

Informe

Obtención de gráficos tangibles mediante técnicas de Prototipado Rápido: el volumen como elemento compositivo de diseño

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

RESUMEN: Se presentan los sistemas de producción de Prototipado Rápido, y se exponen algunas de sus aplicaciones prácticas en el ámbito de la realización de gráficos tangibles para su utilización por personas con discapacidad visual. Se refieren sintéticamente los procesos de fabricación más empleados en la actualidad para realizar este tipo de gráficos en relieve, y se analizan las distintas técnicas desarrolladas para la impresión de objetos físicos en volumen y su modo de realización con técnicas de diseño asistido por ordenador. Se describen los antecedentes y experiencias más significativos en este ámbito, y se plantean algunos aspectos de la teoría compositiva del diseño, que posibilitan un mejor aprovechamiento de estas técnicas.

PALABRAS CLAVE: Materiales en relieve. Gráficos táctiles. Gráficos tangibles. Impresión 3D. Prototipado Rápido.

ABSTRACT: **Tangible graphics using rapid prototyping techniques: volume as a design constituent.** Rapid prototyping systems are described, along with practical applications in the production of tangible graphics for people with visual disability. The article summarises the most popular and recent manufacturing methods for this type of relief graphics and analyses the techniques developed to print physical objects in three dimensions, drawing from computer-assisted design software. A description of the most significant precedents and experiences in the field is followed by a discussion of the particulars of the «compositional theory of design» that facilitate more effective use of these techniques.

KEY WORDS: Raised-line materials. Tactile graphics. Tangible graphics. 3D printing. Rapid prototyping.

1. Introducción

El artículo que aquí se expone tiene como principal objetivo dar a conocer las técnicas de Prototipado Rápido (PR) como sistemas de producción de gráficos tangibles orientados a personas con discapacidad visual. Tradicionalmente, se emplean estos gráficos en relieve para ayudar a estos usuarios a acceder a la información gráfica. A su vez, estos gráficos pueden fabricarse de diversas maneras, dependiendo de los requerimientos de diseño y de los medios y recursos disponibles. Actualmente, las técnicas de PR se encuentran en plena expansión, y su uso en la industria y la ciencia es cada vez más frecuente. En este contexto, parece adecuado abordar la posibilidad de emplear estas técnicas para producir gráficos tangibles e indagar en aquellos aspectos que faciliten su aplicación en el mundo de las personas con discapacidad visual.

De este modo, este trabajo aborda, en primer lugar, (1) los sistemas tradicionales de fabricación de este tipo de productos; posteriormente, (2) las técnicas de PR, también denominadas de fabricación aditiva para la realización de modelos digitales tridimensionales necesarios para el proceso de impresión física. También se tratan (3) algunos aspectos de la teoría compositiva en diseño, y (4), por último, se exponen algunos ejemplos de trabajos ya realizados mediante estas técnicas de producción emergentes. Finalmente, se cerrará el artículo con unas breves conclusiones y algunas posibles propuestas de futuro relacionadas con el tema tratado.

2. Los gráficos tangibles

Aunque son sobradamente conocidos por los especialistas en la materia, como primer punto de este trabajo descriptivo y analítico conviene recordar algunos aspectos básicos sobre los gráficos tangibles. El más relevante es que estos productos ayudan a las personas con discapacidad visual a acceder a contenidos gráficos empleando el tacto, de tal manera que el uso del tacto supone, para este colectivo de personas, un recurso útil para comprender fenómenos de naturaleza visual. Para ello, en cualquier gráfico tangible, es necesario recordar, entre otros aspectos, que:

- Se requiere trasladar la información visual o gráfica al relieve, es decir, se deben traducir y, por lo tanto, interpretar los elementos visuales a un lenguaje admisible para el sentido del tacto, lo que se realiza normalmente mediante una elevación de los elementos de los que se compone un gráfico.
- Habitualmente, un gráfico de este tipo consta de elementos de diversa naturaleza: gráficos elevados (puntos, líneas y texturas), texto (en relieve o no) y código de lectoescritura braille.
- Aunque, en un principio, no se precisan unas destrezas especiales para explorar un gráfico tangible, la realidad es que una persona con experiencia previa y que haya desarrollado estrategias de exploración háptica percibirá con más eficacia la información de un gráfico de este tipo.
- La memoria háptica es necesaria para asimilar la información de estos gráficos en personas con discapacidad visual. El escaneo de un gráfico tangible se realiza por partes, siguiendo una secuencia ordenada, a diferencia de los mecanismos de percepción visual, que son globales y simultáneos.
- Emplear con cierto control diferentes niveles de altura (multinivel) en los elementos del gráfico tangible facilita la comprensión del ente táctil, al introducir matices observables por el tacto (Gardiner y Perkins, 2002).

Algunos de los hechos mencionados tienen una implicación fundamental a la hora de diseñar un gráfico tangible. La regla de oro principal es que es preciso que se realicen de la manera más simple posible (Amick, Corcoran, Hering y Nousanen, 2002; Blasch, Wiener y Welsh, 1997; Edman, 1992), centrándose en la información más significativa, ya que el sentido del tacto es menos agudo que el visual, por lo que un gráfico complejo al tacto puede resultar frustrante al usuario debido a su

dificultad de lectura. Consecuentemente, simplificar y sintetizar el diseño del gráfico tangible clarifica su percepción y ayuda a transmitir la información de manera efectiva.

En otro orden de cosas, existen muchos tipos de gráficos tangibles. Probablemente, los más populares son los planos de movilidad y orientación (portables o permanentes). Sin embargo, un gráfico tangible, como ya se ha mencionado, puede expresar cualquier fenómeno de naturaleza gráfica en relieve, y, afortunadamente, empieza a ser común su uso en espacios para la cultura, como museos o centros de interpretación, aunque sería deseable un mayor empleo, sobre todo en espacios de carácter colectivo o público. En este sentido, el diseño y la producción de un gráfico tangible responden también a factores tales como la durabilidad esperada —tanto desde el punto de vista de horas de uso, como de su vida útil— y su flexibilidad o rigidez, la cual facilitará, si así se desea, su portabilidad y manejabilidad, o bien, su carácter fijo y permanente en un espacio concreto en el que poder explorarlo.

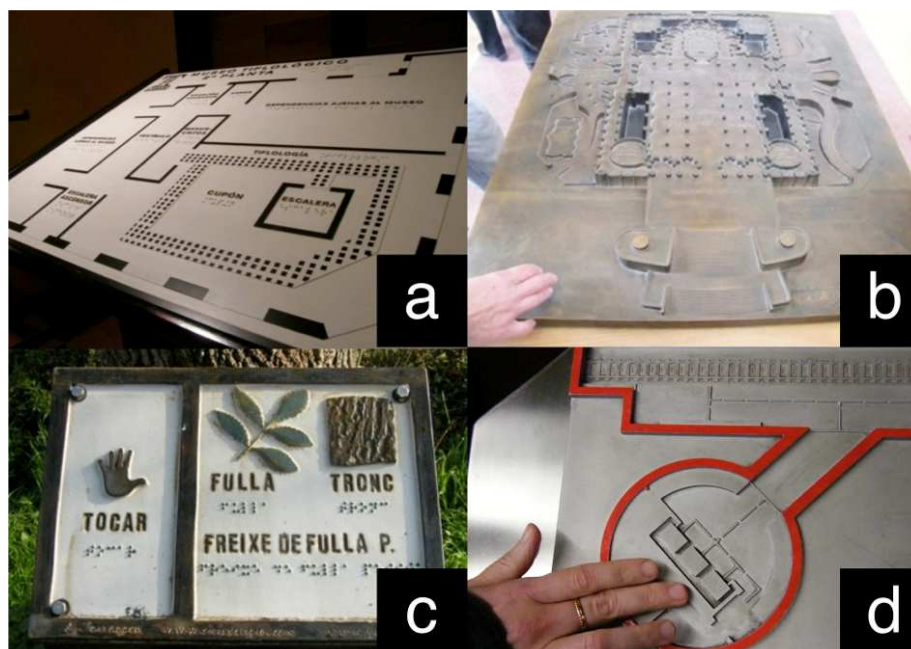
3. Técnicas tradicionales para realizar gráficos tangibles

Existen numerosos procesos de producción mediante los cuales se puede confeccionar un gráfico tangible. Polly Edman, en su libro de cabecera sobre estos gráficos tan particulares, cita más de una docena de maneras diferentes de confeccionar un gráfico en relieve (Edman, 1992).

En este sentido, para piezas únicas o series muy cortas, es posible realizar un gráfico de forma artesanal, por ejemplo, con la técnica del «collage». Sin embargo, para series cortas o medias, o incluso para piezas únicas también, se han desarrollado una serie de sistemas que permiten realizar gráficos en relieve, siendo los más extendidos el *embossed*, el microencapsulado y el termoconformado, pero, particularmente, son los dos últimos procesos mencionados los que parecen haberse consolidado entre los especialistas (Rowell y Ungar, 2004).

Las tres técnicas anteriormente mencionadas reproducen gráficos en relieve portables, realizados en base a materiales flexibles como el papel o las láminas finas de plástico. Ahora bien, un gráfico tangible es susceptible de realizarse de muchas maneras: también los hay rígidos y de carácter permanente, como, por ejemplo, aquellos fabricados con láminas de polímero cortadas y posteriormente montadas en un conjunto, mecanizados en aluminio o en cualquier polímero, mediante fundición de acero o de bronce, con inyección de plástico, e incluso en cerámica (véanse algunos ejemplos en la *Fig. 1*). El propósito del plano, la duración deseada, los recursos disponibles y su uso serán, entre otros aspectos, los factores o requerimientos que condicionarán la selección de un sistema u otro de manufactura.

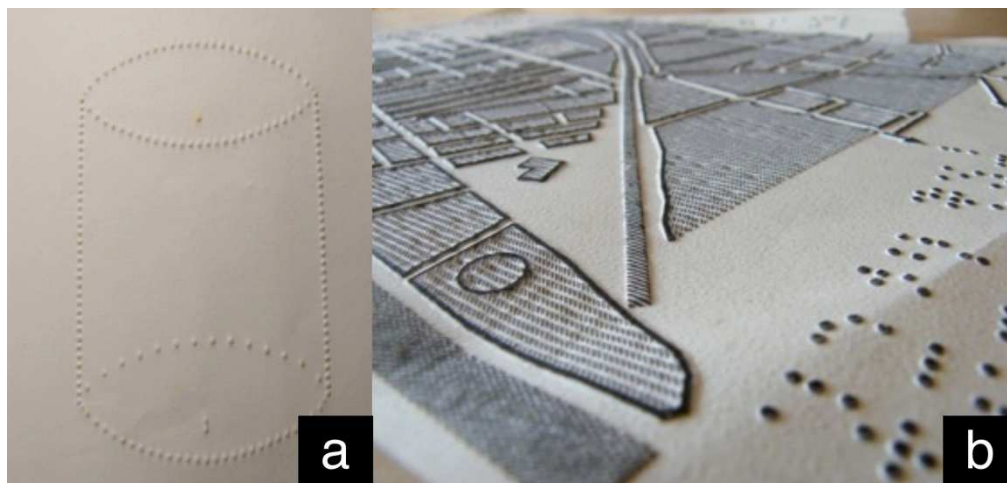
Figura 1. Imagen superior izquierda (a), plano táctil dentro del Museo Tiflológico de la ONCE en Madrid, realizado en materiales plásticos. Imagen superior derecha (b), Plano táctil con la planta de distribución principal de la Basílica de la Sagrada Familia en Barcelona, realizado en fundición metálica. Imagen inferior izquierda (c), Imagen de un gráfico tangible realizado en cerámica artesanal, en la desembocadura del Riu Gaia en Tarragona. Este gráfico representa la forma de la hoja de un fresno y la textura de su tronco. Imagen inferior derecha (d), Plano en relieve de una estación de metro de Barcelona, realizado en aluminio mecanizado.



En este sentido, centrando el discurso en las técnicas más empleadas, se podrían distinguir los tres grupos antes mencionados y que, a continuación, se describen brevemente:

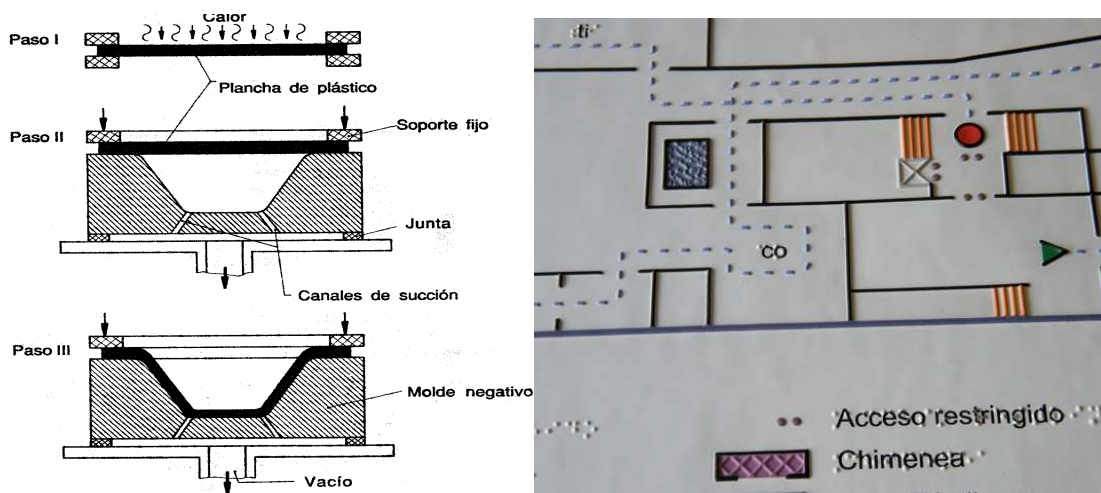
- Sistema denominado **embossed** (estampado), que consiste en el grabado de puntos braille sobre papel pero configurando sobre este un gráfico en relieve de altura constante y con un escaso control sobre la altura del relieve grabada, o sobre la geometría de esta. Normalmente, se emplean impresoras braille para realizar estos gráficos. El gráfico en relieve representado presenta cierta degradación al uso, al ser su sustrato una lámina de papel. Se trata de un sistema concreto dentro del mundo de la educación de personas con discapacidad visual y que no tiene equivalencia en la industria (v. Fig. 2(a)).

Figura 2. Imagen izquierda (a): representación de un cilindro mediante estampado de puntos braille (Embossed). Imagen de la derecha (b): detalle de plano táctil microencapsulado.



- **Sistema de microencapsulado**, el cual reproduce relieves sobre una hoja especial de papel (papel microencapsulado, lámina fúser, *swell paper*) que contiene cápsulas de alcohol que se expanden mediante el contacto con la tinta negra y la aplicación de temperatura. Estas cápsulas expandidas, de color negro, son las que forman el relieve, después de que se les aplique el correspondiente calor en el denominado horno fúser (Blanco-Zárate, 2006). El resultado es un relieve con altura constante y, como el anterior, con un escaso o nulo control sobre la altura o la geometría del relieve. Al confeccionarse mediante un sustrato en base de papel, su nivel de degradado al uso es similar al sistema anterior y, como aquel, el proceso de microencapsulado apenas tiene aplicaciones más allá de la específica para el que es empleado por los técnicos especialistas en discapacidad visual (v. Fig. 2(b)).
- **El termoconformado** de láminas de termoplástico. En este sistema, una lámina fina de polímero se adapta a la forma de una matriz modelo mediante la aplicación conjunta de calor y vacío (v. Fig. 3). Se requiere un molde o pieza matriz sobre la que se deformará la lámina de plástico calentada, la cual adaptará su forma a ella mediante la aplicación de vacío. Esta matriz se puede realizar mediante técnicas manuales o mecanizando, por ejemplo, un volumen de resina o de aluminio. Al contrario que los sistemas anteriores, este procedimiento no es exclusivo del ámbito de los gráficos tangibles, sino que se emplea también en la industria, como, por ejemplo, en la fabricación de ciertos envases. Mediante este proceso, se pueden controlar la altura del relieve y más aspectos geométricos que con los sistemas anteriores. Por otro lado, soporta mejor la degradación al uso y, por sus particularidades, suele emplearse fundamentalmente en series largas o cortas para amortizar así la pieza matriz.

Figura 2. En la imagen de la izquierda se aprecia el esquema del proceso de termoconformado. En la parte derecha se puede observar un ejemplo con un detalle de plano termoconformado con acabado policromo de la Planta Noble de la Casa Batlló en Barcelona.



Como se ha comentado anteriormente, de estos tres sistemas descritos los más comunes y extendidos entre los profesionales y técnicos en discapacidad visual son el termoconformado y el microencapsulado. En este sentido, existen algunos estudios que han tratado de compararlos con resultados diversos.

En primer lugar, hay que señalar que algunos reputados investigadores en la materia no encontraron grandes diferencias entre ambos sistemas de fabricación al realizar experimentos con niños con discapacidad visual (Pike, Blades y Spencer, 1992). Sin embargo, otros autores, también de reconocido prestigio por sus trayectorias en este ámbito, sugieren en sus trabajos que el proceso de microencapsulado es más apropiado que el termoconformado para la realización de planos táctiles (Dacen-Nagel y Coulson, 1990; Ungar, Jehoel, McCallum y Rowell, 2005). Ahora bien, Gardiner y Perkins (2002), dos de los voces más reconocidas en la materia, destacan las ventajas del termoconformado frente al microencapsulado en la realización de planos táctiles, ya que, mediante planos bien diseñados y producidos por esta técnica, obtuvieron en sus estudios mejores resultados que con las versiones de papel microencapsulado en relieve. Por lo tanto, se aprecia una variedad de resultados que hace difícil concluir cuál de estas dos técnicas es más apropiada para la realización de este tipo de gráficos.

4. Técnicas de fabricación aditiva (Prototipado Rápido)

Las técnicas de Prototipado Rápido (*Rapid Prototyping*) son un conjunto de técnicas que son capaces de producir modelos o prototipos físicos de piezas partiendo de los datos de un modelo CAD (*Computer-Aided Design*) tridimensional (modelo sólido). Estas técnicas permiten obtener, en cuestión de horas, prototipos casi idénticos a los modelos diseñados mediante CAD, consiguiéndose una drástica reducción en los tiempos y costes de fabricación de los modelos o prototipos, además de guardar una elevada fidelidad con el diseño CAD original.

Estas técnicas de Prototipado Rápido (PR) se pueden clasificar en dos grandes grupos en función de la manera en la que se da forma a la pieza final:

- **Técnicas sustractivas**, en las que la forma se obtiene mediante eliminación del material sobrante a partir de una forma sólida de partida, utilizando máquinas de control numérico (CN), fundamentalmente fresadoras dotadas de cabezales de alta velocidad y hasta cinco grados de libertad.
- **Técnicas aditivas**, en las que la forma se obtiene mediante sucesivas deposiciones de material (generalmente por capas) hasta conformar la pieza final.

De los dos tipos de técnicas, las segundas son las más extendidas, por lo que al hablar de PR se asume, en general, que se trata de técnicas aditivas.

Existen otros dos conceptos relacionados con el uso de las técnicas de Prototipado Rápido que es conveniente aclarar, y que son:

- **Fabricación Rápida de Utillaje** (*Rapid Tooling*), que es el conjunto de técnicas que permiten la obtención, en poco tiempo, del utillaje necesario para fabricar pequeñas series de piezas que requieren moldes o matrices. El uso de estas técnicas es requerido cuando se precisan series pequeñas de piezas, y también cuando es imposible obtener por técnicas de PR una pieza prototipo con un material igual o similar al de la pieza final. En estos casos, se evita la necesidad de obtener este utillaje mediante técnicas convencionales, altamente costosas.
- **Fabricación Rápida** (*Rapid Manufacturing*), consistente en el uso de las técnicas de Prototipado Rápido y/o de las de Fabricación Rápida de Utillaje para obtener en poco tiempo series pequeñas de piezas con los materiales y procesos finales, las cuales son totalmente funcionales y pueden ser utilizadas directamente como componente acabado.

4.1. Una breve revisión histórica sobre las técnicas de Prototipado Rápido y su evolución

En cuanto a los orígenes de las técnicas aditivas de PR, decir que se trata de técnicas relativamente recientes. La primera de ellas, la estereolitografía, surge en 1986, y la primera máquina se comercializa en 1988. A esta técnica pionera le sigue el nacimiento de otras diferentes durante la primera mitad de la década de los 90, algunas de las cuales no llegan a cuajar, de modo que, a principios de la primera década de este siglo, quedan definidas la mayoría de las técnicas, apareciendo a partir de entonces otras tecnologías derivadas de las anteriores, generalmente desarrolladas por las principales empresas existentes que sobreviven y poseen la propiedad de las tecnologías básicas.

Además, a partir de 2005, una vez asentadas las tecnologías, se evoluciona mucho en el desarrollo de materiales con propiedades similares a las de los utilizados habitualmente en la industria (en particular plásticos), con el fin de ampliar la versatilidad de estas tecnologías, que era el punto débil de las mismas por su limitado abanico de materiales utilizables.

Como ejemplo de lo indicado anteriormente, en la *Fig. 4* se muestra la evolución mundial de ventas de equipos de PR desde los orígenes hasta el inicio de la consolidación, y en la *Fig. 5* se muestra por año desde 1993 la facturación en productos y servicios de PR (equipos, consumibles y servicios), observándose cómo a partir de 2000 se reduce el total de la facturación aun cuando se sigue incrementando el número de equipos vendidos y los existentes instalados, lo que indica una importante reducción de costes de adquisición y de explotación.

Figura 4. Evolución mundial de ventas de equipos de PR desde sus orígenes hasta el inicio de su consolidación (1988 a 2002).

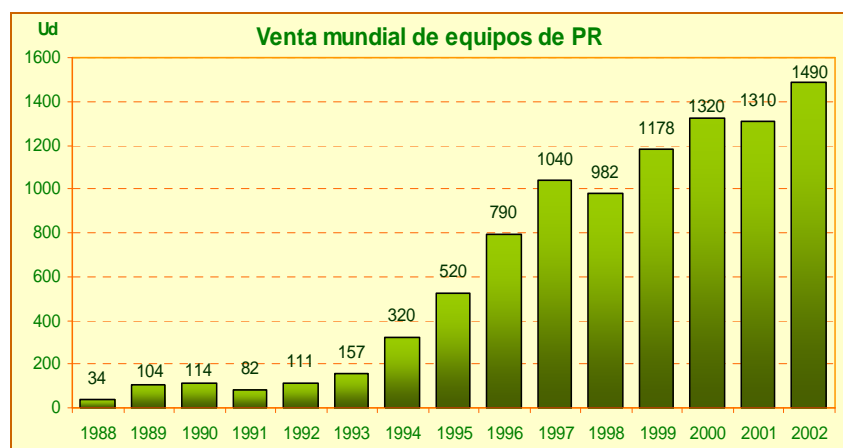
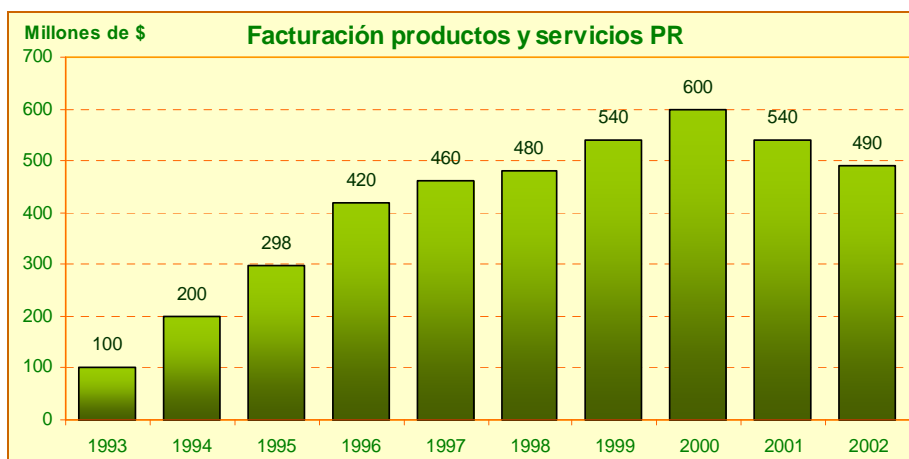


Figura 5. Evolución de la facturación en productos y servicios de PR (equipos, consumibles y servicios) por año, desde 1993 hasta 2002.



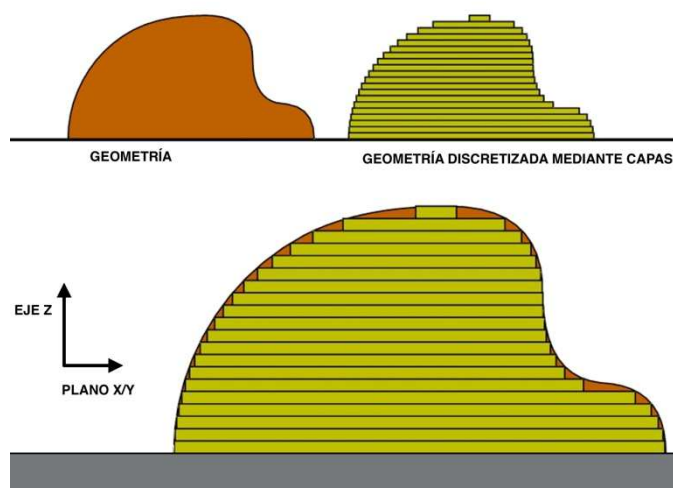
Con el inicio de la liberación de algunas patentes sobre tecnologías de PR, en el año 2005 surge el proyecto RepRap, cuyo objetivo es crear una máquina de PR autorreplicante (capaz de producir piezas para construir nuevas versiones de sí misma), basada en la técnica de FDM (*Fused Deposition Modelling*, v. apartado 4.3) y que fuera de bajo coste. En 2006, el primer prototipo RepRap imprime con éxito la primera pieza, y en 2008 se habían conseguido fabricar varias réplicas de la primera máquina, con lo que el proyecto ya se pudo considerar un éxito. En la actualidad, existen varias versiones operativas de estas máquinas, con multitud de equipos construidos, así como una importante cantidad de empresas, surgidas al amparo de este proyecto, que diseñan y fabrican sus propios equipos de PR mediante técnica

FDM, y que son, como se ha comentado, de bajo coste, lo cual ha permitido popularizar la conocida como «impresión en 3D», denominación esta no del todo apropiada, tal y como se justificará más adelante. A día de hoy, el uso de estos equipos FDM de «bajo coste» suponen más de la mitad del uso mundial de técnicas de PR.

4.2. ¿Cómo se construye una pieza mediante técnicas de PR?

La totalidad de las técnicas PR aditivas actuales van construyendo la pieza objeto mediante capas, hecho este que hace que se las conozca en determinados ámbitos (sobre todo de fabricación) como «técnicas de fabricación por capas» (*Layered Manufacturing*, LM). Para ello, en primer lugar, el modelo sólido (CAD) de la pieza se divide en secciones o capas de espesor constante paralelas entre sí y perpendiculares a la dirección de construcción (v. *Fig. 6Figura*) y, posteriormente, la máquina de PR va consolidando el material por capas consecutivas desde la inferior hasta la superior (aunque alguna técnica lo hace a la inversa) de acuerdo al contenido de la «rebanada digital» correspondiente.

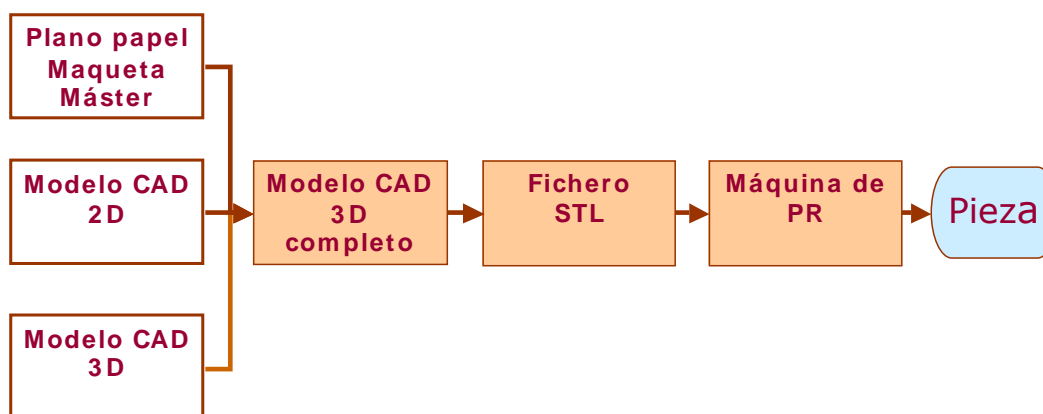
Figura 6. Ejemplo de discretización en capas según planos X-Y de una geometría modelada en un CAD, siendo Z la dirección de construcción por capas.



Las máquinas de PR reciben un «programa máquina» con las trayectorias a seguir en cada capa, elaborado por un *software* a partir de la información en formato digital de la pieza. En general, el formato digital habitual es el popular formato «STL», presente hoy en cualquier programa CAD.

El esquema con las fases del proceso para la generación de piezas mediante técnicas de un Prototipado Rápido a partir de un boceto, maqueta, plano 2D o cualquier otro origen de información se puede observar en la Fig. 7.

Figura 7. Esquema con las fases necesarias para la generación piezas mediante técnicas de PR.



El formato gráfico STL es un estándar industrial para manipulación de mallados que representa la definición de la piel que delimita exteriormente una pieza (su geometría) mediante una representación triangularizada y, en consecuencia, adaptada a ella. Esta superficie adaptada está formada exclusivamente por una serie de pequeños triángulos planos (facetas), formando así una definición mallada mediante elementos triangulares de la cáscara de un objeto sólido modelado en CAD (v. Fig. 8). Por otra parte, es de resaltar que cuando se realiza el mallado para convertir el modelo en STL, se ha de prestar atención al nivel de detalle que se requiere, pues un nivel bajo de discretización da lugar a una escasa resolución (fidelidad de la geometría respecto del original), y un excesivo nivel de detalle conlleva ficheros muy grandes y mayores tiempos de procesado (v. Fig. 9).

Figura 8. Ejemplo de modelo digital de una pieza en formato STL, donde se aprecia, en primer lugar, el modelo CAD original (sin discretizar), el modelo discretizado donde se aprecia el «faceteado» de la superficie, y el mismo con la superposición de las aristas de los triángulos; finalmente, la vista con tan solo las aristas de los triángulos. (Fuente: Trabajos realizados en el curso 2013-14 por alumnos de la asignatura Prototipado Rápido y Desarrollo de Productos de la Universitat Jaume I de Castellón).

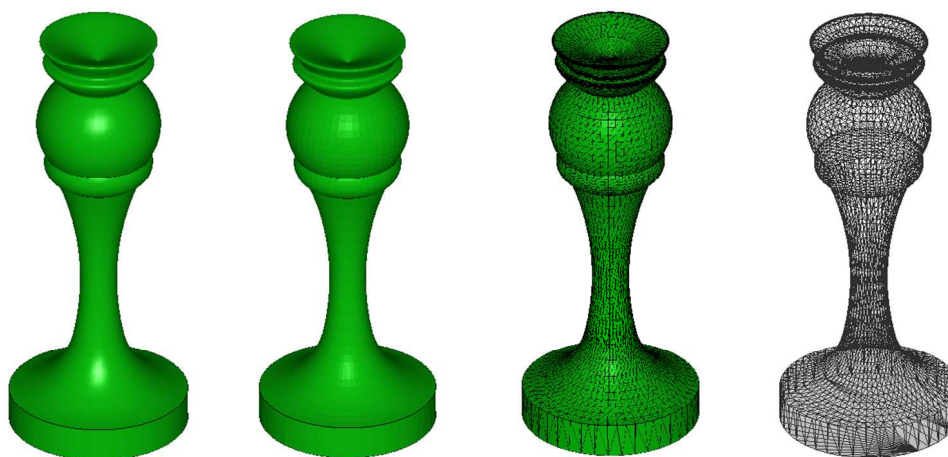
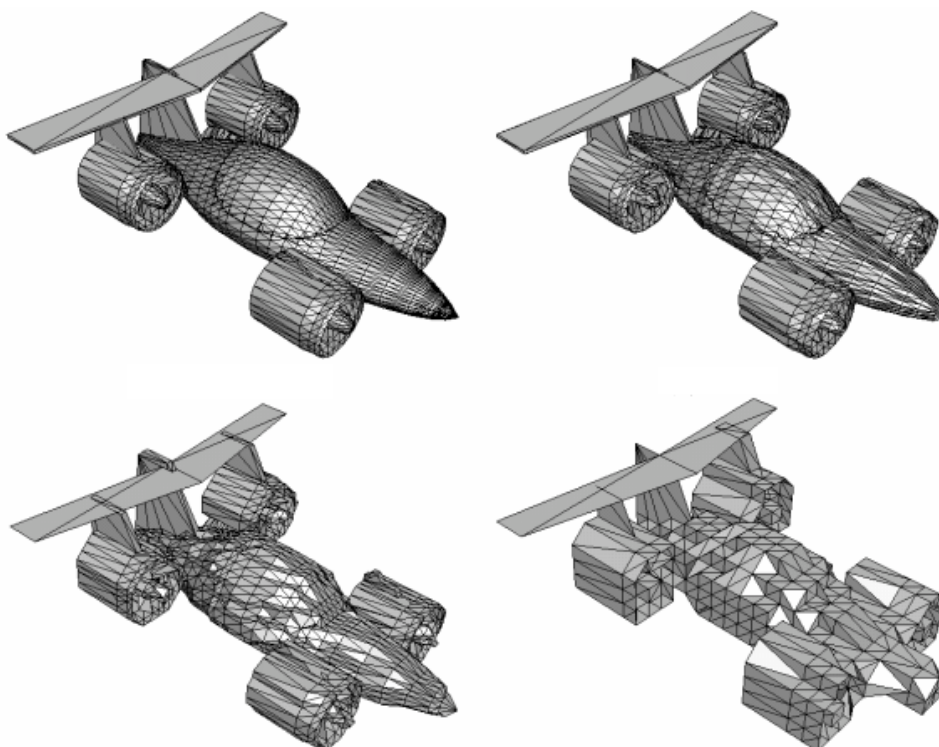


Figura 9. Ejemplo de modelo digital de una pieza en formato STL, con diferentes niveles de discretización, donde se puede observar el grado de reproducción de la geometría original. (Fuente: Barequet y Kaplan (1997)).



4.3. Breve descripción de las principales técnicas de PR aditivas

Las diferentes tecnologías de PR aditivas se diferencian básicamente en el estado del material de partida (líquido, sólido o en forma de polvo) y en el modo que emplean en solidificar la capa que están construyendo en cada instante. Aunque existen diferentes variantes según la tecnología, la clasificación elemental depende del:

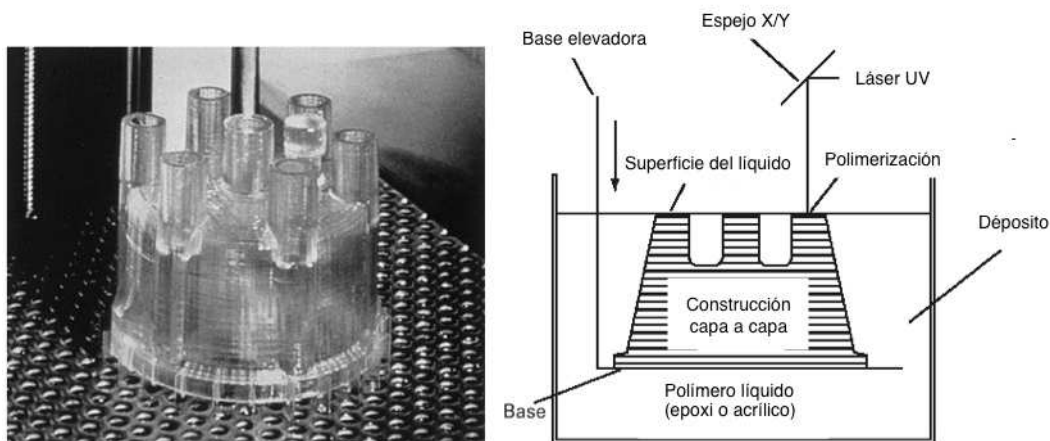
- **Material de partida en estado líquido**, que solidifica por acción de una radiación ultravioleta si se utilizan resinas fotopolimerizables, o por solidificación de un material fundido (bien un termoplástico o bien una cera).
- **Material de partida en estado sólido**, fundamentalmente una lámina de papel o de plástico que se recorta y adhiere a la capa anterior ya fijada.
- **Material de partida en forma de fino polvo**, que adquiere forma sólida por la acción de un aglutinante adhesivo, o bien mediante soldadura térmica por medio de un haz láser de baja potencia.

A continuación, se describen de forma muy resumida las principales tecnologías de PR aditivas existentes en la actualidad, indicándose el acrónimo con la que se la conoce y su nombre en inglés. Todas ellas conforman las capas según el plano X-Y, la primera directamente sobre una plataforma que, una vez finalizada la capa, desciende en dirección Z para conformar la siguiente.

- **Estereolitografía (SLA, Stereolithography)**. El material de partida es una resina fotopolimerizable en estado líquido, la cual solidifica por la acción de un láser ultravioleta que recorre la superficie del líquido provocando el curado de la resina según la geometría a definir en cada capa. Fue la primera técnica

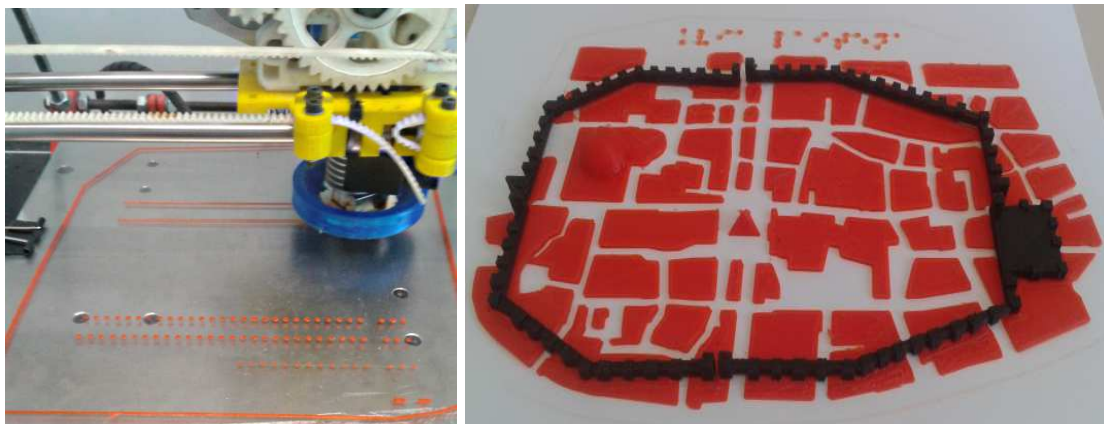
desarrollada, y tiene bastante precisión, pero presenta limitaciones en las prestaciones del material utilizado, siendo el equipo y el consumible bastante costosos (v. Fig. 10).

Figura 10. Esquema de funcionamiento de la técnica de Estereolitografía. (Fuente: DeGarmo, Black y Kohser (2003)).



- **Sinterización selectiva por láser (SLS, *Selective Laser Sintering*)**. El material de partida es un termoplástico (generalmente poliamida o nailon) en forma de polvo muy fino, el cual solidifica por la acción de un láser de CO₂ que recorre la superficie del polvo aplicando calor y provocando la soldadura de los gránulos de polvo según la geometría a definir en cada capa. Fue la segunda técnica desarrollada, tiene buena precisión y las piezas resultantes son muy resistentes, lo que permite ser utilizadas directamente, pero la superficie es muy rugosa, siendo el equipo y los costes de explotación muy elevados.
- **Modelado por deposición de hilo fundido (FDM, *Fused Deposition Modeling*)**. El material de partida es un termoplástico (ABS o PLA) en forma de hilo (o pastillas que se trituran, o bolitas de granza) que se funde y se extruye a través de una boquilla según la geometría a definir en cada capa, solidificando posteriormente (v. Fig. 11). Los equipos industriales tienen buena precisión, las piezas resultantes son bastante resistentes, lo que permite ser utilizadas directamente, y el acabado es bueno, siendo el equipo y los costes de explotación contenidos. En este grupo se incluyen los equipos de bajo coste tipo RepRap, comentados anteriormente.

Figura 11. Imagen con equipo FDM (tipo RepRap) en funcionamiento construyendo un plano táctil, y ejemplo de plano táctil del Barri Gòtic y muralla romana de Barcelona realizado con esta tecnología.



- **Impresión en 3D con polvo y aglutinante (3DP, 3D Printing).** El material de partida es un polvo muy fino, de un tipo de escayola o de ciertos plásticos, y un cabezal, semejante al de una impresora de inyección de tinta. Este último va depositando minúsculas gotas de un aglutinante o adhesivo que consolida el polvo según la geometría a definir en cada capa. Tiene una precisión aceptable, las piezas resultantes son bastante frágiles, lo que restringe su uso a modelos y patrones, y el acabado es muy rugoso, siendo el equipo y los costes de explotación bastante asequibles. Es la única técnica que permite obtener piezas con policromía (v. Fig. 12), y es, junto con la FDM, la que más se utiliza en la actualidad.

Figura 12. Imagen de plano táctil realizado con un equipo de impresión en 3D con polvo y aglutinante, en el que se observa la posibilidad de policromía de esta técnica y la rugosidad de la superficie resultante.



Además de las técnicas descritas anteriormente, existen otras con un uso más reducido, aunque imprescindibles en determinados ámbitos de aplicación. No obstante, se considera que para la aplicación en gráficos táctiles son menos

apropiadas y se omiten por brevedad. A título indicativo, destacarían la técnica «Fabricación por láminas recortadas» (LOM, *Laminated Object Manufacturing*), que utiliza delgadas láminas de papel o de plástico recortadas mediante un láser o una cuchilla y pegadas una sobre otra; la «Impresión por Cambio de Fase de Fotopolímero» (*Polyjet*), que, con un cabezal similar a la 3DP, deposita una resina fotosensible que polimeriza con una lámpara de luz ultravioleta situada en el propio cabezal; y la de «Modelado Multiboquilla» (MJM, *Multi-Jet Modeling* o *Thermojet*), que también utiliza un cabezal multiinyector, pero depositando minúsculas gotas de cera fundida, siendo su uso de interés en la obtención de modelos para microfusión en joyería.

5. Repensando los elementos conceptuales de diseño, el volumen como expresión de la tridimensionalidad

5.1. Los elementos conceptuales de las composiciones gráficas

En otro orden de cosas, conviene comentar cuáles son los elementos conceptuales que componen un gráfico tangible y observar que, mediante las técnicas descritas, prácticamente no existen limitaciones de reproducción. Así, es bien conocido, gracias a la literatura existente, que los componentes para diseñar un gráfico táctil son tres: puntos, elementos lineales y texturas (o elementos superficiales) (Amick, Corcoran, Hering y Nousanen, 2002; Bentzen y Marston, 2010; Bertin, 1981; Vasconcellos, 1993). Además, obviamente, de los elementos tipográficos o textuales: en este caso, el código de lectoescritura braille o macrotipos contrastados para las personas con resto visual.

En realidad, los tres elementos conceptuales citados son los que componen cualquier gráfico visual sobre un soporte bidimensional, y, por lo tanto, provienen de un origen plano sin necesidad de ser tangibles, es decir, de poder ser percibidos mediante el sentido del tacto. Con estos elementos se compone una obra pictórica, un cartel, pero también un plano cartográfico (v. *Fig. 13*) o un gráfico matemático, entre otros.

Figura 13. Plano cartográfico de América del Sur en el que se aprecia el uso de elementos lineales en relieve delimitando los contornos del continente y las fronteras entre países, así como símbolos puntuales señalando las capitales de estos y etiquetas, con referencias a la leyenda, realizadas en código braille.

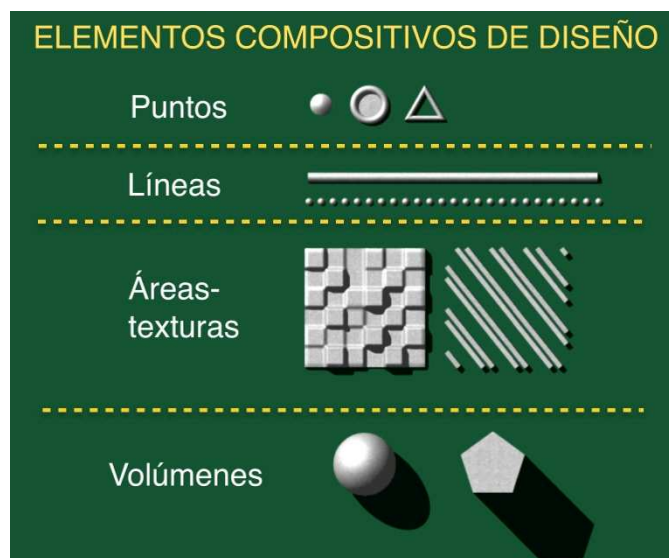


Estos elementos, además, dentro del ámbito de los contenidos y cuando es necesario que denoten un significado concreto, son tratados como señales, a modo de símbolos que, en el caso de los planos táctiles, puede interpretarse su relación con el contenido mediante el uso de una leyenda que clarifique su correspondencia. Así, suelen expresar unos determinados significados: por ejemplo, los elementos conceptuales lineales en un gráfico tangible delimitan contornos de figuras o expresan direcciones en forma de calles, caminos o ríos en planos de movilidad. Las texturas abarcan áreas más extensas, y sus límites no dejan de ser conceptualmente un conjunto de líneas o una línea cerrada cuyo interior alberga la propia textura. Los puntos en relieve marcan contenidos concretos y puntuales, como la ubicación de un hito en un plano táctil, o el centro de una circunferencia, por ejemplo, en un gráfico tangible que trate de mostrar aspectos geométricos. En cualquier caso, como sucede en el propio lenguaje, la relación entre significado y significante, es decir, entre contenido y continente, es arbitraria, y, en este caso, todavía más azarosa si cabe, ya que sin un uso normalizado de este código que relaciona el relieve con los contenidos de los elementos representados, la decisión final de uso y correspondencia recae en el proyectista o diseñador del gráfico tangible. Esto implica que la traducción de un gráfico de este tipo es susceptible de ser interpretada o traducida por el diseñador, con cualquiera de los elementos compositivos nombrados, de un modo libre, pudiendo crear para un mismo significado y mensaje distintas versiones tangibles.

5.2. El volumen

La realidad tangible, sin embargo, además de los tres elementos anteriormente nombrados, se completa con un cuarto elemento: el volumen, que se cita como «ingrediente» compositivo en arquitectura o diseño de producto (Ching, 2005; Wong, 1986) (v. *Fig. 14*). Este cuarto elemento parece escasamente empleado y tratado en el área de los gráficos tangibles, más aún teniendo en cuenta que un relieve es, por definición, un hecho volumétrico y, por lo tanto, perceptible al tacto.

Figura 14. Esquema gráfico de los cuatro elementos de composición en diseño y arquitectura.

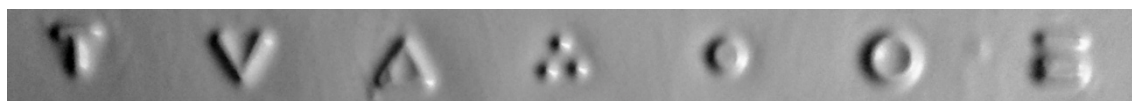


Llegados a este punto, es necesario detenerse y prestar atención a que en el proceso de traducción de un gráfico tangible puede producirse un sesgo importante al obviar la riqueza de matices que el volumen puede proporcionar al tacto, en términos de legibilidad, memorización, discriminación y contraste de altura. Atender únicamente a los elementos conceptuales «bidimensionales» es un procedimiento rápido y cómodo, y, la mayoría de las veces, suficientemente eficiente para que el usuario con discapacidad visual pueda acceder a la información gráfica y comprenderla. Sin embargo, los autores de este análisis consideran que existe margen de mejora en la usabilidad de estos dispositivos táctiles si se piensa, además de en términos de traducción bidimensional al relieve, en las posibilidades que el volumen, en toda su extensión, puede proporcionar al tacto, y que desde las técnicas de PR es posible generar prácticamente sin limitaciones.

Para ser más claros, es conveniente ilustrar estos comentarios con un ejemplo: un punto dentro de un gráfico tangible puede representarse de diversas maneras, existen recomendaciones de diseño que tratan la adecuación de los contenidos a formas en relieve concretas. Normalmente, estas recomendaciones están contrastadas en cuanto a su nivel de errores debido a confusiones, por la complejidad de la forma, por su tamaño inadecuado, por su similitud con los elementos vecinos, por el exceso de elementos y su dificultad para memorizarlos, etc. Por lo que el interesado en realizar un gráfico tangible podrá seleccionar, por ejemplo, de entre estos puntos de la imagen (v. *Fig. 15*), aquellos que considere oportunos, atendiendo a que sean fácilmente perceptibles mediante exploración

háptica y a que, entre ellos, no hayan posibilidades de confusión, es decir, que se discriminen al tacto.

Figura 15. Diferentes puntos termoconformados discriminables al tacto.



Pero, ¿qué pasaría si en términos conceptuales pudiésemos extender este rango de componentes táctiles atendiendo además a atributos volumétricos?

Se podría pensar que se añadiría mayor complejidad al aumentar los elementos, pero en la realidad no sucede necesariamente así, siempre y cuando se empleen geometrías simples, fácilmente discriminables y memorizables al tacto (Gual, Puyuelo, y Lloveras, 2013; Gual, Puyuelo y Lloveras, 2014). En el caso del punto, se puede materializar esta idea, la de emplear volumen, mediante una esfera, un cilindro, una pirámide, por citar solo algunos elementos tangibles que ya han sido contrastados en experimentos de usabilidad (v. Fig. 11), en lugar de una forma bidimensional elevada. Al igual que es poco probable confundir cualquiera de las categorías compositivas del gráfico tangible entre ellas —es decir, es difícil confundir una línea con un punto o un área—, también es cierto que es difícil confundir una forma volumétrica con un punto, una línea y una textura, y este es el principal argumento para emplear combinadamente todos los recursos compositivos tangibles, los relieves de naturaleza bidimensional y los elementos volumétricos, ya que estos últimos no añaden complejidad, sino que aumentan los matices y los atributos táctiles, entre los que destaca el contraste de altura para facilitar una información jerarquizada mediante multiniveles (Gardiner y Perkins, 2002) y formas, y, de esta manera, facilitar la distinción inmediata de estos elementos táctiles.

En resumen, emplear un abanico más amplio de símbolos discriminables al tacto, es decir, de elementos compositivos de un gráfico tangible, implica aumentar la «paleta» de posibilidades de selección para el diseñador de estos productos.

Bien, todo este argumentario no tendría sentido si se hablase de producir gráficos tangibles mediante sistemas de fabricación como el *embossed* o el microencapsulado. Sin embargo, mediante termoconformado o técnicas de PR es posible desarrollar geometrías volumétricas complejas y muy variadas, y también discriminables al tacto. En cualquier caso, los sistemas mencionados presentan sus limitaciones y sus ventajas, y entre ellos existen diferencias que no son objeto de este estudio exponer. En este artículo se pretende poner en valor las técnicas de PR por su futuro prometedor y por su utilidad contrastada para representar gráficos tangibles con eficacia y a un precio razonable, ya que con estas técnicas es posible producir de manera sencilla formas volumétricas que ayuden a mejorar la usabilidad de los gráficos tangibles.

6. Algunas experiencias en el uso de estas técnicas

Para terminar este texto, es imprescindible señalar algunas experiencias que hacen eco del empleo de la Impresión 3D en el mundo de la discapacidad visual. Dentro de

este campo es posible intuir sus posibilidades como herramienta para desarrollar recursos táctiles personalizados, o en series cortas. Aunque también es posible desarrollar piezas de evaluación para posteriormente fabricarlas con sistemas más robustos o en series de mayor tirada. Los últimos desarrollos de este tipo de técnicas permiten, además, imprimir materiales variados, entre los que se encuentran la cerámica y distintos tipos de metales capaces de reproducir gráficos en relieve más resistentes y duraderos.

Una de las primeras experiencias documentadas en las que se empleaba la técnica de Prototipado Rápido para desarrollar recursos educativos para personas con discapacidad visual fue realizada por Skawinski y su equipo (Skawinski, Busanic, Ofsievish, Luzhkov, Venanzi y Venanzi, 1994). En esta experiencia pionera se reprodujeron moléculas químicas en tres dimensiones para su uso como recurso táctil capaz de exponer la estructura de estas a usuarios con discapacidad visual. La técnica empleada en esa ocasión fue la estereolitografía láser, y los autores apuntaban a que debía mejorarse el coste del empleo de esta técnica para hacer más extensivo su uso, principalmente a instituciones con pocos recursos.

También dentro del campo científico, uno de los primeros trabajos realizados sobre la temática de los gráficos tangibles y las técnicas de Prototipado Rápido es el de un equipo de ingenieros de la Universidad de Maryland en EE. UU., que, en 1996, demostró que la técnica de estereolitografía era más eficiente a la hora de producir un molde para realizar posteriormente gráficos termoconformados que mediante un fresado con control numérico (CN). Tanto el tiempo como el coste se redujeron al emplear esta novedosa técnica. Sin embargo, ya entonces los autores de este estudio advertían de que aún era necesario un mayor arraigo en la industria de la cultura del prototipado, ya que esta no terminaba de ver la relación de inversión-retorno de este tipo de fabricación (Zhang, Richardson, Surana, Dwornik y Schmidt, 1997).

Dentro del campo de la arquitectura se han realizado diversos estudios. En 2006, Andreas Voigt y Bob Martens, de la facultad de arquitectura de la Vienna University of Technology, presentaron en Grecia, dentro de unas conferencias sobre educación y nuevas tecnologías, un estudio preliminar realizado con maquetas táctiles arquitectónicas producidas mediante Impresión 3D. La gran cantidad de edificios digitalizados del patrimonio arquitectónico podría facilitar en un futuro, según los autores, un incremento de las maquetas táctiles orientadas a todos los públicos, pero, especialmente, a personas con discapacidad visual. Con ellas se facilita la comprensión de la estructura del espacio arquitectónico construido y también la experiencia real posterior en él (Voigt y Martens, 2006).

También dentro del área de la arquitectura y el urbanismo, uno de los trabajos pioneros en emplear técnicas de PR para ayudar a personas con discapacidad visual es el realizado en 2007 desde la Universidad de Campinas, en Brasil, por Gabriela Celani y Luís Fernando Milan. Estos autores reprodujeron un entorno arquitectónico interior en nailon mediante la técnica de SLS. El trabajo empleó metodologías cualitativas mediante las que se recogían las impresiones de los participantes voluntarios, que, en este caso, fueron positivas y esperanzadoras (Milan y Celani, 2008).

Siguiendo el sentido cronológico, en 2009 un equipo de profesores del ámbito de la geoinformática y de la pedagogía en la Palacký University Olomouc de la República Checa, experimentaron con impresión 3D y planos táctiles, con el fin de sondear si se podía mejorar la comprensión espacial en un grupo de personas con discapacidad visual. Este equipo ya pronosticaba entonces las posibilidades de aplicación en diferentes ámbitos, desde el educativo hasta la administración pública, y su efecto de paliar la ansiedad o el miedo para hacer frente a espacios desconocidos o nuevos. En este estudio se concluyó que las técnicas de Prototipado Rápido permitían realizar planos y maquetas táctiles, y que, además, se podía hacer con cierto nivel de detalle o de síntesis en función de las necesidades de cada caso. A pesar de ello, ya se advertía, entre otros aspectos, cierta preocupación por realizarlos con un coste razonable (Voženílek, Kozáková, Štávová, Ludíková, Růžičková y Finková, 2009).

Recientemente, desde el ámbito de la informática gráfica, profesores de las universidades de Washington y Maryland, han desarrollado una herramienta informática denominada *VizTouch* que ayuda a generar imágenes táctiles automáticas de gráficos matemáticos a partir de la introducción de la ecuación correspondiente. La técnica de deposición de hilo (FDM), cuyo coste es asequible y su tecnología abierta, fue la empleada en este caso, en el que se reprodujeron piezas táctiles en, entre otros materiales, plástico ABS, que, además, fueron validadas por un grupo de usuarios con discapacidad visual (Brown y Hurst, 2012). En este mismo ámbito informático, otros investigadores austriacos desarrollan el marco teórico necesario para tratar de traducir imágenes de fondos de museos al relieve. Estos autores apuntan las ventajas de las técnicas aditivas de fabricación frente al control numérico (CN), a pesar de las limitaciones en tamaño y tiempo de ejecución, entre otras, que presentan las técnicas de fabricación aditiva (Reichinger, Neumüller, Rist, Maierhofer y Purgathofer, 2012). En este sentido, no son los únicos que tratan este aspecto de producir imágenes en relieve de manera automática. En la Universidad de Florencia, en Italia, trabajan en el desarrollo de un método de interpretación automática para generar traducciones tangibles de obras de arte denominado *T-Vedo*. Mediante el método que emplean estos autores, una imagen pictórica puede ser interpretada en volumen mediante un determinado *software*, posteriormente se puede imprimir esta interpretación en relieve en cualquiera de los sistemas de Prototipado Rápido que se desee (Volpe, Furferi, Governi y Tennirelli, 2014).

En el ámbito nacional, es interesante destacar el trabajo llevado a cabo desde la Universitat Jaume I —en colaboración con la Universitat Politècnica de València y la Universitat Politècnica de Catalunya— con diversas experiencias positivas en el ámbito de los planos táctiles producidos mediante impresión 3D (Gual, Puyuelo, Lloveras, y Merino, 2012; Gual, Puyuelo y Lloveras, 2013; Gual, Puyuelo y Lloveras, 2014).

Por otro lado, más allá del ámbito puramente científico y de la literatura publicada, existen numerosas experiencias de distintas instituciones en las que se muestra un interés emergente por aprovechar las posibilidades que las técnicas de impresión en 3D ofrecen a diseñadores, educadores y profesionales del sector de la discapacidad visual. En el año 2009, la Organización Nacional de Ciegos Españoles (ONCE) en

su Centro de Investigación, Desarrollo y Aplicación Tiflotécnica (CIDAT) ya se hacía eco de los resultados obtenidos con una máquina de impresión 3D. Entre otros productos, habían creado un sudoku con la numeración en braille, aunque lo que realmente se reconocía con esta experiencia era la posibilidad de mejorar, en cuanto a la creación de ayudas técnicas para personas con discapacidad y a la creación de prototipos de evaluación más robustos que los tradicionales. En este sentido, a nivel internacional, también cabe destacar el proyecto de la organización californiana sin ánimo de lucro Benetech, que, con financiación del Institute of Museum and Library Services, explora y desarrolla materiales educativos accesibles del ámbito de la ciencia, la tecnología, la ingeniería y las matemáticas para producirlos mediante impresión 3D, generando una librería para educadores e interesados en la materia.

7. Conclusiones

Como se puede apreciar, ya son bastantes las experiencias llevadas a cabo dentro de la temática de la fabricación mediante técnicas aditivas y de los gráficos y maquetas accesibles. Sin embargo, se intuye que esto solo es el principio de un fenómeno que irá creciendo en los próximos años hasta llegar a soluciones y productos que tal vez hoy ni siquiera intuimos. Las aplicaciones educativas ya se encuentran contrastadas en diversas experiencias que aquí se han tratado de abordar. Esperamos que el ciclo que se inicia ahora con estos nuevos sistemas de fabricación mejore la calidad de vida de las personas con discapacidad visual en cualquiera de sus ámbitos.

Por otro lado, las posibilidades de emplear sin restricciones los elementos de diseño volumétrico con técnicas de PR, además de los ya comúnmente utilizados de carácter bidimensional, proporciona al diseñador y productor de gráficos tangibles un mayor abanico de selección de elementos discriminables al tacto, hecho que debería influir en la mejora de la usabilidad de estos productos.

Por último, como ya se ha comentado, estas técnicas se encuentran en plena evolución y su coste es cada vez más asequible. En este contexto, dentro de los ámbitos que afectan a los estudios de personas con discapacidad visual, parece adecuado tenerlas presente como instrumentos para la creación de prototipos y piezas en fase de evaluación, pero también como sistemas para generar recursos personalizados para personas con discapacidad visual.

Referencias

- Amick, N. S., Corcoran, J. M., Hering, S., y Nousanen, D. (2002). *Tactile graphics kit. Guidebook*. Louisville, EE. UU.: American Printing House for the Blind, Inc.
- Barequet, G., y Kaplan, Y. (1997). [A data front-end for layered manufacturing](#) [archivo PDF]. En: SCG '97: *Proceedings of the Thirteenth Annual Symposium on Computational Geometry*, pp. 231-239. Nueva York: Association for Computing Machinery.
- Bentzen, B. L., y Marston, J. R. (2010). Teaching the use of orientation aids for orientation and mobility. En: W. R. Wiener, R. L. Welsh, y B. B. Blasch (eds.), *Foundations of orientation and mobility* (3.^a ed., vol. II, pp. 315-351). Nueva York: American Foundation for the Blind.

- Bertin, J. (1981). *Graphics and graphic information processing*. Berlín, Nueva York: Walter de Gruyter.
- Blano-Zárate, L. B. (2006). [Elaboración de planos en papel de microcápsulas: planos de Internet modificados con Microsoft Word](#) [archivo ZIP]. *Integración: revista de ceguera y deficiencia visual*, 48, 25-37.
- Blasch, B. B., Wiener, W. R., y Welsh, R. L. (1997). *Foundations of orientation and mobility*. Nueva York: AFB Press.
- Brown, C., y Hurst, A. (2012). VizTouch: automatically generated tactile visualizations of coordinate spaces. En: S. N. Spencer (ed.), *TEI '12, Proceedings of the Sixth International Conference on Tangible, Embedded and Embodied Interaction*, pp. 131-138. Nueva York: Association for Computing Machinery.
- Ching, F. D. K. (2005). *Arquitectura: forma, espacio y orden*. Barcelona: Gustavo Gili.
- Dacen-Nagel, D. L., y Coulson, M. R. C. (1990). Tactual mobility maps: a comparative study. *Cartographica*, 27(2), 47-63.
- DeGarmo, E. P., Black, J. T. y Kohser, R. A. (2003), *Materials and processes in manufacturing*. Hoboken, NJ: Wiley.
- Edman, P. (1992). *Tactile graphics*. Nueva York: American Foundation for the Blind.
- Gardiner, A., y Perkins, C. (2002). [Best practice guidelines for the design, production and presentation of vacuum formed tactile maps](#) [página web]. *Tactile Diagrams Maps and Pictures Conference*.
- Gual, J., Puyuelo, M., y Lloveras, J. (2013). Improving tactile map usability through 3D printing techniques: an experiment with new tactile symbols. *The Cartographic Journal*, publicado en línea.
- 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., Lloveras, J., y Merino, L. (2012). Visual impairment and urban orientation: pilot study with tactile maps produced through 3D printing. *Psycology: Ambiental-Bilingual Journal of Environmental Psychology*, 3(2), 239-250.
- Milan, L. F., y Celani, M. G. C. (2008). [Maquetes táteis: infográficos tridimensionais para orientação espacial de deficientes visuais](#) [archivo PDF]. *Pesquisa em Arquitetura e Construção*, 1(2), 1-26.
- Pike, E., Blades, M. y Spencer, C. (1992). A comparison of two types of tactile maps for blind children. *Cartographica*, 20(3-4), 83-88.
- Reichinger, A., Neumüller, M., Rist, F., Maierhofer, S., y Purgathofer W. (2012). Computer-Aided Design of Tactile Models. En: K. Miesenberger, A. Karshmer, P. Penaz y W. Zagler (eds.), *Computers helping people with special needs, 13th International Conference ICCHP 2012*, pp. 497-504. Berlín: Springer Verlag.
- Rowell, J., y Ungar, S. (2004). El mundo del tacto: estudio internacional sobre mapas en relieve; parte 1: producción. *Entre dos mundos: revista de traducción sobre discapacidad visual*, 3, 5-14.
- Skawinski, W. J., Busanic, T. J., Ofsievich, A. D., Luzhkov, V. B., Venanzi, C. A., y Venanzi, T. J. (1994). [The use of laser stereolithography to produce three-dimensional tactile molecular models for blind and visually impaired scientists and students](#) [página web]. *Journal of Information Technology and Disabilities*, 1(4).

- Ungar, S., Jehoel, S., McCallum, D., y Rowell, J. (2005). «Tactualization» of spatial information: towards a perceptual-cognitive approach to tactile map design. En: *XXII International Cartographic Conference*, p. 273 (solo resumen). La Coruña: Comité Organizador ICC 2005.
- Vasconcellos, R. (1993). *A cartografia tátil eo deficiente visual: Uma avaliação das etapas de produção e uso do mapa*. Tesis sin publicar. São Paulo: Universidade de São Paulo.
- Voigt, A., y Martens, B. (2006). [Development of 3D tactile models for the partially sighted to facilitate spatial orientation](#) [archivo PDF]. In: *Communicating Space(s): 24th eCAADe Conference Proceedings*, pp. 366-370. Volos (Grecia): University of Thessaly.
- Volpe, Y., Furferi, R., Governi, L., y Tennirelli, G. (2014). Computer-based methodologies for semi-automatic 3D model generation from paintings. *International Journal of Computer Aided Engineering and Technology*, Vol. 6 (1).
- Voženílek, V., Kozáková, M., Štávová, Z., Ludíková, L., Růžičková, V., y Finková, D. (2009). [3D printing technology in tactile maps compiling](#) [archivo PDF]. En: *Proceedings of the 24th International Cartographic Conference*. Santiago de Chile: International Cartographic Association.
- Wong, W. (1986). *Fundamentos del diseño bi y tri dimensional*. Barcelona: Gustavo Gili.
- 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 y M.^a Jesús Mañez Pitarch. Departamento de Ingeniería de Sistemas Industriales y Diseño. Universitat Jaume I, Campus Riu Sec, s/n; 12071 Castellón (España).

Correo electrónico: igual@uji.es.