3DP son muy débiles si no se infiltran, y, aun infiltradas, su resistencia es mucho menor que las obtenidas por FDM. A pesar de ello, si la serie de piezas a termoconformar es bastante pequeña, entonces la resistencia obtenida por la 3DP es suficiente.

## **8. Futuros trabajos**

Del trabajo realizado en este estudio se pueden derivar diversas líneas de investigación futuras. Entre ellas, se encontraría extender el estudio a otras técnicas de prototipado rápido, más allá de las de bajo coste. Esto incluiría la técnica, por ejemplo, de SLA, que, siendo actualmente más costosa económicamente, puede reproducir con más precisión y detalle las geometrías CAD. No obstante, habría que superar en el empleo de esta técnica las deformaciones que se producen, con el tiempo, en los fotopolímeros empleados, al absorber humedad, acortando su vida, y valorar, por otra parte, si es necesaria tanta precisión para posteriormente emplear un proceso de baja fidelidad en la reproducción geométrica, como es el caso del termoconformado.

Por último, otra línea de investigación que queda abierta se refiere a la experimentación con usuarios con discapacidad visual para cotejar que las soluciones obtenidas sean correctas desde la óptica de la percepción táctil, y también desde el contraste cromático, hecho, este último que implicaría estudiar sistemas que permitan dotar de acabado en color a los gráficos termoconformados, si bien es cierto que el estudio que aquí se muestra se ha centrado principalmente en el desarrollo de los moldes para termoconformar, más que en el propio sistema de termoconformado.

## **9. Bibliografía**

The Braille Authority of North America y Canadian Braille Authority (2011). [Guidelines and standards for tactile graphics, 2010 \(formato ZIP\)](#). [Baltimore:] The Braille Authority of North America.

Brown, C., y Hurst, A. (2012). VizTouch: automatically generated tactile visualizations of coordinate spaces. En: S. N. Spencer (coord.), *TEI'12: Proceedings of the Sixth Conference on Tangible, Embedded and Embodied Interaction*, p. 131-138. Nueva York: ACM.

- Chimento, J., Highsmith, M. J., y Crane, N. (2011). 3D printed tooling for thermoforming of medical devices. *Rapid Prototyping Journal*, 17(5), 387-392.
- Comisión Braille Española (2012). [Documento técnico R 1: Requisitos técnicos para la confección de planos accesibles a personas con discapacidad visual \(archivo PDF\)](#). Madrid: Organización Nacional de Ciegos Españoles.
- Edman, P. K. (1992). *Tactile graphics*. Nueva York: American Foundation for the Blind.
- Estudios Durero. [Didú, la impresión en relieve \(página web\)](#).
- Götzelmann, T., y Pavkovic, A. (2014). Towards automatically generated tactile detail maps by 3d printers for blind persons. En: K. Miesenberger, D. Fels, D. Archambault, P. Peñáz y W. Zagler (coords.), *Computers helping people with special needs, 14<sup>th</sup> International Conference, ICCHP 2014, Proceedings, Part II*, p. 1-7. Suiza: Springer International Publishing.
- Gual, J. (2013). [Incorporación de símbolos tridimensionales en planos táctiles para la mejora de su usabilidad \(formato PDF\)](#). Tesis doctoral sin publicar. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya.
- Gual, J., Puyuelo, M., y Lloveras, J. (2014). Three-dimensional tactile symbols produced by 3D Printing: improving the process of memorizing a tactile map key. *British Journal of Visual Impairment*, 32(3), 263-278.
- Gual, J., Puyuelo, M., y Lloveras, J. (2015a). The effect of volumetric (3D) tactile symbols within inclusive tactile maps. *Applied Ergonomics*, 48, 1-10.
- Gual, J., Puyuelo, M., y Lloveras, J. (2015b). Improving tactile map usability through 3D printing techniques: an experiment with new tactile symbols. *The Cartographic Journal*, 52(1), 51-57.
- Gual, J., Puyuelo, M., Lloveras, J., y Merino, L. (2012). Visual impairment and urban orientation: pilot study with tactile maps produced through 3D printing. *Psycology: Revista Bilingüe de Psicología Ambiental/Bilingual Journal of Environmental Psychology*, 3(2), 239-250.
- Gual, J., Serrano, J., y Mañez, M. J. (2015). [Obtención de gráficos tangibles mediante técnicas de Prototipado Rápido: el volumen como elemento compositivo de diseño \(página web\)](#). *Integración: revista digital sobre discapacidad visual*, 65.
- Hsu, C. (2014). [A 3-D talking map for the blind \(and everyone else\) \(página web\)](#). Recurso en línea.
- Jiménez, M., Romero, L., Domínguez M., y Espinosa, M. M. (2015). Rapid prototyping model for the manufacturing by thermoforming of occlusal splints. *Rapid Prototyping Journal*, 21(1), 56-69.
- Junk, S., y Tränkle, M. (2011). [Design for additive manufacturing technologies: new applications of 3D-printing for rapid prototyping and rapid tooling \(formato PDF\)](#). En: S. J. Culley, B. J. Hicks, T. C. McAlone, T. J. Howard, y J. Malmqvist (coords.), *Proceedings of the 18th International Conference on Engineering Design (ICED 11), Impacting Society Through Engineering Design, vol. 5: Design for X/design to X*. Lyngby/Copenague, Dinamarca, 15-19 de agosto de 2011.
- Kane, S. K., y Bigham, J. P. (2014). [Tracking @stemxcomet: teaching programming to blind students via 3D printing, crisis management, and Twitter \(formato PDF\)](#). En: *SIGCSE'14, Proceedings of the 45<sup>th</sup> ACM Technical Symposium on Computer Science Education*, p. 247-252. Nueva York: ACM.
- Kruth, J. P., Leu, M. C., y Nakagawa, T. (1998). Progress in additive manufacturing and rapid prototyping. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 47(2), 525-554.

- Millsaps, B. B. (2015). [Students create 3D printed tactile map of campus for visually impaired \(página web\)](#). Recurso en línea.
- RepRapBCN (2014). [Planos táctiles low cost con Impresión 3D \(página web\)](#). Recurso en línea.
- Surana, R. (1997). [An integrated rapid prototyping and vacuum casting system for medical applications \(formato PDF\)](#). University of Maryland, EE. UU. Tesis doctoral sin publicar.
- Tooteko (2014). [Talking tactile \(formato PDF\)](#). Recurso en línea.
- Versoteq (2015). [Versoteq has installed Finland's first 3D printed tactile map \(página web\)](#). Recurso en línea.
- Volpe, Y., Furferi, R., Governi, L., y Tennirelli, G. (2014). [Computer-based methodologies for semi-automatic 3D model generation from paintings \(formato PDF\)](#). *IJCAET*, 6(1), 88-112.
- Voženílek, V., Kozáková, M., Štávková, Z., Ludíková, L., Růžicková, V., y Finková, D. (2009). [3D printing technology in tactile maps compiling \(formato PDF\)](#). En: *ICA 2009, Proceedings of the 24<sup>th</sup> International Cartographic Conference*, Santiago de Chile, Chile, 15-21 de noviembre de 2009. International Cartographic Association.
- Williams, G. J., Zhang, T., Lo, A., Gonzales, A., Baluch, D. P., y Duerstock, B. S. (2014). [3D Printing tactile graphics for the blind: application to histology \(página web\)](#). En: *RESNA 2014: Racing towards excellence in AT*, Indianápolis (EE. UU.), 11-15 de junio de 2014. Rehabilitation Engineering and Assistive Technology Society of North America.
- Yan, X., y Gu, P. (1996). A review of rapid prototyping technologies and systems. *Computer-Aided Design*, 28(4), 307-318.
- Zhang, G., Richardson, M., Surana, R., Dwornik, S., y Schmidt, W. (1996). Development of a rapid prototyping system for tactile graphics production. En: *Proceedings of the Sixth International Flexible Automation and Intelligent Manufacturing (FAIM) Conference*. Atlanta, GA: Georgia Institute of Technology.

**Jaume Gual Ortí, Julio Serrano Mira, M.<sup>a</sup> Jesús Mañez Pitarch**, personal docente e investigador del Departamento de Ingeniería de Sistemas Industriales y Diseño. Universitat Jaume I, Campus Riu Sec, s/n. 12071 Castellón (España).

Correo electrónico: [jgual@uji.es](mailto:jgual@uji.es).