

**UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID**

**FACULTAD DE BELLAS ARTES**



**TESIS DOCTORAL**

**Procesos digitales y sistemas de prototipado rápido aditivos aplicados a la creación escultórica de pequeño formato y relieves**

MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR

PRESENTADA POR

**José Carlos Espinel Velasco**

Directora

**Elena Blanch González**

**Madrid, 2016**



UNIVERSIDAD  
**COMPLUTENSE**  
MADRID

PROCESOS DIGITALES Y SISTEMAS DE PROTOTIPADO  
RÁPIDO ADITIVO APLICADOS A LA CREACIÓN  
ESCULTÓRICA DE PEQUEÑO FORMATO Y RELIEVES

Autor: José Carlos Espinel Velasco  
Directora: Dr. Dña Elena Blanch González

FACULTAD DE BELLAS ARTES





UNIVERSIDAD  
**COMPLUTENSE**  
MADRID

PROCESOS DIGITALES Y SISTEMAS DE PROTOTIPADO  
RÁPIDO ADITIVO APLICADOS A LA CREACIÓN  
ESCULTÓRICA DE PEQUEÑO FORMATO Y RELIEVES

Autor: José Carlos Espinel Velasco  
Directora: Dr. Dña Elena Blanch González

FACULTAD DE BELLAS ARTES  
MADRID, 2015



A Laura, Adriana, Claudia y Gabriela.

La fuerza y luz de mi vida.



## AGRADECIMIENTOS

A Elena Blanch:

Por guiarme en todos estos años, por enseñarme que arte y tecnología están íntimamente ligados y por su apoyo en todo momento. El mundo del arte necesita más personas como tú, abiertas, sin prejuicios y capaces de abrazar las oportunidades cuando todavía no están ahí.

A mis padres:

Por enseñarme el valor del esfuerzo y del trabajo.

A Laura:

Por estar ahí para mí, por tu incansable actitud ante la vida, por no dejarme tirar la toalla y por ayudarme a diario. Sin tu determinación y tu constante apoyo no lo habría conseguido. Gracias, por sacar siempre lo mejor de mí y por acompañarme siempre.



# ÍNDICE

0. ABSTRACT	15
1. INTRODUCCIÓN	25
1.1. LA PRODUCCIÓN ESCULTÓRICA EN LA ÉPOCA DE LA VIRTUALIDAD	25
1.2. LA IMAGEN INFOGRÁFICA	28
1.3. NUEVAS POSIBILIDADES	30
1.4. CONCLUSIÓN	33
2. OBJETIVOS	34
3. LAS TECNOLOGÍAS DIGITALES	41
3.1 SISTEMAS CAD/CAM	42
3.2. LOS GRÁFICOS TRIDIMENSIONALES POR ORDENADOR	42
3.3. ANTECEDENTES	43
4. EL TALLER DEL ARTISTA DIGITAL	51
4.1. LAS HERRAMIENTAS	52
4.2. EL SOFTWARE	52
4.3. ESCÁNERES 3D	54
4.4. REALIDAD AUMENTADA	56
4.5. CONCLUSIÓN	57
5. PROCESOS DE PRODUCCIÓN 3D	59
5.1 PROTOTIPADO RÁPIDO	59
5.2. EL PROCESO BÁSICO	61
5.3. VENTAJAS GENERALES DE LOS PROCESOS ADITIVOS	64
5.4. REQUERIMIENTOS DEL MODELO 3D PARA IMPRESIÓN	65
5.4.1. Manifold objects	65
5.4.2. Normales	65
5.4.3. Grosor de las paredes	66
5.4.4. Detalle de superficie	66

5.4.5. Tamaño máximo	66
5.4.6. Agujeros de vaciado	67
5.4.7. Resolución del archivo	67
5.5. SINTERIZADO LÁSER SELECTIVO (SLS)	68
5.5.1. El proceso	68
5.5.1. Materiales	71
5.6. ESTEREOLITOGRAFÍA	76
5.6.1. El proceso	76
5.6.2. Resolución	78
5.6.3. Materiales	78
5.6.5. Características	79
5.7. FUSED DEPOSITION MODELING FDM	84
5.7.1. Proceso	84
5.7.2. Resolución	86
5.7.3. Proyecto RepRap	89
5.7.4. Gran formato	90
5.7.5. Fused deposition modeling of metals	90
5.7.6. Características	91
5.8. IMPRESIÓN 3D POR INYECCIÓN: 3D inkjet printing	94
5.8.1. Proceso	94
5.8.2. Resolución	96
5.8.3. Color Jet Printing (CJP)	96
5.8.4. Materiales	97
5.8.5. Ventajas del procedimiento	97
5.9. INYECCIÓN DE FOTOPOLÍMEROS	98
5.9.1. Proceso	99
5.9.2. Materiales	100
5.9.3. Color	100
5.9.4. Acabados	102
5.9.5. Beneficios	102
5.10. Conclusiones	103

<b>6. IMPRESIÓN DE MODELOS TRIDIMENSIONALES</b>	<b>105</b>
6.1. EL MODELO DE BULTO REDONDO	105
6.2. EL MODELO DE RELIEVE	108
6.3. CARACTERÍSTICAS DE LAS MUESTRAS	108
6.4. MUESTRAS	109
6.5. CONCLUSIONES	155
<b>7. EL RELIEVE: DE LA IMAGEN 2D AL MODELO 3D</b>	<b>159</b>
7.1. BUMP MAPPING Y DISPLACEMENT MAPPING	159
7.1.1. Texture mapping	159
7.1.2. Bump mapping	161
7.1.3. Displacement mapping	161
7.1.4. Mapa de niveles: Imagen en escala de grises	162
7.2. MODELADO DE RELIEVES Y MEDALLAS A PARTIR DE MAPAS DE DESPLAZAMIENTO	164
7.3 ACERCAMIENTO Y PRIMEROS PASOS	168
7.4 METODOLOGÍA	171
7.5 FORMATO Y RESOLUCIÓN DE LA IMAGEN	183
7.6. APLICACIÓN DEL MAPA DE DESPLAZAMIENTO	186
7.7. PRODUCCIÓN DE LAS MUESTRAS	191
7.8. CONCLUSIONES	197
<b>8. CONCLUSIONES</b>	<b>201</b>
<b>9. BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>205</b>
<b>ANEXO: Fichas técnicas de materiales</b>	<b>211</b>



“El gran libro de la naturaleza está  
escrito en símbolos matemáticos”.

Galileo Galilei.



# 0. ABSTRACT

DIGITAL AND RAPID PROTOTYPING PROCESSES APPLIED TO THE CREATION OF SMALL FORMAT SCULPTURES AND RELIEFS

## 0.1. INTRODUCTION

Art history is, indeed, linked to technological development. Sculpture is an artistic discipline that has been present throughout the history of mankind, from the handmade Venus figurines to contemporary sculptures made with digital technology. These latter are the main subject of this thesis.

The twentieth century has seen the emergence and rapid development of what we call computer science. The development of this technology is given by its potential primarily in the field of engineering but it is wrong not to think that the development of computer science is only due to the intellect of engineers and scientists. Nevertheless, artists have been involved as well throughout the development of computer graphics, playing a very important part in the birth and evolution of three-dimensional modeling systems.

Since Charles Babagge defined the digital computer in the late nineteenth century, computer science has evolved at a dizzying pace.

PROCESOS DIGITALES Y SISTEMAS DE PROTOTIPADO RÁPIDO ADITIVO APLICADOS A LA CREACIÓN ESCULTÓRICA DE PEQUEÑO FORMATO Y RELIEVES

## 0.1. INTRODUCCIÓN

La historia del arte está inevitablemente ligada al desarrollo tecnológico. La escultura es una disciplina artística que ha estado presente en toda la historia de la humanidad, desde las venus paleolíticas hechas a mano, hasta esculturas contemporáneas realizadas con tecnologías digitales. Estas últimas son el tema principal de esta tesis.

El siglo XX ha sido testigo de la aparición y el desarrollo de la informática. El desarrollo de esta tecnología se debe, fundamentalmente, a su potencial sobre todo en el campo de la ingeniería, pero es un error pensar que el desarrollo de la informática se debe sólo a ingenieros y científicos. Los artistas han participado en todo el desarrollo de los gráficos por ordenador, jugando un papel muy importante en el nacimiento y la evolución de los sistemas de modelado en tres dimensiones.

Desde que Charles Babagge conceptualizara la computadora a finales del siglo XIX, la informática ha evolucionado a un ritmo vertiginoso.

New technologies allow the sculptural creation by means of a computer, offering different creative possibilities that we can classify in three groups: creation, exhibition and conservation.

In regard to creation, new technologies offer us a wide range of opportunities. From this point of view of aesthetics, we can speak of new technologies as mere tools, like a chisel or a gradina.

Computers can be used to model 3D figures, three-dimensional scanners can be used as a preservation method or as a creative tool that allows us to scan an unfinished piece to finish it on the computer, and the three-dimensional printers and other rapid prototyping systems, allow us to translate our virtual creation to the material world. At this point it should be noted that not only the three-dimensional scanner allows exploration and translation of the material world into the virtual three dimensional world. Other tools and methods, like medical technologies, have been used as tools for creating artworks, as is the case of the CAT scan (Computerized Axial Tomography).

Las nuevas tecnologías permiten la creación escultórica por medio de un ordenador, ofreciendo diferentes posibilidades creativas que podemos clasificar en tres grupos: de creación, de exposición y de conservación.

En cuanto a opciones para la creación artística, las nuevas tecnologías ofrecen una amplia gama de posibilidades. Desde el punto de vista de la estética, se puede hablar de las nuevas tecnologías como meras herramientas, como un cincel o una gradina.

Los ordenadores pueden ser utilizados para modelar figuras en 3D, los escáneres tridimensionales se pueden utilizar como método de conservación o como una herramienta creativa con la que podemos escanear una pieza inacabada para terminarla posteriormente en el ordenador, y las impresoras tridimensionales y demás sistemas de prototipado rápido, nos permiten traducir nuestra creación virtual al mundo material. En este punto debe tenerse en cuenta que no sólo el escáner tridimensional permite la exploración y la traducción del mundo material en el mundo tridimensional virtual, otras herramientas y métodos, como es el caso de

Regarding conceptual opportunities, virtual sculptural creation offers possibilities that wouldn't have been possible by means of traditional creation processes. The mere fact of copying or translating reality through a three-dimensional scanner opens a new world of conceptual possibilities that would otherwise not have been possible. For instance, Robert Lazzarini's artwork plays with our perceptual system by opening before us a new dimension to which we can not access.

## 0.2.OBJECTIVES

This work is focused on what is known as rapid prototyping, automated systems by which prototypes or end pieces are made from a three-dimensional CAD model.

These processes can take anywhere from minutes to hours to produce a piece that, otherwise, through conventional systems could take weeks or even months. This processes are also, in general, more economical and allow the manufacture of unique pieces that, otherwise, would have to be manufactured by assembling

tecnologías médicas como el TAC (Tomografía Axial Computarizada), han sido utilizadas como herramientas para la creación de obras de arte.

En cuanto a las oportunidades conceptuales, la creación escultórica virtual ofrece posibilidades que no ofrecen los procesos de creación que entendemos como tradicionales. El simple hecho de copiar o traducir la realidad a través de un escáner en tres dimensiones abre un nuevo mundo de posibilidades conceptuales que de otro modo no hubiera sido posible. En este sentido, las esculturas de Robert Lazzarini juegan con nuestro sistema perceptivo abriendo ante nosotros una nueva dimensión a la que no podemos acceder.

## 0.2.OBJETIVOS

Este trabajo se centra en lo que se conoce como prototipado rápido, los sistemas automatizados por los cuales prototipos o piezas finales se fabrican a partir de un modelo CAD tridimensional.

Estos procesos de fabricación pueden tardar desde minutos hasta horas en crear una pieza que, de otro modo, a través de los sistemas convencionales podría llevar semanas o

several pieces or parts.

The initial objective of these technologies was to prototype faster and cheaper, as it is not necessary to create expensive molds or manufacturing processes to check and analyze a prototype before a big production. Thanks to the wide variety of processes and materials, these technologies are nowadays considered as a manufacturing process not only for prototypes; most of the objects are considered final products. The additive processes are known as rapid prototyping technologies. The terms "rapid prototyping" and "additive manufacturing" are hence used interchangeably when referring to the first one.

This research is not intended to be a compilation of all the processes available in the market, but an explanation of the general and basic procedures. There can be, and indeed will be, developments thereof improvements. There might arise some completely new and unrelated processes to those shown here, but those available today in the market can be classified into the main outline of procedures presented in this work as follows:

#### 1 · Selective Láser Sintering (SLS)

incluso meses. Estos procesos son también, en general, más económicos y permiten la fabricación de piezas únicas que, de lo contrario, tendrían que ser fabricadas mediante el ensamblaje de varias piezas .

El objetivo inicial de estas tecnologías fue la creación de prototipos más baratos y de una manera más rápida, ya que no es necesaria la creación de moldes caros o procesos de fabricación para comprobar y analizar un prototipo antes de una gran producción. Gracias a la amplia variedad de procesos y materiales, estas tecnologías son hoy en día consideradas como procesos de fabricación no sólo para prototipos, ya que la mayoría de los objetos son considerados productos finales.

Los términos "prototipado rápido" y "fabricación aditiva" se utilizan indistintamente, para referirse a la primera.

Esta investigación no pretende ser una recopilación de todos los procesos disponibles en el mercado, sino una explicación de los procedimientos generales y principales. Es posible que surjan algunos procesos completamente nuevos y sin relación con los procesos que se muestran aquí,

- 2 · Stereolithography (SLA)
- 3 · Fused Deposition Modeling
- 4 · 3D inkjet printing
- 5 · Photopolymer jet printing (Multijet / Polyjet)

A research of materials and processes has been performed and documented, studying the fundamental characteristics of each one with the aim of having a consultation paper where artists interested in these production processes can get information to check the systems and materials available on the market .

It has not been possible to get a sample from each process and material available, but there has been done a sample of the most representative systems and materials, performing a total of 22 samples in 17 different materials.

On the other hand, the world of three-dimensional modeling has always focused on the design of the round figures and in this work my intention was to study the possibilities that these technologies open for a an art like reliefs, so fundamental on the evolution of humankind and the record of our history (for instance, Roman Empire reliefs collected victories as Trajan's Column or the Ara Pacis). The result, as shown in Chapter

pero los que están disponibles hoy en el mercado se pueden clasificar de la siguiente forma:

- 1 · Sinterizado selectivo láser (SLS)
- 2 · Estereolitografía (SLA)
- 3 · Modelado por deposición fundida
- 4 · Impresión por inyección de tinta 3D
- 5 · Impresión por inyección de fotopolímero (Multijet / Polyjet)

Se ha realizado una investigación de materiales y procesos, estudiando las características fundamentales de cada uno de ellos con el objetivo de disponer de un documento de consulta donde los artistas interesados en estos procesos de producción puedan obtener información relativa a los sistemas y materiales disponibles en el mercado.

No ha sido posible obtener una muestra de cada proceso y material disponible en el mercado, pero se ha hecho una muestra de los sistemas y materiales más representativos, obteniendo un total de 22 muestras en 17 materias diferentes.

Por otra parte, el mundo del modelado tridimensional siempre se ha centrado en el diseño de las figuras de bulto redondo. En este trabajo la intención

8 has been very satisfying. The work has succeeded in developing a protocol to establish a procedure to create a model of relief from a two-dimensional grayscale image that, when applied as a displacement map converts the three-dimensional mesh into a relief.

For this procedure the study has started from a tool available in virtual modeling programs known as displacement mapping. The aim of the application is to provide volume or dimensional roughness by modifying the model's geometry. It works through a method of height levels: to do so an image in grayscale is used, where different shades of gray represent the different heights in a three-dimensional model. Applying this grayscale image as displacement mapping changes the position of the vertex of the 3d mesh, changing its geometry and getting a real relief.

Displacement mapping creates very complex meshes to handle and it is not suitable for mapping audiovisual productions. Rendering an object composed of many polygons turns out to be a slower process and also the weight of the file is greatly increased, but this tool allows texture volume to be noticed in a piece produced through 3D prototyping methods, since this tool modifies the three-dimensional mesh.

ha sido estudiar las posibilidades que estas tecnologías ofrecen para la creación de relieves, tan fundamentales en la evolución de la humanidad y el registro de nuestra historia. El resultado, como se muestra en el Capítulo 8 ha sido muy satisfactorio. El trabajo ha tenido éxito en el desarrollo de un protocolo para la creación de un modelo de relieve a partir de una imagen bidimensional en escala de grises que, al ser aplicada como un mapa de desplazamiento convierte la malla tridimensional en un relieve virtual.

Para este procedimiento el estudio ha partido de una herramienta disponible en los programas de modelado virtual conocida como "mapa de desplazamiento". El objetivo de esta herramienta es proporcionar volumen o rugosidad a los modelos virtuales mediante la modificación de la geometría del modelo. Funciona a través de un método de niveles de altura que consiste en que los diferentes tonos de gris de una imagen se traducen como diferentes alturas en un modelo tridimensional, y al aplicar esta imagen en escala de grises como mapa de desplazamiento, la posición de los vértices de la malla 3D es modificada, cambiando su geometría. El Mapa de desplazamiento crea mallas muy grandes y complejas de manejar y no

### 0.3.CONCLUSIONS

Research and development of new materials for rapid prototyping systems is in constant evolution and is a field full of possibilities for artists. Perhaps the less developed systems are those working directly with metal like Direct Metal Laser Sintering, from which no sample has been done due to its high price and scarcity of suppliers. However there is a wide range of materials such as different types of resins and plastics that can work with different systems covering a wide range of creative and aesthetic needs.

Artists working with these technologies have a wide range of processes and materials at their disposal that can not only provide an aesthetic element but also can give our work conceptual content. If, for instance, the artist advocates a position or theory of strong environmental ethics, we can use, to defend it, biodegradable and recycled materials that will help us strengthen the message we want to convey.

Quality and production sizes available in the market, define the optimal use of this technologies

es una herramienta adecuada para producciones audiovisuales. La representación de un objeto compuesto por muchos polígonos resulta ser un proceso muy lento y el peso del archivo se incrementa en gran medida, pero, a pesar de esto el Mapa de Desplazamiento es una herramienta ideal para nuestro objetivo, ya que modifica la geometría de la malla tridimensional.

### 0.3.CONCLUSIONES

La investigación y el desarrollo de nuevos materiales y sistemas de prototipado rápido se encuentra en constante evolución y es un campo lleno de posibilidades para los artistas. Tal vez los sistemas menos desarrollados son los que trabajan directamente con el metal como el sinterizado directo de metal por láser, del que no se ha hecho ninguna muestra debido a su alto precio y la escasez de proveedores. Sin embargo, hay una amplia gama de materiales como resinas y plásticos que pueden trabajar con diferentes sistemas cubriendo así una amplia gama de necesidades creativas y estéticas.

Los artistas que trabajan con estas tecnologías tienen a su alcance una amplia gama de procesos

for the creation of small sculptures and reliefs. The process of modeling three-dimensional virtual reliefs has not been widely developed. Based on two-dimensional images in gray scale, and applying them as displacement map that modify the mesh, this work has succeeded in establishing a protocol for creating digital three-dimensional reliefs.

Overall, the work is intended to reflect that the technological development taking place these days is opening unlimited possibilities for the guild of artists, liberating us (to put it in some way) from the material bondage to which we have always been tied.

Traditional artists used to need a studio, a physical space to keep their brushes and paints, in the case of painters, or stones and tools in case of a sculptor. Nowadays it is not essential to have these tools to create and make a technically flawless work, as discussed in Chapter 3 of this work. The artist's workplace has evolved, and so have the tools and even the chances to develop an exceptional career in the art world.

y materiales que no sólo pueden proporcionar un elemento estético sino que también puede dar a nuestro trabajo contenido conceptual.

Por otro lado el proceso de modelado de relieves virtuales tridimensionales no ha sido, hasta ahora, desarrollado en profundidad. Basado en imágenes bidimensionales en escala de grises, la aplicación de estas como mapa de desplazamiento modifica la malla tridimensional, obteniendo un relieve. Con este trabajo se ha logrado establecer un protocolo para la creación de relieves digitales tridimensionales mediante el uso de esta herramienta.

Esta investigación pretende reflejar que el desarrollo tecnológico que está teniendo lugar abre posibilidades ilimitadas para los artistas, liberándonos (por decirlo de alguna manera) de la esclavitud material a la que siempre hemos estado sometidos.

Los artistas, en el sentido más tradicional del concepto, acostumbraban a tener un estudio donde trabajar y guardar las herramientas y materiales. Hoy en día no es imprescindible contar con este espacio ni con estas herramientas para

With new emerging technologies, art is undergoing a process of democratization that we should not fear and, indeed, we must embrace.

These technologies allow our work to impact the largest possible audience, given the fact that it's not necessary anymore to be physically in front of it. Even if our creative process remains traditional, these technologies can help us spread our creations without fear for their integrity. There is no need anymore to move artwork around the world as it could be directly produced on the site where the exhibition will be taking place. This way, the traditional economic ties related to art exhibition may some day be discarded.

This work is focused on the research of these areas related to the virtual sculptural creation and its translation into the material world through prototyping systems, currently under development.

crear y hacer un trabajo técnicamente impecable. Como se explica en el capítulo 3 de esta tesis el espacio de trabajo del artista ha evolucionado, y ya no es imprescindible para desarrollar una carrera excepcional en el mundo del arte.

Con estas nuevas tecnologías emergentes, el arte está en un proceso de democratización al que no tenemos que temer y que, por el contrario debemos abrazar. Estas tecnologías permiten que nuestro trabajo impacte en un mayor volumen de público, dado que ya no es necesario estar físicamente frente a la obra, y pueden ayudarnos a difundir nuestras creaciones sin temer por su integridad, pudiendo incluso eliminar el factor económico tradicionalmente vinculado a las exposiciones.

Así este trabajo se ha centrado en investigar estas áreas referentes a la creación escultórica virtual y su traducción en el mundo material a través de los sistemas de prototipado, actualmente en pleno desarrollo.



Fresco romano en el Cubiculum de la Villa, de P. Fannius Synistor en Boscoreale. Perteneciente al periodo de la República Romana 50-40 a.c.

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. LA PRODUCCIÓN ESCULTÓRICA EN LA ÉPOCA DE LA VIRTUALIDAD

Desde la antigüedad el ser humano ha buscado el dominio del espacio en las artes. Ya en la época clásica los romanos buscaban un dominio bidimensional del espacio, a través de sus trampantojos, pretendían controlar un espacio no existente, abriendo, en los muros de las casas, ventanas a nuevos espacios. La pintura fundamentalmente ha buscado ese dominio.

Antes de la aparición de la perspectiva en Italia, los artistas flamencos e italianos buscaban la representación de la tridimensionalidad por diferentes métodos.

La aparición de la perspectiva supuso un control absoluto de la representación de la tridimensionalidad sobre un soporte bidimensional. Este dominio de la perspectiva y la representación de los volúmenes en el plano, podemos interpretarlo como la búsqueda y la apertura de un nuevo espacio, de una nueva dimensión a la que no se puede acceder pero en la que se puede trabajar.

La escultura ha sido desde siempre el arte de crear tridimensionalmente. Su evolución, paralela a la de la pintura, ha buscado, hasta el s. XIX la representación fiel de la realidad.

Para esta representación la escultura siempre ha contado con la materialidad, que la diferenciaba radicalmente de la pintura y el dibujo.

Desde los movimientos artísticos de finales del s. XIX los artistas han buscado en la escultura otros objetivos, entre ellos el dominio de una nueva dimensión, el tiempo, como se aprecia en obras como *Los móviles*, de Calder. Rodrigo Alonso defiende en su texto “El Espacio Expandido” (Madrid, 2004, p.2) que

en plena sociedad de los *media*, en la década de 1960, la actitud de los artistas ante la tecnología era todavía contradictoria.

Mientras algunos buscaron contrarrestar sus efectos potenciando prácticas no mediáticas como la *performance*, otros decidieron explorar las posibilidades de los nuevos medios. En su libro *Más Allá de la Escultura Moderna*, (1968), Jack Burnham se refiere al arte cinético, las esculturas luminosas, la robótica y el arte cibernético como los nuevos caminos de la escultura.

Ya en el año 1978 Rosalind Krauss, en su ensayo *La escultura en el campo expandido* destaca «como las categorías de escultura y pintura han sido amasadas, estiradas y retorcidas demostrando gran elasticidad y mostrando como un término puede ser extendido para incluir prácticamente cualquier cosa» (p.30).

Ante esta afirmación de Rosalind Krauss, y entendiendo que, efectivamente, más de tres décadas después de que escribiera ese ensayo este hecho sigue vigente, entendemos que las nuevas tecnologías y disciplinas artísticas como las que en este trabajo se tratan (modelado virtual, realidad aumentada, impresión 3D...) entran igualmente en esta categoría de escultura, algunas de una forma más acertada que otras.

Un evento importante que afianzará la aparición de las nuevas tecnologías digitales en el campo del arte fue la exposición *Los Inmateriales* (1985) en el Centro Georges Pompidou, de París. Esta exposición, comisariada por el filósofo Jean-Francoise Lyotard «presenta la decrepitud que vive el concepto de modernidad y adelanta la instalación de una nueva era en la que el avance tecnológico condiciona distintas formas de expresión y de relación» (Ferrer, El País, viernes, 17 de mayo, de 1985).

La evolución tecnológica desde que tuviera lugar la exposición *Los Inmateriales* en el año 1985 es evidente, pero ya en aquella exposición se presentaban obras que definían la necesidad de utilizar herramientas (en este caso, unos auriculares) que servían de extensión de nuestro cuerpo y vínculo entre el mundo real (material) en el que nos encontramos y el mundo virtual (inmaterial), como el propio Lyotard lo definió.



FIGURA 1

“Arôme Simulé”, pieza que formó parte de la muestra *Les imm.ateriaux*, de Lyotard

Hoy en día los límites entre el mundo real y el virtual son cada vez más confusos, estamos rodeados de dispositivos que hoy ya podemos definir como imprescindibles, incluso me atrevería a afirmar que se han convertido en elementos de primera necesidad. Los ordenadores con los que trabajamos e investigamos, los teléfonos con los que nos comunicamos e, incluso las tablets con las que pasamos nuestro tiempo no son más que eso, el vínculo, la interfaz entre nuestro mundo material y finito y un mundo virtual infinito. Estas herramientas son las puertas y ventanas donde asomarnos y a través de las cuales accedemos a lo inmaterial, expandiéndose, así, las fronteras de nuestro mundo y de nuestro propio cuerpo.

Podemos afirmar que la aparición de los ordenadores, y con ellos la aparición de los programas de modelado tridimensional, ha supuesto la unión de los procesos creativos bidimensionales y tridimensionales, trabajando ahora a través de un soporte plano (pantalla) para buscar la creación de una obra volumétrica de tipo escultórico.

Además de las implicaciones que estas nuevas tecnologías puedan tener para la creación artística a nivel físico o virtual «para algunas corrientes, como el ciberfeminismo, la participación en la construcción de este entorno supone, además, desestructurar pautas culturales, herencias

históricas y conductas sociales arraigadas en el mundo en que vivimos, en vistas a constituir lugares de verdadera convivencia igualitaria» (Alonso, 2004).

Así, el nuevo espacio virtual no es solamente un nuevo campo de producción, sino que además es una herramienta de reflexión para los artistas del s. XXI.

## 1.2. LA IMAGEN INFOGRÁFICA

La imagen infográfica o imagen sintetizada por ordenador surge de un código binario creado a partir de ceros y unos, que se puede almacenar y reproducir de manera infinita sin degradarla, frente a la imagen analógica como puede ser el dibujo, la pintura o incluso la fotografía tradicional.

Esta surgió en el sector militar en la década de 1950 y rápidamente se empezó a aplicar en los sectores científicos, industriales, y en campos como el de la arquitectura, el diseño y el arte en general.

Diferentes sistemas como ordenadores o actualmente los teléfonos, las *tablets*, etc., reproducen el código binario que configura la imagen traduciendo dicho código como un conjunto de *píxels* (acrónimo de *picture elements*), los cuales se definen por valores numéricos que indican su posición en el espacio, su color y su brillo, como si de un mosaico romano se tratase.

Para poder visualizar la imagen infográfica es necesario disponer de un soporte como una pantalla o proyector o de un sistema que la reproduzca en un medio físico como una impresora, ya que en sí, la imagen infográfica se almacena como una matriz numérica y no existe como tal almacenada como imagen.



FIGURA 2

Mosaico y puntillismo, dos expresiones artísticas que reducen el elemento representativo a una unidad que agrupada por colores dan como resultado una imagen. En la parte superior "Mosaico de Justiniano" (547), en la parte inferior "Una tarde de domingo en la isla de la Grande Jatte" (1884) de Georges Seurat.

Necesitamos de un medio o dispositivo que lo traduzca para que nuestro ojo pueda disfrutarla.

Debemos diferenciar entre imagen digital e infográfica. La imagen digital abarca todo aquello que es, en su origen, un código binario almacenado, sin importar la forma en que esta imagen es obtenida. Sin embargo, la imagen infográfica se forma «sin utilizar cámaras ni lentes de ninguna clase, como consecuencia de un proceso de interacción que constituye casi un diálogo en tiempo real entre el operador y la máquina. Los límites a la invención o a la creatividad de la imagen vienen impuestos. Por lo tanto, por las posibilidades del programa utilizado, pues solo se puede optar por las opciones que alguien efectivamente ofrece y la soberanía del operador, es por ello limitada». (Gubern, 1996 p.141).

En este sentido se puede decir que la limitación ha existido siempre. En el caso de las nuevas tecnologías son las limitaciones del software y el hardware y, en caso de las disciplinas clásicas como el dibujo, la pintura, el grabado o la escultura dichas limitaciones vendrán marcadas por la técnica que se haya decidido utilizar.

Como Rudolf Wittkower dice en su famoso libro *Escultura: procesos y principios*, «en la Grecia arcaica los escultores trabajaban el mármol con

punteros de un metal tan blando que solo podía ser utilizado de forma perpendicular al mármol, pues al trabajar con el de manera oblicua, la herramienta se deslizaba sobre la superficie sin dejar ningún tipo de huella». (p.12)

Así, en la historia de la escultura y del arte en general, se aprecia como el artista siempre ha imaginado y proyectado su obra en relación directa con la tecnología que disponía en ese momento, de la misma forma que no se puede imaginar una imagen infográfica (previsualizar un resultado) sin conocer las posibilidades del programa con que se genera.

Técnicamente los ordenadores permiten al artista, en este caso al escultor, trabajar en un espacio virtual sin referencias espaciales reales.

Rojas Bez, en el número 36 de la revista digital *Razón y Palabra*, insiste en que toda imagen y, por tanto, todo arte es siempre virtual. «Recordemos que las imágenes no existen por sí mismas, como entes o cosas en el mundo circundante a las personas. Cualquiera que sea nuestra posición filosófica –idealismo subjetivo u objetivo, platónico, aristotélico, cristiano, panteísta, materialismo de cualquier escuela– sabemos que toda imagen es producto de la relación entre nosotros –es decir, nuestro cerebro, nuestra mente– y los estímulos del entorno.

Toda visión, audición, recepción de un objeto proviene de la interacción de ese objeto y nuestra mente, mediando los estímulos sensoriales recibidos por esta última desde dicho objeto». (Rojas Bez, 2003)

El estudio en que se centra este trabajo no está basado en la creación de imágenes infográficas, sino que se centra en el estudio de la aplicación de los programas para la creación de modelos tridimensionales digitales. Así como la imagen infográfica se almacena como código binario y reproduce como imagen basada en *píxels*, los modelos tridimensionales se almacenan igualmente mediante el mismo sistema pero su reproducción puede hacerse o bien mediante imagen (*píxels*), mediante modelo tridimensional visual (curvas o polígonos virtuales en un programa de modelado) o como objeto físico a través de los sistemas de reproducción tridimensionales disponibles actualmente en el mercado.

La imagen infográfica sienta las bases de lo que en este trabajo se presenta pero no es el objetivo final. La diferencia radica en que la imagen infográfica es efectivamente eso, una imagen, un elemento bidimensional de representación y este trabajo está basado en la obtención de elementos tridimensionales reales a partir de sistemas de creación infográficas.

### 1.3. NUEVAS POSIBILIDADES

Las nuevas tecnologías permiten la creación escultórica a través de un ordenador, ofreciendo posibilidades creativas que podemos englobar en tres grupos:

1. Posibilidades de creación.
1. Posibilidades de exposición.
2. Posibilidades de conservación.

Dentro de las posibilidades de creación podemos dividir las relacionadas con la estética y con las posibilidades que conceptualmente ofrecen las nuevas tecnologías.

En lo que se refiere a la estética, podemos enumerar las facilidades y posibilidades que las nuevas tecnologías nos ofrecen en lo que a la formalización física de la obra se refiere. En este sentido, hablaríamos de las nuevas tecnologías como meras herramientas, equiparándolas a un cincel, una escofina o una gradina. Así contamos con ordenadores, con los que se pueden modelar obras directamente, escáneres tridimensionales, que pueden ser utilizados únicamente como método de conservación o como herramienta de creación, ya que nos permite digitalizar una pieza sin acabar para terminarla en el ordenador o retocar partes que manualmente sería muy difícil o incluso imposible.

Y finalmente contamos con las impresoras tridimensionales y el amplio abanico de sistemas de prototipado con que disponemos en la actualidad, que nos permiten traducir nuestra creación virtual al mundo material. En este punto cabe destacar que no solamente el escáner tridimensional permite la exploración del mundo material en tres dimensiones, otras herramientas y procedimientos de tipo médico o tecnológico han sido utilizadas como herramientas para la creación en numerosas ocasiones, como es el caso del TAC (Tomografía Axial Computerizada).

Marilene Oliver crea esculturas inusuales a partir de cuerpos humanos vivos escaneados a través de tomografías axiales computerizadas, resonancias magnéticas y tomografías por emisión de positrones. Oliver imprime las imágenes sobre planchas de plexiglass que, después, ordena para configurar una extraña e inusual escultura. El artista español Iñigo Bilbao, en su exposición *TACs*, utiliza el mismo sistema de tomografías para la realización de esculturas y videos donde, a partir de la información recogida configura piezas que muestran el exterior formal de un ser humano o exterioriza partes internas como pueden ser las estructuras óseas.

Conceptualmente la creación virtual nos ofrece posibilidades que mediante los procesos de creación tradicional no habrían sido posibles.



FIGURA 3

“Retrato de familia” (2003) de Marilene Oliver.

El mero hecho de duplicar la realidad a través de un escáner tridimensional nos abre un nuevo mundo de posibilidades conceptuales que de otra manera no habrían sido posibles. Cabe destacar en este sentido la obra de Lazarinni, quien trabaja con los nuevos medios transformando la realidad, jugando con nuestro sistema perceptivo que abre ante nosotros una nueva dimensión espacial a la que no podemos acceder. Otro artista que trabaja con la distorsión de la realidad a partir de la misma realidad es Richard Dupont, que se escanea a sí mismo y se imprime varias veces con diferentes distorsiones (figura 4). Su objetivo es crear un cuerpo que, aunque sea humano, se configure como un elemento extraño y ambiguo para el espectador.

En lo que a las posibilidades expositivas se refiere, el mero hecho de contar con un espacio no físico, como es el espacio virtual, nos permite admirar obras tridimensionales, volumétricas, sin las necesidad de tener la materia ante nosotros. Aunque se pierde la calidez y la relación directa del público con la materia, según en que situación se gana la posibilidad de admirar las piezas desde puntos de vista que de otra manera no serían posibles. Así mismo, estas tecnologías nos permiten observar obras situadas en otra ciudad o continente e, incluso, recibir desde cualquier lugar del mundo, una pieza y reproducirla en material sin la necesidad



FIGURA 4

*Sin título 8*, (2008), de Richard Dupont.

de enviar la pieza físicamente con todos los riesgos que esto implica.

No sería necesario ni mencionar la cantidad de beneficios que estas tecnologías suponen para la conservación del patrimonio artístico e histórico. En España, por ejemplo, se han llevado a cabo numerosos proyectos de digitalización escultórica e incluso arquitectónica. El proyecto de digitalización y réplica de *La Dama de Elche* fue muy importante hace unos años, así como el de digitalización y restauración de los leones de la Alhambra, de Granada (figura 5).

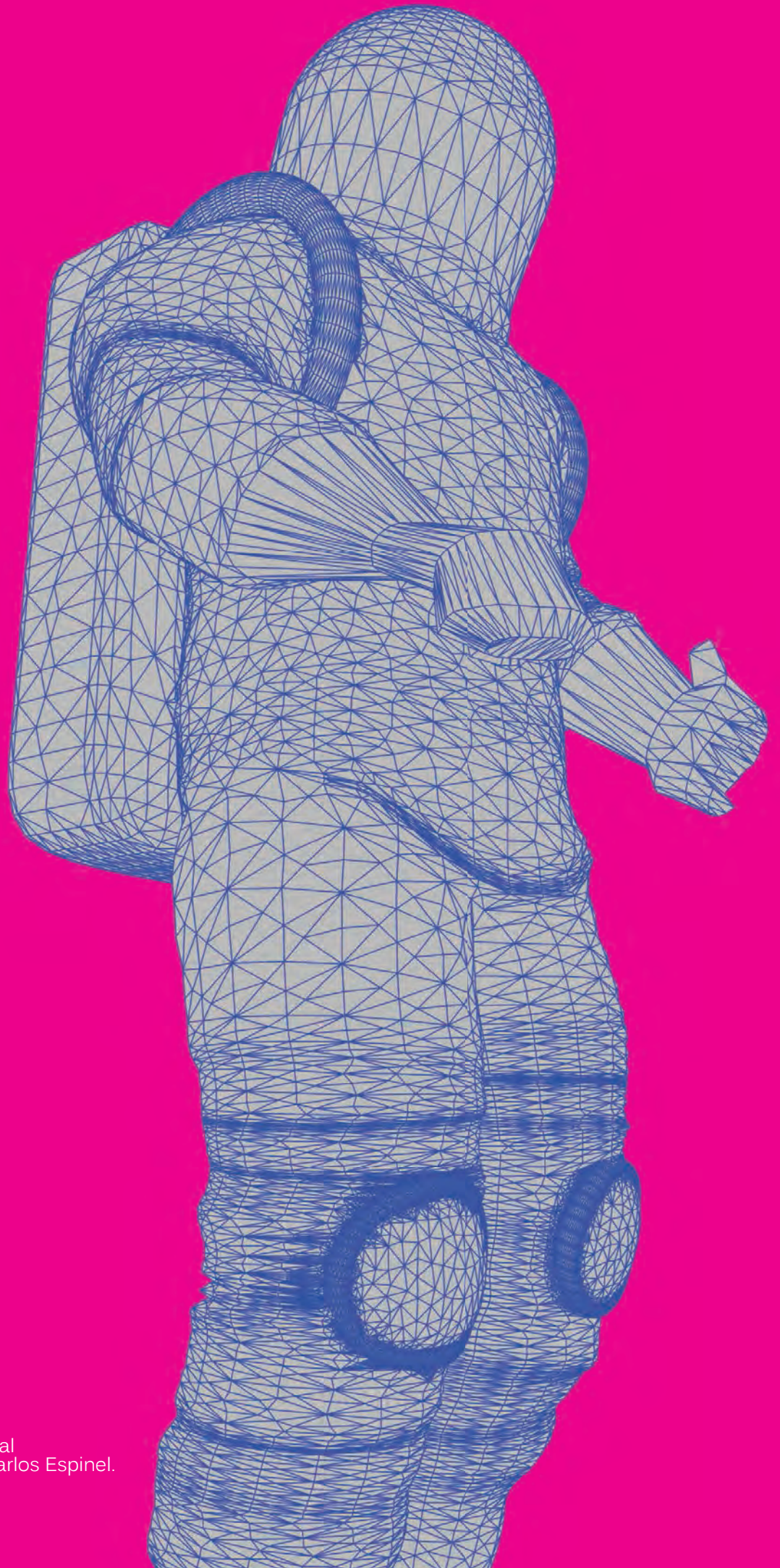
#### 1.4. CONCLUSIÓN

El universo material en el que nos desenvolvemos se traduce en lenguaje matemático en lo que sería el universo informático, virtual y digital. Este universo supone una nueva dimensión en todos los sentidos. Formalmente ofrece posibilidades que de forma tradicional, en el mundo tridimensional en el que nos desenvolvemos, no serían posibles. Nos permite de igual forma traducir nuestro mundo a fórmulas matemáticas digitalizándolo e introduciéndolo en el mundo virtual, de la misma forma que nos permite traducir la información digital en materia física real. Todas estas posibilidades suponen un flujo bilateral de información entre el mundo material y el virtual que supone una cantidad abrumadora de posibilidades creativas plásticas y conceptuales.



FIGURA 5

A la izquierda, el original de uno de los leones de mármol blanco de la Alhambra; a la derecha, el león escaneado en tres dimensiones.



Malla del modelo tridimensional  
"Astronauta" (2014), de José Carlos Espinel.

## 2. OBJETIVOS

El mundo del 3D ha sufrido una auténtica revolución en los últimos 20 años pero, sobre todo, la última década donde se ha hecho accesible para la amplia mayoría, convirtiéndose en una herramienta de creación fundamental para muchos ámbitos no solo del arte, sino de la industria, ingenieros, artistas, médicos... Un sinfín de profesiones han visto en el mundo del 3D un campo lleno de posibilidades.

España no ha sido un país ajeno a esta evolución como se puede apreciar en proyectos tan importantes y representativos como la réplica de la *Dama de Elche*.

En 2002, la Diputación de Alicante en colaboración con el Instituto Arqueológico Provincial de Alicante comenzaron un proyecto de creación de una réplica de alta resolución de la *Dama de Elche*. Para ello, se realizó un escáner completo de la pieza, con escáneres de alta resolución. Según FACTUM ARTE, la empresa encargada de realizar este proyecto, «la documentación digital generada en tres dimensiones sobre la *Dama de Elche* se convirtió en el primer fondo documental de este tipo» (Lowe y Ahmon, 2003, p.11). Después, mediante un proceso de impresión tridimensional la escultura fue producida a escala 1:1 con piedra caliza pulverizada .



FIGURA 1

Dama de Elche, original del s.V-IV a.c.



FIGURA 2

Dama de Elche, réplica impresa (2003 d.c.).

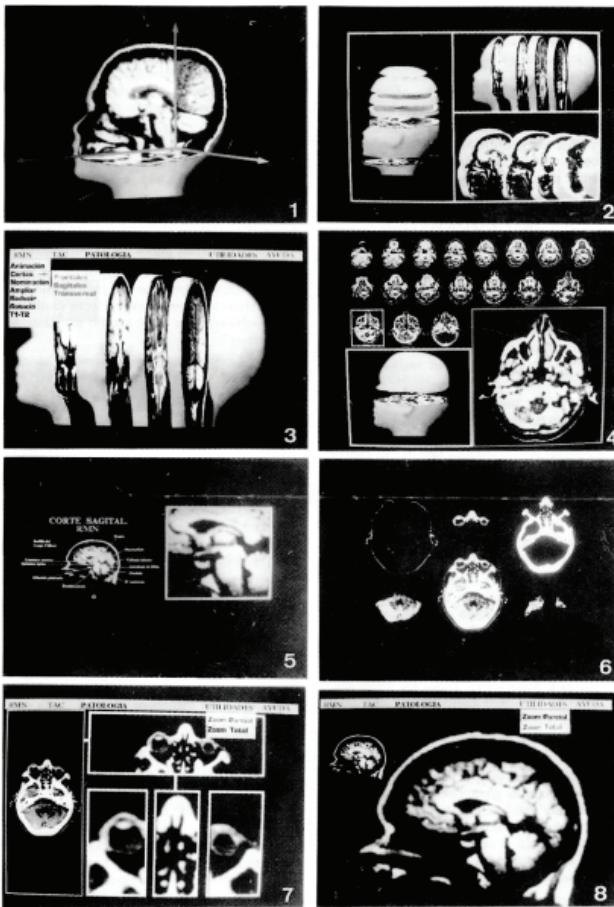


FIGURA 3

Imágenes del proyecto “Diseño informático para la reproducción tridimensional de la cabeza a partir de imágenes anatomo-radiológicas”, de J.A. Juanes et al.(1996).

Este es, probablemente, de los proyectos que más repercusión ha tenido tanto a nivel nacional como internacional, en lo relativo a la conservación y reproducción de piezas de arte, pero ya a finales de la década de 1980 había proyectos en España, relacionados con el mundo del 3D que vieron el futuro en estas tecnologías digitales en otros ámbitos, como por ejemplo, el mundo de la medicina.

Mi interés por el mundo de las tecnologías tridimensionales no es nuevo, ni medianamente reciente, mis primeros contactos con el mundo del 3D se remontan al año 1992 cuando mi padre colaboraba en un proyecto dirigido por el Doctor Juan A. Juanes en el que se aplicaba esta tecnología al estudio médico. El proyecto “Diseño informático para la reproducción tridimensional de la cabeza a partir de imágenes anatomo-radiológicas”, publicado por primera vez en mayo de 1996 en el Journal of Radiology, mostraba de una forma gráfica las posibilidades que las nuevas tecnologías tridimensionales estaban empezando a generar en el campo de la medicina, y en palabras del propio Doctor Juan Juanes, como “un verdadero atlas anatomo-radiológico”. A partir de ahí mi interés en el mundo virtual tridimensional fue creciendo, pero siempre aplicado a la generación de imágenes estáticas y animaciones.

En el año 2008, mientras cursaba en esta misma universidad el Máster de Posgrado en Arte, Creación e Investigación (MAC+I) la profesora y Doctora en Bellas Artes, Doña Elena Blanch, nos mostró un escáner tridimensional que la universidad había adquirido, lo que supuso un punto de inflexión para mi carrera como estudiante de Bellas Artes.

La universidad por aquel entonces ya disponía de asignaturas y talleres enfocados a la generación de imágenes tridimensionales (sintéticas o animadas) y, además, tenía herramientas capaces de digitalizar el mundo real. Lo que no había todavía eran herramientas que hicieran lo opuesto: volver real lo virtual y comencé a investigar por mi cuenta las diferentes posibilidades. Por supuesto las tecnologías ya existían, pero no encontré información de las diferencias que había entre las distintas técnicas de prototipado, de los materiales o de las dificultades técnicas con las que se habría de enfrentar un artista que quisiera crear una obra contando con esta tecnología.

Empecé haciendo unas pruebas e investigaciones con un par de técnicas, pero ni siquiera los proveedores, expertos en la materia, eran capaces de explicarme las diferencias entre unas técnicas y otras. Cada experto con el que contacté, por aquel entonces, estaba muy

enfocado en la tecnología de la máquina con la que trabajaba, y desconocía las virtudes o defectos de esa tecnología en comparación con otras. La explicación de esto es muy sencilla, el precio de las máquinas y de los consumibles de prototipado eran muy altos y los técnicos se centraban en conocer a fondo la tecnología con la que trabajaban.

Realicé una primera prueba de impresión con tecnología **ZCORP**, con la intención de hacer un molde para sacar una cera para fundición, pero el acabado granuloso de la prueba no me convenció y decidí entonces volver a prototipar la pieza, esta vez con una máquina **CNC Roland** para joyería, y después fundirla. En ese momento era evidente que el mundo de la joyería, de las ceras, estaba muy desarrollado con fresadoras que tallaban los modelos CAD en bloques de cera de diferentes durezas y con un altísimo grado de detalle.

Los procesos de mecanizado son procesos cuya tecnología está muy desarrollada desde hace bastante tiempo y funcionan sobre un amplio abanico de materiales, desde las ceras para microfusión hasta piedras y mármoles pasando por madera. Entonces, ¿cuál es la diferencia entre estos sistemas y los de impresión 3D? Si los segundos están en pleno desarrollo alguna ventaja tendrán.

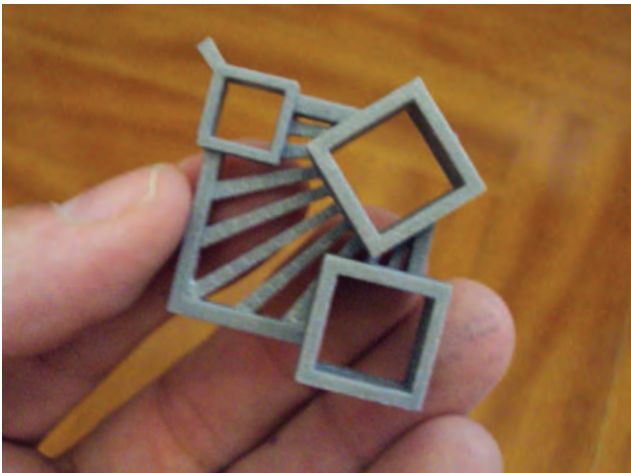


FIGURA 4

En la imagen superior, colgante obtenido mediante la técnica ZCORP; en el centro, la misma pieza prototipada en cera con un sistema de mecanizado; y en la imagen inferior, la pieza final tras fundir la cera.

¿Ofrecen algo diferente a los procesos de mecanizado? ¿Pueden estos procesos trabajar con piezas finales? ¿Y los tiempos? Me surgieron muchas preguntas a las que no encontraba respuesta y entendí, en ese instante, que si quería conocer estos procesos y entenderlos debería investigarlos.

El objetivo inicial y principal de esta tesis era, en un principio, entender los diferentes procesos de prototipado rápido existentes y plasmarlos en un documento para que cualquier artista interesado en desarrollar su obra con esta tecnología pueda tener un documento en el que apoyarse para entender lo que las diferentes tecnologías ofrecen.

No solo resultaba necesario realizar un estudio sobre procesos y materiales, también era necesario conocer que tipo de piezas podían diseñarse en los entornos virtuales. Estaba claro que las piezas de bulto redondo eran las más populares, incluyendo piezas de joyería.

Dadas las limitaciones de tamaño de producción de algunos procesos de prototipado rápido, y teniendo en cuenta que lo que queremos estudiar es la capacidad que tienen estos nuevos procedimientos para crear piezas con suficiente calidad escultórica, resultó más que evidente la necesidad de entender las oportunidades que estas tecnologías ofrecen para la creación

escultórica de pequeño formato.

El mundo del 3D está fundamentalmente enfocado al bulto redondo, a las forma exentas pero, ¿qué ocurre con los relieves?, ¿habrá una forma de modelar o tallar estos relieves de una manera digital para luego imprimirlos o tallarlos con una tecnología de prototipado rápido? Los programas de modelado 3D cuentan con herramientas que permiten dar relieve a los modelos, pero no encontré bibliografía ni procedimientos concretos sobre este tema explicando como generar estos relieves.

Así, el objetivo de este trabajo es el de demostrar la capacidad de las tecnologías digitales para servir como herramienta para la creación escultórica, catalogando los diferentes sistemas de prototipado rápido existentes hasta la fecha y los diferentes materiales. Como consecuencia del proceso de investigación, se ha desarrollado además un procedimiento aplicable por cualquier escultor interesado en la creación digital de relieves, que posteriormente podrían ser producidos por uno de estos sistemas de prototipado rápido.

Con esto, se demuestra las grandes posibilidades que estas nuevas tecnologías han puesto al servicio de la creación plástica en el más puro sentido del concepto.



Zootropo de Pixar. Se trata de una estructura tridimensional con figuras de la película de "Toy Story" que al girar reproducen el movimiento de los personajes.

### 3. LAS TECNOLOGÍAS DIGITALES

La historia del arte está inevitablemente ligada a la de la evolución tecnológica. La escultura es una disciplina artística que ha estado presente a lo largo de la historia de la humanidad, desde las venus paleolíticas hasta las nuevas esculturas realizadas con tecnología digital, parte de las cuales centran este trabajo. Los antiguos «utensilios de pedernal hallados en todos los rincones de la Tierra deben verse como la primera extensión eficaz de la mano del hombre y que se sitúan por lo tanto» (Witkower, 1980, p.16) en los albores de la civilización humana. Desde entonces las herramientas escultóricas han evolucionado de muy diversos modos y con objetivos diferentes: picar, tallar, modelar, texturizar...

El s. xx se ha caracterizado por la aparición y rápido desarrollo de lo que conocemos como informática. El desarrollo de esta tecnología se ha dado por el interés que despertó su potencial fundamentalmente en el campo de la ingeniería. Pero no nos equivoquemos pensando que el desarrollo de la informática se debe únicamente al intelecto de ingenieros y científicos, en su evolución han intervenido, de una forma más que necesaria los artistas. Así, en todo el desarrollo de los gráficos por ordenador, o en el nacimiento y evolución de los sistemas de modelado tridimensionales, los artistas han sido una parte imprescindible.

Desde que Charles Babbage ideara la computadora digital moderna a finales del s. xix, la informática ha evolucionado a un ritmo vertiginoso. Los primeros ordenadores analógicos funcionaron a principios del s. xx con engranajes y ejes que funcionaban con tarjetas perforadas. En torno a la Segunda Guerra Mundial surgieron los primeros ordenadores digitales. El Mark I, construido por Howard Aitken en 1944, se basaba en la máquina analítica de Babbage. Empleaba señales electromagnéticas para mover partes mecánicas, y ejecutaba operaciones matemáticas básicas y cálculos complejos de ecuaciones sobre el movimiento parabólico de proyectiles.

A partir de la década de 1950 comienzan a utilizarse únicamente componentes de carácter electrónico. El concepto de gráficos computerizados (*computer graphics*) fue acuñado por William Fetter en 1961 para describir el trabajo que realizaba en Boeing.

A finales de los años 60 se generalizan los microprocesadores y surgen los primeros ordenadores personales. Es en este momento cuando surge el concepto CAD (Computer Aided Design) que ha hecho cambiar nuestro mundo de una forma radical, y ser el principal objeto de estudio de este trabajo.

### 3.1 SISTEMAS CAD/CAM

La sigla CAD hace referencia al diseño asistido por ordenador, en inglés *Computer Aided Design*, y su función es generar modelos de productos con unas características de tamaño, contorno o forma determinadas, entre otras. Estos modelos son almacenados como archivos digitales para ser fabricados. Uno de los grandes beneficios de estos sistemas es que permiten simular el funcionamiento de un producto antes de su producción, lo que hace posible comprobar si el producto diseñado funcionará como está previsto y, a la vez, puede ser modificado si fuera necesario antes de que el producto sea finalmente fabricado.

Para fabricar el producto se trabaja con el sistema CAM (*Computer Aided Manufacturing*), de fabricación asistida por ordenador, que ofrece grandes ventajas con respecto a otros métodos más tradicionales. De entrada, minimiza los errores humanos producidos por una mala intervención del operador, y supone un importante ahorro gracias a su precisión.

Un diseñador puede servirse de estos sistemas, para crear un prototipo antes de su fabricación en serie, donde habitualmente también intervienen. Así mismo, a la hora de fabricarlo se pueden utilizar diversas máquinas.

Dentro de la tecnología CAD/CAM se sitúa el área de prototipos rápidos, sistemas donde los modelos tridimensionales se convierten en modelos reales a través de distintos sistemas de fabricación. Este trabajo está centrado en estudiar las posibilidades que esta tecnología ofrece a un artista para llevar a cabo su obra escultórica.

### 3.2. LOS GRÁFICOS TRIDIMENSIONALES POR ORDENADOR

Los gráficos 3D son gráficos basados en una representación tridimensional de información geométrica que se encuentra almacenada en el ordenador con la que se realiza cálculos y renderiza la información, generando imágenes bidimensionales. El tipo de cálculos y procesos (algoritmos) que realiza un ordenador para crear estos archivos 3D son similares a los que utiliza para generar archivos bidimensionales de tipo vectorial.

En cuanto a los gráficos realizados con ordenador, muchas veces la distinción entre imágenes bidimensionales y tridimensionales es confusa. Aplicaciones que generan imágenes 2D pueden utilizar técnicas o efectos tridimensionales como la iluminación, y para la creación de imágenes tridimensionales es habitual utilizar archivos de imagen bidimensionales para generar texturas.

Por lo general, se utiliza el concepto de imagen tridimensional para referirse a modelos 3D pero hay diferencias, ya que un modelo 3D es una representación matemática de cualquier objeto tridimensional. Así un modelo 3D no es un gráfico hasta que no se proyecta o renderiza.

Gracias a los procesos de prototipado un modelo 3D no está confinado en el mundo virtual, estos modelos pueden ser vistos a través de un monitor como un gráfico en un soporte bidimensional gracias al proceso de renderizado, o puede generarse gracias a las tecnologías de prototipado rápido como un objeto físico tridimensional.

### 3.3. ANTECEDENTES

El Diseño Asistido por Ordenador (CAD) y la Fabricación Asistida por Ordenador (CAM) se desarrollaron como dos tecnologías completamente separadas aunque nacieron en la misma época, a principios de la década de 1960. En el caso de los sistemas CAM, en principio, la tecnología se limitaba a un control numérico de maquinaria, que posteriormente se desarrollaría dando lugar a lo que hoy conocemos como CAM. Por aquel entonces no se confiaba en que estas tecnologías emergentes pudieran tener aplicaciones prácticas importantes.

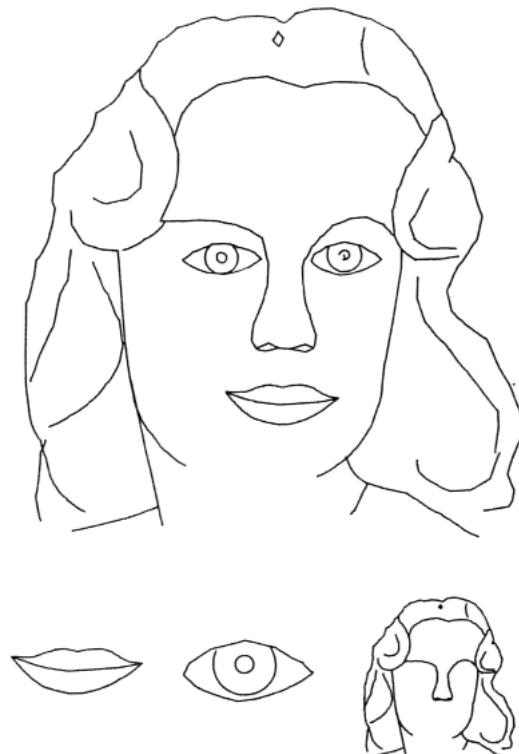
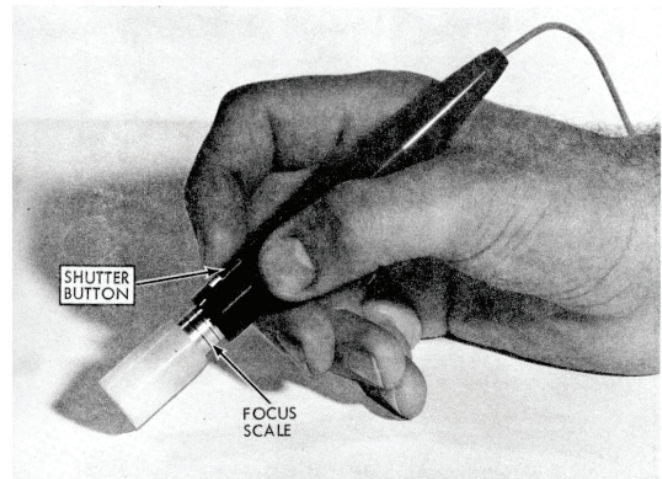


FIGURA 1

En la imagen superior "light pen" descrito en la tesis de Ivan Sutherland (1962), en la inferior resultado obtenido con él al trazar una fotografía.

Sin embargo, no solo han supuesto un enorme impacto económico y social, sino que han cambiado por completo el mundo tal como lo conocíamos hace 50 años.

Los orígenes del control numérico, que posteriormente daría lugar a lo que se conoce como CAM se deben a John Parson, propietario de una empresa familiar que se dedicaba a fabricar piezas de automóvil y, posteriormente, de armamento y piezas para helicópteros. En 1946, desarrolló una fresadora controlada por tarjetas perforadas, a la que adaptó una máquina IBM con la que se podían fabricar plantillas de una forma automática gracias a los cálculos que el control numérico realizaba. Después las fuerzas aéreas norteamericanas patrocinaron investigaciones relacionadas con el control numérico en el Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT), desarrollándose así el sistema CAM.

En caso del CAD, en los años 60 había unas cuantas instituciones trabajando en la idea de utilizar los ordenadores con fines gráficos y de diseño.

El primer sistema gráfico fue desarrollado por el propio MIT en 1955 en colaboración con las fuerzas aéreas norteamericanas y procesaba datos de radar mostrando objetos a través de una pantalla.

En 1962, también en el MIT, Ivan Sutherland desarrolló el sistema **Sketchpad** basado en su propia tesis doctoral *Sketchpad: a man-machine graphical communications system*, donde establece las bases que conocemos hoy en día sobre los gráficos interactivos por ordenador. Como Javier Martín Arrillaga explica en su tesis doctoral *Las aplicaciones interactivas en la educación artística*

Sutherland propuso la idea de utilizar un teclado y un lápiz óptico para seleccionar, situar y dibujar una imagen representada en la pantalla. La imagen que aparecía en la pantalla estaba basada en la topología del objeto que iba a representar, describía con toda exactitud las relaciones entre las diferentes partes que lo componía. Hasta este momento las representaciones visuales de un objeto realizadas en el ordenador, se habían basado en un dibujo y no en el objeto en sí mismo. Así, con el sistema Sketchpad se trazaba una clara distinción entre el modelo representado en la estructura de datos y el dibujo que se veía en la pantalla. El ordenador era capaz de calcular que líneas eran las que definían la parte observable del objeto eliminando de la pantalla el resto.

Las líneas ocultas eran almacenadas en la memoria del ordenador y volvían a aparecer cuando se colocaba el cuerpo en una posición diferente respecto al observador. (Madrid, 2001).

Proyectos parecidos a Sketchpad se desarrollaron en otros centros de investigación como en ITEK, de la University of South Australia, o General Motors.

El primer software de animación digital, el **Synthavision**, fue creado en 1966 por el doctor Philip Mittelman. Este software fue el antecesor del **Ray-tracing**, sistema de renderizado que tiene en cuenta los efectos luminosos derivados de reflexiones, de refracciones y de sombras, para definir una ambientación realista.

El sistema Synthavision generaba los modelos 3D utilizando tres formas básicas: esfera, cubo, y cilindro, para crear objetos en 3D. Este software fue utilizado en la producción del largometraje de Disney, *Tron*.

Dave Evans, profesor de la Universidad de California e investigador en gráficos por ordenador, fue contratado por la Universidad de Utah en 1968 para formar un departamento de Ciencias Informáticas. Este nuevo departamento sería el primer centro de investigación de gráficos por ordenador a nivel mundial.



FIGURA 2

El sistema Synthavision se utilizó en 1982 para los gráficos generados por ordenador de la película *Tron*.

En 1967, Ivan Sutherland comienza a trabajar con Evans y, en 1968, inventa el primer dispositivo de realidad virtual y realidad aumentada: **La espada de Damocles**. Se trataba de un dispositivo muy básico, tanto en términos de interfaz de usuario, como de realismo, y consistía en una estructura con una pantalla suspendida en el techo que se montaba sobre la propia cabeza del individuo. Los gráficos que usaba, eran solo tipo *wireframes* (líneas de alambre), pero permitían al usuario ver imágenes en 3D estereoscópico.

Ed Catmull, actual presidente de Pixar Studios, empezó en esa misma universidad en 1970, asistiendo a las clases de gráficos por ordenador que Sutherland impartía. Vio en los gráficos por ordenador el futuro de la animación y quería formar parte de lo que él consideraba una auténtica revolución.

La primera animación tridimensional fue realizada por el propio Catmull y se trataba de su propia mano abriéndose y cerrándose. Para realizar la animación, Catmull sacó una copia de su mano en escayola, donde definió los puntos que compondrían el modelo tridimensional que, posteriormente, digitalizaría introduciendo los datos, coordenada por coordenada.

El primer gran avance en gráficos tridimensionales tuvo lugar, como cabría esperar, en la misma Universidad de Utah, de la mano de estos primeros investigadores. Se trata del algoritmo de las superficies ocultas. A la hora de representar en la pantalla un modelo tridimensional, el ordenador debe determinar que superficies están “por detrás” del objeto desde la perspectiva del espectador y, por lo tanto, deben estar ocultas.

1970 es un año fundamental en el desarrollo y crecimiento de los sistemas de diseño por ordenador. En este año grandes empresas como General Motors o Chrysler comienzan a utilizar los sistemas CAD. Una persona fundamental en el desarrollo del sistema CAD, de General Motors, fue el doctor Patrick Hanratty, quien más adelante formaría su propia empresa donde desarrolló, en 1971, **ADAM**, el primer programa comercializado para la realización de diseños técnicos. Este programa constituye la base de los programas de diseño CAD tal como los conocemos hoy en día.

Durante esta década se daría la introducción de los gráficos por ordenador en la televisión. Computer Image Corporation (CIC) desarrolló el software y el hardware necesarios para escanear imágenes y manipularlas. En esta década aparecería también **Unigraphics**, un sistema CAD que trabajaba con modelos tridimensionales.

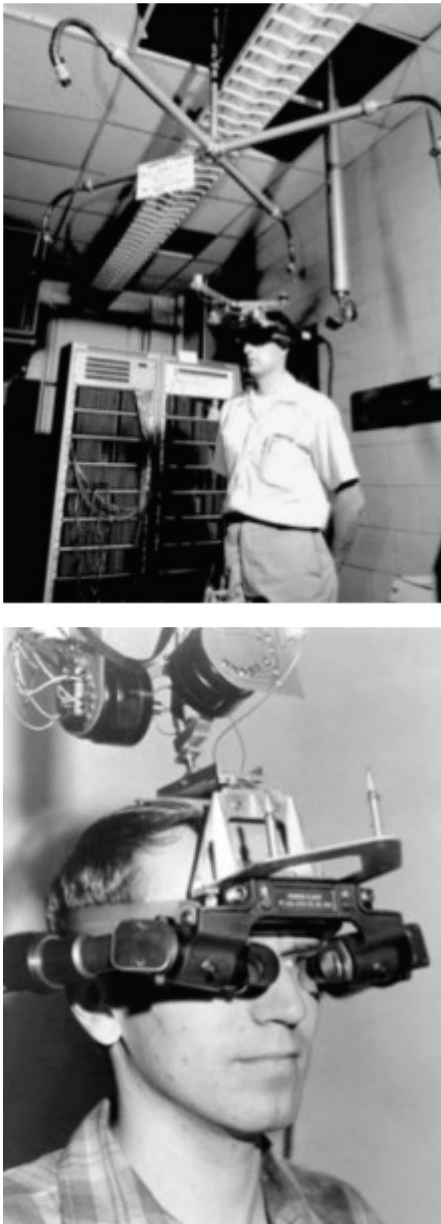


FIGURA 3

*La espada de damocles*, el primer dispositivo de interacción humana virtual, desarrollada por Ivan Sutherland en la Universidad de Utah.

En 1974, Phong Bui-Toung, un programador que trabajaba también en la Universidad de Utah, desarrolló un nuevo método de sombreado conocido como **Phong shading**. Su método de sombreado interpola de una manera minuciosa el color sobre una superficie poligonal, obteniendo una reflexión de sombras y luces muy precisa. Este método es muy exacto pero, por otro lado, puede llegar a ser muy lento, debido a la gran cantidad de recursos que necesita.

En 1974, Ed Catmull se doctoraba en Ciencias Informáticas con una tesis que hablaba, entre otras cosas, de *texture mapping* (mapeado de texturas). Muchos objetos en la vida real tienen unas superficies muy ricas y con grandes detalles, como la piedra de los muros, la madera o la piel de un sofá. Catmull se dió cuenta de que si se podían aplicar patrones y texturas a objetos reales, también tendría que ser posible aplicarlos en los virtuales. *Texture mapping* es el método para aplicar una imagen bidimensional a un objeto modelado tridimensionalmente.

En 1975, Martin Newell desarrollaría uno de los mayores hitos de la historia del modelado tridimensional, **La tetera de Utah**, la cual se convertiría en un auténtico icono del 3D.

Como parte de su investigación en este campo, Newell necesitaba un objeto simple pero lo suficientemente versátil como para resultar útil en su trabajo. La tetera, a pesar de su aparente complejidad, definía su forma con unas cuantas curvas y, gracias a que poseía superficies autorreflectantes, es decir, algunas partes de la tetera se reflejaban sobre otras, como el asa, resultó ser muy útil en su investigación.

Los compañeros de Newell comenzaron a utilizar la tetera en sus trabajos y los programadores que creaban nuevos programas de modelado incluían este objeto en la librería por ser ampliamente conocido y por las ventajas que tenía a la hora de demostrar la potencia y capacidad del nuevo software.

En 1976, en el Jet Propulsion Laboratory in Pasadena, California, James Blinn desarrolló un nuevo sistema parecido al *texture mapping*. Esta nueva técnica, en vez de aplicar una imagen bidimensional sobre una superficie 3D para aplicar color, aplicaría imágenes 2D en escala de grises para hacer que la superficie pareciera tener bultos y endiduras. Para eso, utilizaría imágenes monocromas donde las partes pintadas de blanco se transformarían en bultos y las partes en negro en zonas hundidas, los grises actuarían en función de la cantidad de negro o blanco que hubiera en su composición.



FIGURA 4

Modelado 3d de un interior. En la imagen inferior sin materiales ni mapas de textura aplicados, en la superior con ellos aplicados.

Este método de mapeado, llamado *bump mapping*, añadiría un mayor nivel de realismo a los gráficos 3D, pues supuso un alto enriquecimiento visual y tiene mucho que ver con gran parte del desarrollo de este trabajo.

En 1980, destaca en España el nacimiento de Investrónica, primera empresa de sistemas CAD/CAM orientados al sector textil.

En 1981, nace una de las empresas más importantes relacionadas con el mundo del diseño 3D, Autodesk, y su programa **Autocad** ve la luz ese mismo año. Este programa de diseño asistido por ordenador estaba orientado a la creación de dibujos en dos y tres dimensiones muy enfocado a la creación de planos de edificios.

En 1983, Jaron Lanier, un programador que trabajaba para Atari, desarrolló el **DataGlove** (guante de datos). Se trataba de un guante que detectaba cualquier movimiento que se hacía con él y los transmitía al ordenador, el cual interpretaba esa información haciendo posible la manipulación de modelos 3D en el espacio virtual.

En 1995 vería la luz el primer largometraje realizado íntegramente por ordenador *Toy Story*. Esta película no supuso ninguna novedad en cuanto a la tecnología utilizada, pero sí en

relación a como el público percibió, desde ese momento, los gráficos creados por ordenador.

En el nuevo siglo, cabe destacar, la aparición de **Sketchup**, un programa que revoluciona el concepto de CAD al desarrollar un sistema de construcción de objetos muy intuitivo que mediante líneas, a partir de un proceso muy parecido al del dibujo tradicional, permite realizar contrucciones tridimensionales de una forma muy sencilla, contando incluso con versiones gratuitas accesibles para todo el mundo por su fácil manejo.

El software CAD/CAM está en continua evolución, adaptándose cada vez más a los nuevos tiempos y a las nuevas herramientas y procesos de producción.



FIGURA 5

Pieza fabricada mediante sistemas de prototripado rápido. para conseguir esta pieza inicialmente el modelo ha tenido que ser creado mediante un programa CAD.



Francis Bacon en su estudio rodeado de libros, papeles, cuadernos, pinceles, botes... Es un ejemplo, nada alejado de lo que en realidad, es un estudio de artista.

## 4. EL TALLER DEL ARTISTA DIGITAL

En pleno s. XXI, el taller del artista plástico poco tiene que ver con la imagen tradicional del taller de artista, si bien es probable que la estampa de un espacio lleno de herramientas tales como pinceles, brochas o lienzos siga repitiéndose, esta imagen se ve modificada por la constante presencia de nuevas herramientas tecnológicas tales como cámaras fotográficas, ordenadores, impresoras, escáneres... Nunca el arte fue tan multidisciplinar como ahora, donde los límites entre la pintura o la escultura, el dibujo y la fotografía están cada vez menos definidos.

Para el tipo de obras en que se centra este trabajo no es necesario tener un equipo extremadamente amplio. De hecho, como herramienta imprescindible únicamente necesitaríamos un ordenador con un software apropiado para poder crear nuestros archivos tridimensionales,. Por supuesto que necesitaremos contar con impresoras tridimensionales para la posterior producción de nuestras piezas pero no es imprescindible que contemos con ellas en nuestro estudio. De hecho la inversión que implica la adquisición y el mantenimiento de una impresora 3D puede no verse justificado por el número de piezas que vamos a producir.

Todas las piezas producidas para este trabajo se han fabricado de forma externa, contando con diferentes proveedores especializados en cada

uno de los procesos de prototipado rápido. Si hubiera sido necesario adquirir cada una de las impresoras y materias primas necesarias para esta investigación, el trabajo no habría visto la luz por falta de fondos pero, también, por la falta de tiempo necesario para conocer el funcionamiento de cada una de las máquinas y los procesos en profundidad.

El artista debe centrarse en el diseño de su obra, en su contenido conceptual y en el acabado, pero: ¿hasta qué punto es necesario que esté presente y forme parte activa de cada una de las etapas por las que pasa su obra? Por ejemplo, los fotógrafos no siempre han formado parte del proceso de revelado de sus fotografías. Si bien siempre han dado las indicaciones y parámetros que necesitan que tenga su obra final, no siempre se han dedicado a manejar los líquidos de revelado o los *plotter* o impresoras mediante las cuales se imprimen las fotografías. Del mismo modo que no es habitual que un escultor esté presente en el momento en que su obra es fundida en bronce, yo entiendo que, como artista, no es fundamental para mi obra que sea yo quien ejecute el funcionamiento de la impresora mediante la que va a ser producida.

Retomando el tema del equipo, consideraremos entonces como única herramienta fundamental el ordenador con el software 3D.

Dependiendo del programa que empleemos, así deberán ser las características del ordenador que vamos a utilizar. Entre los periféricos que podemos necesitar para nuestros trabajos tridimensionales podemos contar con un escáner tridimensional.

#### 4.1. LAS HERRAMIENTAS

El ordenador se ha convertido en una herramienta fundamental no solo para el trabajo, sino también para la vida diaria. El mundo del arte no es ajeno a esto y los artistas del s.XXI deben conocer las posibilidades que la tecnología pone a su disposición. Esto no significa que sea fundamental generar la obra utilizando como herramienta el ordenador, también sirven para eso, pero son en este sentido, lo que son, una herramienta de creación más.

Pero las posibilidades que esta tecnología ofrece a los artistas no se limita solo al proceso creativo, sino que además, y con mayor repercusión e importancia, a las posibilidades que estas ofrecen para presentar y promover el arte. La creación de catálogos, así como páginas webs, blogs o incluso tiendas on-line donde vender nuestra obra suponen, para el artista del s.XXI, grandes oportunidades para dar a conocer su obra e introducirse en el mercado del arte.

Una herramienta complementaria y fundamental para un artista es una cámara fotográfica, con la que documentar su obra o incluso su proceso creativo.

#### 4.2. EL SOFTWARE

A la hora de afrontar la creación de cualquier tipo de proyecto o trabajo, el artista debe saber elegir la herramienta más adecuada. De la misma forma que no elegirá la misma herramienta cuando se trata de modelar un busto en arcilla que cuando se trata de una talla en madera, en la obra digital ocurre lo mismo. Por eso es fundamental saber el software con el que debemos trabajar según los resultados que deseemos obtener.

Los ordenadores funcionan con 3 niveles de software básicos:

- Software de sistemas.
- Software de programación.
- Software de aplicaciones.

El tipo de software relacionado con el objeto de esta tesis es el software de aplicaciones, pues estos programas son herramientas que funcionan dentro del sistema operativo con un objetivo específico.

Volviendo a la utilidad general que tiene un ordenador para cualquier tipo de artista, es necesario que sepamos trabajar las imágenes que tomemos de nuestra obra, para poder mostrárselas al mundo de la forma más fiel y adecuada para cada medio, por lo que es fundamental un software de edición de imágenes como el que ha sido utilizado para este proyecto **Adobe Photoshop CS6**. Este tipo de software nos permite manipular las imágenes, recortarlas, cambiarles el fondo, resaltar aspectos que consideremos necesarios entre otras acciones, y para el proyecto que nos ocupa es una herramienta sin la cual no habría sido posible su desarrollo.

El otro software fundamental para el desarrollo de este trabajo es el software de modelado 3D. Aunque todos los programas que enumero a continuación son programas de modelado 3D, no todos sirven para realizar el mismo tipo de trabajo. Hay software específico para levantar planos de edificios, software para iluminación y renderizado, de animación... Aunque habitualmente todos los programas cuentan con herramientas similares, es necesario conocer los puntos fuertes de cada uno de ellos para, de esta forma, poder elegir el más adecuado según el objetivo que nos hayamos marcado.

En lo que a modelado 3D se refiere, los programas más populares son **3DStudio Max** y **Autodesk Maya**. Ambos programas son muy completos, permiten el modelado poligonal y por curvas NURBS, iluminar, texturizar, animar, renderizar... Son programas muy potentes con gran cantidad de aplicaciones. Este trabajo se ha desarrollado utilizando estos dos programas pero existe una gran variedad con los que un artista se puede valer dependiendo del objetivo que tenga, aunque, cabe decir que, prácticamente todos los programas tienen opciones y herramientas similares.

**Blender** es un programa de código abierto, lo que significa que es gratuito. El programa se desarrolla, evalúa y mejora en un entorno de colaboración que hace de él un programa muy enfocado al usuario, ya que son los propios usuarios los que proponen cambios y mejoras. Contiene un motor de juegos incorporado y es muy factible para infoarquitectura, modelado en general y animación de personajes. Aunque el hecho de que sea un programa gratuito pueda hacernos dudar de sus capacidades, no tiene nada que envidiar a los grandes programas como Maya o 3DStudio. El diseño del entorno es un poco diferente, y si el usuario está acostumbrado ya a trabajar con otro programa le costará más adaptarse, pero las utilidades y características son prácticamente las mismas.

**ZBrush** es un programa enfocado al modelado en general y al mapeado UV (este concepto se explica más adelante). Ofrece un sistema de modelado orgánico con herramientas únicas en su estilo que permiten al usuario trabajar como si de una peya de barro se tratara. Existe una versión gratuita, **Sculptris**, con utilidades limitadas que nos puede servir para tomar un primer contacto o complementar el modelado realizado en otro programa como Maya o 3DStudio.

**Rhinoceros** es otro de los programas que merece ser destacado, con gran variedad de módulos y versiones enfocados a diferentes tipos de productos Rhinoceros puede crear, editar, analizar, documentar, renderizar, animar y traducir curvas nurbs, superficies y sólidos, nubes de puntos y mallas poligonales. Cuenta con la precisión necesaria para el diseño, los prototipos, la ingeniería, el análisis y la fabricación de cualquier producto, desde aviación hasta joyería.

#### 4.3. ESCÁNERES 3D

Un escáner 3D es una herramienta que sirve para digitalizar un objeto o una escena, analizando y recopilando la información sobre su forma y su color. Esta información se traduce en un archivo digital (este proceso se conoce como reconstrucción), un modelo tridimensional que

tiene diversas utilidades. El modelo obtenido por un escáner 3D describe la posición de cada punto analizado en el espacio.

De la misma forma que una cámara fotográfica reúne información de color acerca de las superficies dentro de su campo de visión, los escáneres 3D tienen un campo de visión igualmente en forma de cono, pero reúnen información acerca de la geometría de los objetos o el espacio.

Es habitual que se necesiten diversos escaneados o tomas de los objetos, desde diferentes direcciones, para obtener la información completa de los objetos escaneados. Mediante un proceso que se conoce como alineación se juntan las diferentes mallas escaneadas del mismo objeto, para conseguir una buena unión, las diferentes mallas obtenidas deben tener un área común clara de solapamiento.

Los escáneres tridimensionales se clasificarían en dos grupos dependiendo de si hay contacto del escáner con la superficie del objeto al escanear o si, por el contrario, el escáner no tiene contacto alguno con el objeto.

Los escáneres 3D por contacto analizan el objeto apoyando el palpador sobre la superficie del objeto a escanear.

Este palpador suele ser una punta de acero o zafiro y los sensores del escáner estudian la posición espacial del palpador.

Son escáneres muy precisos que pueden conseguir resoluciones de 0,01 mm, pero son bastante lentos teniendo en cuenta que la acción de palpar todo el objeto se realiza de manera manual. El mayor problema que presentan es a la hora de enfrentarse a elementos delicados como son objetos históricos, ya que el mero hecho de tocar con la punta del escáner su superficie puede poner en riesgo la integridad de la pieza.

Respecto a los escáneres que no funcionan mediante contacto, se pueden encontrar en el mercado muy diversas calidades, desde escáneres de muy alta calidad que pueden escanear pequeñas figuras, hasta fachadas, como el **VIVID PRO**, con el que cuenta la facultad de Bellas Artes de la Universidad Complutense de Madrid, pasando por escáneres manuales e incluso cámaras web que pueden convertirse en escáneres gracias a un software determinado como el que ofrecen en DAVID Vision Systems GmbH, una compañía nacida en 2009 a partir del Institute of Robotics and Process Control de TU-Braunschweig (Alemania), de la que se puede adquirir únicamente el software, un económico kit para principiantes consistente en unas cartas de ajuste y una pequeña webcam,

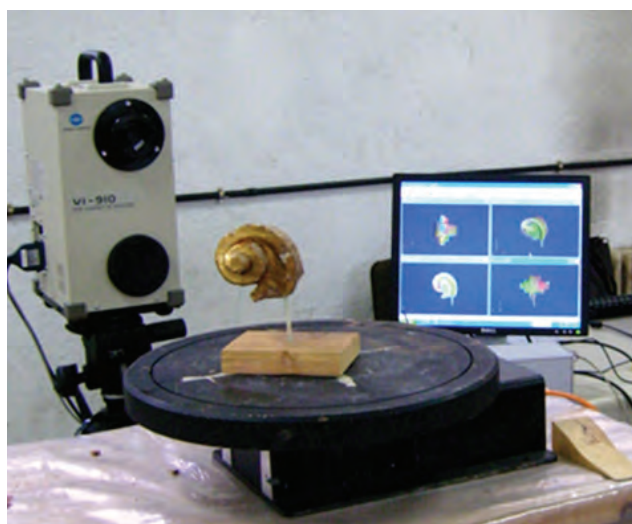


FIGURA 1

Escaner 3d VIVID PRO, de la facultad de bellas artes, escaneando una figura de bulto redondo.

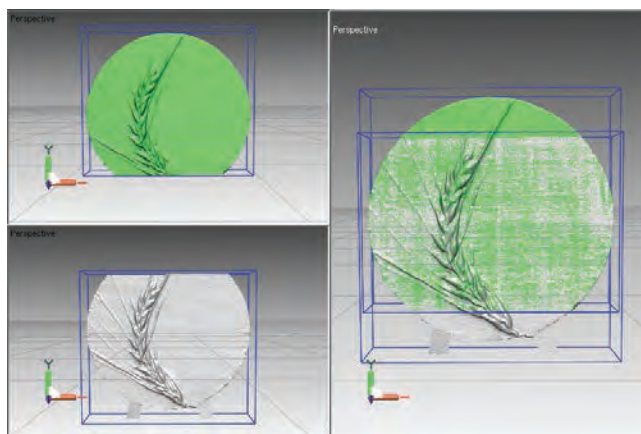


FIGURA 2

Proceso de escaneado 3d de una medalla. A la izquierda dos mallas generadas de la misma medalla, a la derecha la superposición de las dos mallas, con lo que se pretende conseguir una malla completa de la pieza. El proceso mediante el cual se superponen escaneos de una pieza y se unen para conseguir una única malla se conoce como *cosido de mallas*.

o un kit profesional que incluye un proyector con una óptica específica para que el proceso de escaneado sea muy sencillo y preciso.

El uso de un escáner tridimensional tiene muchas posibilidades, pero es importante saber que las mallas que se obtienen mediante su uso contienen errores de lectura y necesitan de un trabajo posterior. Además el número de polígonos que se generan de los objetos escaneados hacen que la manipulación de la malla sea complicada en un equipo convencional debido al peso del archivo aunque es importante recalcar que el nivel de detalle que se obtiene es muy alto.

#### 4.4. REALIDAD AUMENTADA

Se conoce como realidad aumentada a la tecnología que mezcla la realidad con el mundo virtual, no hay que confundirla con el término realidad virtual, el cual se refiere únicamente a una realidad que se desarrolla en un entorno digital. La realidad aumentada es una tecnología que enriquece el mundo real con información digital como vídeos, imágenes o incluso modelos tridimensionales, superponiendo esta información, en tiempo real, sobre la imagen que nosotros, como usuarios, vemos a través de nuestro dispositivo, ya sea un *smartphone*, una *tablet* o cualquier otro dispositivo que reúna las características necesarias para esta tecnología.

En la experiencia de la realidad aumentada intervienen diversos elementos. Lo primero que necesitaremos será un dispositivo con pantalla y cámara posterior. A través de la cámara posterior nuestro dispositivo captará la imagen que, instantes después, podremos visualizar en la pantalla enriquecida con la información digital.

Para que nuestro dispositivo pueda participar de esta tecnología será necesario que éste tenga instalado un software de realidad aumentada, hay muchos en el mercado, destacan **Layar** o **Aurasma**. Este software no funciona por sí solo, es necesario que nuestra cámara capte lo que se conoce como marcadores, que son imágenes que al ser reconocidas por el software provocan una respuesta específica como puede ser mostrar una imagen 3D. Todo aquello que es mostrado por el software va vinculado a un espacio tridimensional virtual cuyas coordenadas irán marcadas por la posición del marcador en nuestra cámara, consiguiendo así una integración prácticamente perfecta entre la imagen que nuestro dispositivo captura y la información digital que el software imprime sobre ella.

Teniendo en cuenta que la realidad aumentada se mueve en coordenadas espaciales (X,Y,Z) es fácil averiguar o intuir que aquí hay muchísimas posibilidades para la exposición de obra escultórica.

Ya hay artistas que trabajan exclusivamente con la realidad aumentada, siendo esta la base de su obra (Figura 3), pero incluso para artistas con un concepto de escultura más tradicional la realidad aumentada presenta grandes posibilidades. Por ejemplo, el hecho de escanear una obra y vincularla digitalmente a una imagen 2D puede hacer que en la otra punta del mundo una persona con un dispositivo digital pueda disfrutar de la obra, investigando y descubriendo sus volúmenes.

Los escultores siempre han tenido difícil crear catálogos de sus obras, pues resulta a veces realmente complicado plasmar en un formato bidimensional una obra volumétrica. Ahora, con la realidad aumentada estos catálogos de obras escultóricas pueden verse efectivamente enriquecidos al poder mostrar el volumen de nuestra obra.

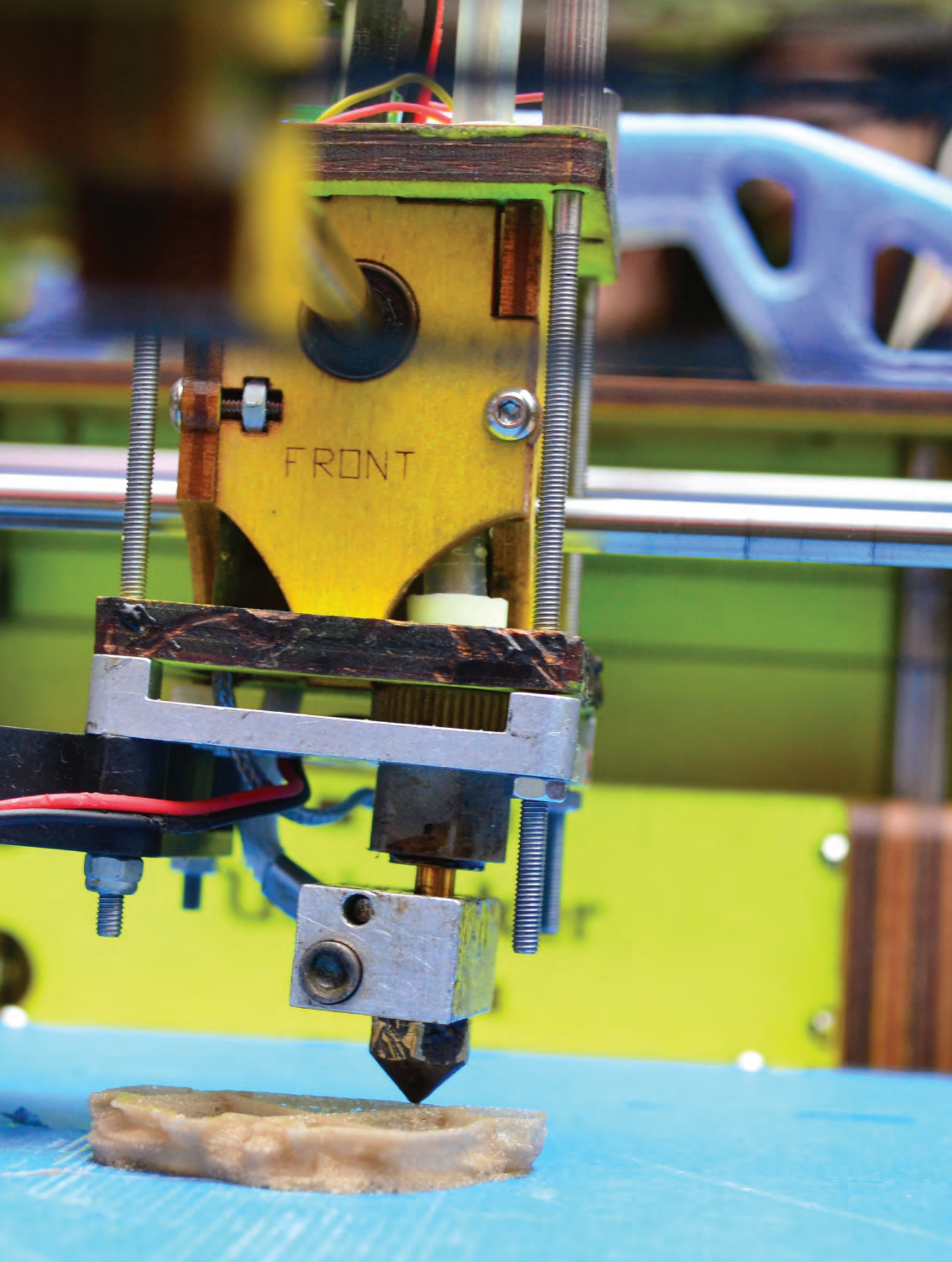
#### 4.5. CONCLUSIÓN

Las herramientas con las que un artista del s.xxi puede contar a la hora de trabajar son muy variadas y, como hemos visto, han cambiado mucho en los últimos años. Todas estas herramientas digitales tienen la gran virtud de que son económicamente muy viables (hay opciones gratuitas de todas ellas) y se puede trabajar desde un único equipo informático. Existe incluso la opción de que los artistas las puedan programar para adaptarlas a sus necesidades, aunque esto está ya más cerca de la ingeniería que de la creación plástica.



FIGURA 3

“Oyster City” proyecto artístico basado en la tecnología de realidad aumentada creado por Rachel Stevens, Phoenix Toews y Meredith Drum (2011).



Impresora 3D de modelado por deposición fundida en el **Makers Party**, de Bangalore, en noviembre de 2013.  
<http://journal.georgetown.edu>

# 5. PROCESOS DE PRODUCCIÓN 3D

## 5.1 PROTOTIPADO RÁPIDO

Se conoce como prototipado rápido a los sistemas automatizados mediante los cuales se fabrican protipos o piezas finales a partir de un modelo tridimensional. El primer proceso de prototipado rápido fue la estereolitografía, inventado en 1984 por Chuck Hull e introducido comercialmente en 1987.

Estos procesos pueden tardar desde horas hasta pocos minutos en producir una pieza que, mediante sistemas convencionales, podía llevar semanas o incluso meses. Habitualmente son más económicos y permiten la fabricación de piezas únicas que de otra forma tendrían que fabricarse mediante ensamblaje de varias partes.

Inicialmente se utilizaban precisamente para eso, para hacer prototipos de una forma más rápida y barata ya que no es necesario crear los costosos moldes ni seguir los procesos de fabricación para ver y analizar un prototipo antes de una gran producción, aunque en la actualidad, gracias a la gran variedad de procesos y materiales, son considerados como un proceso más de fabricación y los productos que se consiguen con ellos muchas veces son consideradors productos finales.

Hay varios procesos de prototipado rápido y se podrían clasificar en dos grandes grupos: procesos aditivos (conocidos también como *additive manufacturing*) o procesos sustractivos.

En los sistemas sustractivos un bloque de material es tallado hasta conseguir la pieza deseada. Son procesos de difícil aplicación en modelos con partes internas o geometrías complejas o delicadas. No solían estar recomendados para piezas de tamaño pequeño o de gran detalle, pero se ha desarrollado mucho la técnica enfocada a la talla de ceras para joyería consiguiendo gran nivel de detalle.



FIGURA 1

Imagen de una máquina fresadora, **Roland MXD40**, en funcionamiento tallando una pieza de cera.

El objeto de este trabajo no se ha centrado en los procesos substractivos, hay una gran variedad de tornos, fresadoras y maquinaria que hace todo tipo de trabajo substractivo y dependiendo del material la forma de trabajarlo es muy diferente.

Lo que realmente se conoce como nuevas tecnologías de prototipado rápido son los procesos aditivos, de ahí que muchas veces se utilicen de manera indistinta los terminos *rapid prototyping* (prototipado rápido) y *additive manufacturing* (fabricación aditiva). Estos sistemas aditivos se pueden clasificar por proceso o por material.

Una clasificación posible sería la de ordenar las opciones que brinda la impresión 3D según el material en el que nos interesa producir nuestro objeto. Así, Stuart Deutsch en un artículo de diciembre de 2012 en la revista MAKE (SPECIAL ISSUE: 3D Printing, p.24) los clasifica en cuatro grandes grupos:

1. **Polvos cerámicos:** impresoras de cama de polvo o 3D *inkjet printing*.

2. **Plásticos y resinas:** estereolitografía, sinterizado láser selectivo e impresión de fotopolímeros por inyección.

3. **Metales:** DMLS, DIRECT METAL PRINTING.

4. **Ceras:** la cera para fundir se puede trabajar tanto en procesos aditivos como sustractivos. Lo más habitual para este material ha sido, hasta la fecha, trabajarlo con tornos de modelado tipo **ROLAND**.

Después de realizar todo el proceso de estudio de los sistemas, si tuviera que hacer una división por materiales no sería la ofrecida por la revista Make. Según el material dividiríamos los sistemas en aquellos basados en el uso de fotopolímeros, termoplásticos, metales, yesos y ceras.

Los sistemas basados en el uso de **fotopolímeros** comienzan con una resina líquida, que solidifica por exposición a una luz con una longitud de onda determinada. Estos procesos serían la estereolitografía y la impresión de fotopolímeros por inyección (*multijet printing* y *polyjet printing*), mediante este último proceso también se puede trabajar la cera.

Los **materiales termoplásticos** son sólidos que se pueden encontrar de dos maneras: en polvo o sólido en forma de cable o alambre.

Los materiales sólidos en forma de polvo son fundidos mediante la incidencia de un láser, y aquí encontraríamos el **Sinterizado Láser Selectivo** como el sistema principal.

Cuando no se encuentran en forma de polvo y, por el contrario, la forma física es como si de un cable se tratara, el sistema que se aplica para convertir el material termoplástico en un objeto tridimensional es el sistema de **Modelado por Deposición Fundida**.

Los sistemas adhesivos utilizan un aglutinante para unir las diferentes partículas del material sólido en forma de polvo con una composición parecida a la del yeso, como ocurre con la impresión tridimensional por inyección de tinta (*3D Inkjet printing*).

Pero, sin lugar a dudas, la clasificación más clara para estas tecnologías no es la que se hace por materiales, sino por procesos.

Para estudiar estos procesos los dividiremos de la siguiente manera:

1. **Sinterizado Láser Selectivo (SLS)**
2. **Estereolitografía (SLA)**
3. **Modelado por Deposición Fundida (MDF)**  
(*FDM: Fused Deposition Modelling*)
4. **Impresión 3D por inyección de tinta**  
(*3D inkjet printing*)
5. **Inyección de fotopolímero**  
(*Multijet/Polyjet Printing*).

## 5.2. EL PROCESO BÁSICO

Aunque existen varias técnicas y materiales, la base de los procesos aditivos de prototipado rápido es la misma.

Inicialmente se necesita un modelo 3D que será el que queremos producir. Este archivo 3D CAD será convertido en un archivo .stl, que es el formato de archivo que la impresora interpretará para producir el objeto.

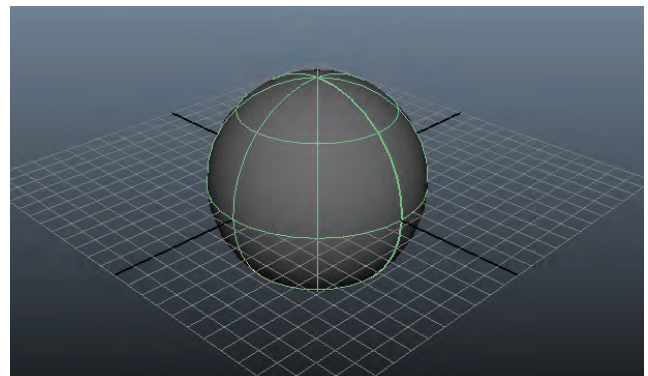
**STL** es el formato que se creó para el primer proceso comercializado, la estereolitografía (*stereolithography*, de ahí STL). Es el archivo adoptado como estándar por todos los sistemas y se caracteriza porque el modelo está compuesto por caras triangulares. El archivo STL contiene las coordenadas donde se encuentran los vértices y la normal de la cara, que es lo que indica hacia donde está mirando el objeto (delimita lo que sería la cara exterior y la interior).

Al tratarse de un archivo o modelo compuesto por caras planas triangulares no puede representar superficies curvas de una forma exacta, la curvatura se representa por el número de caras triangulares que componen el objeto, así cuanto más aproximado a una curva perfecta queramos el modelo, más caras triangulares contendrá y más pesará el archivo.

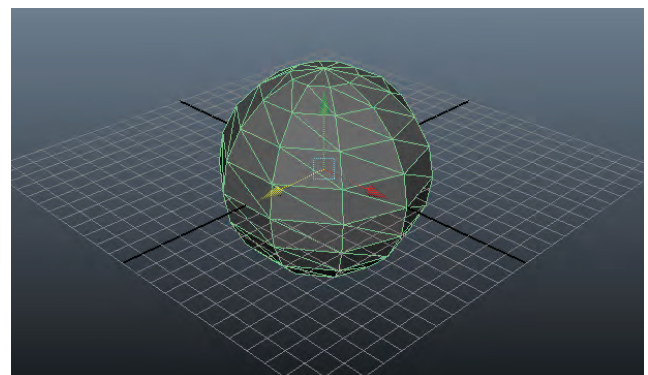
No suele ser necesario modelar los objetos a base de triángulos. Habitualmente es tan sencillo como que una vez modelado exportemos el modelo al formato STL, y es conveniente comprobar que el archivo exportado no contiene errores y que la traducción de nuestro modelo a un modelo compuesto por triángulos no influye en la calidad de nuestra pieza.

El formato STL no es el único formato que hoy en día admiten las diferentes máquinas de prototipado, otros formatos disponibles suelen ser **DAE**, **OBJ**, **X3D**, **X3DB**, **X3DV** o **WRL**. Si se trata de un archivo que además de llevar la información geométrica del modelo también incluye información sobre su color o textura (entendida como imagen) entonces se limita el tipo de formatos a DAE, WRL, X3D, X3DB y X3DV. La textura visual aplicada al modelo debe estar siempre en modo de color **RGB** (las impresoras traducen el color automáticamente a **CMYK**) y en los formatos **GIF**, **JPG** o **PNG**.

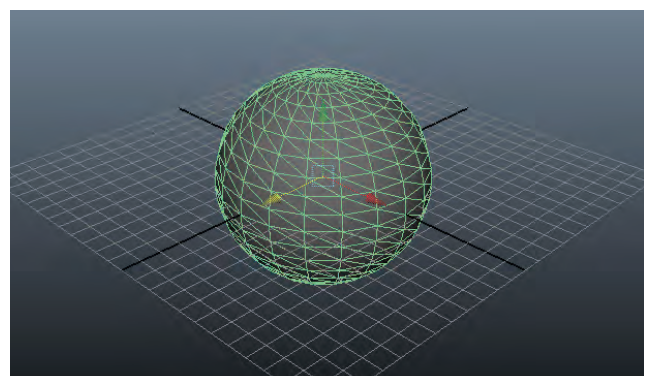
Una vez definido el modelo y creado el archivo STL, el software de la impresora prepara este archivo para su producción. Este programa nos permitirá ajustar el tamaño de la pieza, la localización de la misma en el área de impresión y su orientación. La orientación de nuestra pieza en relación a los ejes Y, X y Z de la impresora tiene más importancia de la que puede parecer.



a) Esfera generada mediante curvas. No tiene planos y la superficie es curva, es un modelo que no se puede producir.



b) La misma esfera con caras triangulares, los planos son muy evidentes.



c) A medida que mejoramos la resolución de las partes curvas, los planos y aristas son menos evidentes.

FIGURA 2

Diferentes métodos de configurar una esfera en un programa de modelado 3D.

Aunque el margen de error de los diferentes procesos es mínimo suelen ser menos exactos en el eje Z que en el plano XY. Esto se debe a que así como la impresora controla perfectamente como se mueve el cabezal o el haz de luz/láser en el plano XY, otros factores influyen en la precisión en que se genera el eje Z, como la exactitud del grosor del material o el movimiento de la base de fabricación (al tener que descender normalmente la misma distancia que el grosor de la capa, que se va a ejecutar, el margen de error es superior).

Además la colocación de nuestro modelo influirá en el tiempo que tarde el modelo en ser producido incluso en el efecto de dientes de sierra que puede apreciarse en determinados modelos y materiales (Figura 3).

El efecto de dientes de sierra se debe a que los modelos se fabrican capa a capa. Para ello, el software de preprocesamiento corta el modelo en capas que habitualmente varían entre 0,01 mm y 0,07 mm (dependiendo del material en que se vaya a producir). Este procedimiento se conoce como *slicing* (rebanado).

Según el modelo y el proceso en que se vaya a producir, este software calcula también la estructura de sujeción necesaria para asegurar la fabricación correcta del modelo, cuando tiene partes delicadas como voladizos o secciones finas.



FIGURA 3

En esta pieza fabricada mediante impresión tridimensional de inyección de tinta, se aprecia a simple vista las líneas horizontales que definen como se ha fabricado la pieza desde su base, dejando un efecto de dientes de sierra.

Una vez que el objeto está colocado en la posición correcta y el software ha preparado la estructura de soporte, en caso de ser necesaria, solo queda producir la pieza y el método de producción será diferente según el proceso y el material en que se vaya a producir.

### 5.3. VENTAJAS GENERALES DE LOS PROCESOS ADITIVOS

Entre las ventajas más destacadas de cualquiera de estos procesos, la fundamental es el tiempo de producción. Son procesos muy rápidos y dependiendo del tamaño de la pieza, esta puede tardar en producirse tan solo un par de horas, frente a los procesos de fabricación tradicionales.

Por otro lado su limitación principal es el coste frente a las producciones a gran escala, aunque esto puede cambiar si el diseño tiene la suficiente complejidad como para que sea fabricado como una pieza única mediante cualquier otro proceso.

Como cualquier otro proceso de fabricación, el máximo beneficio se logra si el diseño en sí mismo tiene en cuenta el proceso de fabricación. Por ejemplo, el ensamblaje de conducto superior de la Figura 4, está compuesto por 4 piezas y 12 cierres o remaches sin tener en cuenta los



FIGURA 4

El objeto superior se compone de varias partes, fabricadas mediante sistemas tradicionales de moldes. El inferior está formado por una única pieza que sería imposible fabricar con moldes pero que gracias a las nuevas técnicas de prototipado se podría producir.

adhesivos y requiere de diferentes fases de ensamblaje para componerlo. Este elemento, sin embargo, podría ser reemplazado por una única pieza producida mediante un sistema de prototipado aditivo, como el Sinterizado Láser Selectivo como se muestra en la imagen inferior de la figura 4, resultando una pieza realizada con menos componentes, reduciendo el peso, aumentando su fuerza o resistencia y sin requerir proceso de ensamblaje. Claramente el diseño de piezas para los procesos aditivos de prototipado rápido tienen ciertas ventajas que imposibles en los procesos tradicionales de fabricación.

#### 5.4. REQUERIMIENTOS DEL MODELO 3D PARA IMPRESIÓN

Aunque las nuevas tecnologías de prototipado dan mucha libertad creativa hay que tener en cuenta unas pequeñas normas que nuestro modelo debe cumplir para poder ser producido en cualquiera de los procedimientos existentes.

Los objetos deben ser sólidos, esto significa que deben estar cerrados, las máquinas de prototipado no pueden procesar planos, deben procesar volúmenes poligonales. Un sólido es un volumen y su superficie exterior debe estar completamente cerrada y unida. Esto no significa que no puedan tener agujeros o cavidades, claro que pueden, pero el objeto debe tener “paredes”

con grosor (recomendado nunca menor de 0,8 mm) pero nunca debe tener un grosor 0 como ocurre con los planos.

##### 5.4.1. Manifold objects

Cuando en la jerga de prototipado 3D encontramos que nuestros archivos deben ser *manifold objects* significa básicamente que los ejes que componen nuestro modelo no pueden ser compartidos entre más de dos caras o polígonos. Este es un tema que puede resultar bastante obvio pero cuando un artista está modelando en un entorno 3D es bastante común que al utilizar diferentes herramientas para modelar se generen planos ocultos o internos en el objeto que compartan ejes con los planos exteriores del modelo. A la hora de ser interpretado por una impresora tridimensional, esta no encuentra lógica física a este hecho y no es capaz de producir la pieza. Por eso es importante revisar el modelo antes de mandarlo a producir.

##### 5.4.2. Normales

Un polígono situado en un espacio de coordenadas tridimensional tiene, por necesidad, una orientación. Se enfrenta a una dirección única. Un rayo imaginario apuntando hacia fuera de la superficie del polígono, y perpendicular a esa

superficie, se conoce como normal del polígono. En el mundo físico real se puede considerar que siempre habrá dos normales, una a cada lado de la superficie, si no tenemos en cuenta que un polígono en el mundo real siempre formará parte de un poliedro dado que nada en él, por muy fino que sea, tiene grosor 0, no existe la bidimensionalidad. En el mundo de los gráficos y modelado tridimensional, es habitual que un polígono tenga solo una cara o lado, y por lo tanto solo una normal. Esto se debe a que los polígonos se utilizan normalmente para crear una malla cerrada que representa la superficie de un objeto tridimensional y, por lo tanto, la cara trasera del polígono se oculta en el interior del objeto.

Lo habitual es que los polígonos tengan solo una normal pero, cuando se trata de gráficos tridimensionales, puede ser necesario que tengan dos normales contrapuestas. Sin embargo, recordemos que para el tema que nos aplica necesitamos que nuestro modelo sea una malla cerrada, un poliedro.

Las normales ayudan a comprobar si una superficie está definida correctamente y para que las máquinas de prototipado puedan distinguir entre lo que está dentro y lo que está fuera del modelo es fundamental que estén bien configuradas.

#### 5.4.3. Grosor de las paredes

Dependiendo del método de producción y del material elegido variará el grosor mínimo que deben tener las paredes de nuestro modelo. Habitualmente, aunque el grosor mínimo estándar al que imprimen los diferentes procesos es de 0,7 mm, intentaremos no bajar estos grosores a menos de 1 mm para asegurar el éxito en la producción. Por debajo de 0,7 mm, las piezas son frágiles y tienden a romperse antes de finalizar el proceso de producción.

#### 5.4.4. Detalle de superficie

Los diferentes fabricantes suelen marcar la profundidad o altura mínima de los detalles en relieve para que sean perceptibles entre los 0,2 mm y los 0,5 mm. Por supuesto estas medidas están destinadas a asegurar la lectura de estos relieves, pero más adelante veremos que en este proyecto se estudia más a fondo las calidades de los relieves en diferentes procesos y materiales.

#### 5.4.5. Tamaño máximo

Cada máquina marca las medidas máximas de producción para cada proceso, si bien casi todos los procesos pueden producir piezas de un máximo de 300 x 300 x 300 mm hay máquinas

que no llegan a esos volúmenes y máquinas de gran formato que superan el metro cúbico. Las diferentes tecnologías de impresión ofrecen un nivel de precisión tal, que las piezas de gran formato se pueden producir en varias partes y luego ser ensambladas, de tal forma que la unión es prácticamente imperceptible.

#### 5.4.6. Agujeros de vaciado

La cantidad de material utilizado para producir las piezas es el factor principal que marcará el coste de producción, por lo que siempre hay que intentar reducir esta cantidad al mínimo. Para ello, la mejor solución es la de vaciar nuestro modelo para no gastar material de forma innecesaria. Vaciar nuestro modelo no significa únicamente hacerlo hueco, también significa que haremos agujeros de escape para que todo el material no procesado pueda salir y así no se desperdicie.

#### 5.4.7. Resolución del archivo

Es importante tener en cuenta la resolución de nuestro archivo. Al exportar nuestro objeto a formato STL, éste se convierte automáticamente en un objeto formado por facetas de forma triangular, por lo que lo mejor es que nuestro objeto tenga las suficientes subdivisiones como para que al hacer la exportación, los lados de cada una de las facetas que componen

nuestro objeto midan alrededor de 0,05 mm. Resoluciones bajas pueden dar como resultado efectos de facetas o bloques en nuestro modelo y posterior objeto físico. Al haber una limitación de polígonos máximos para que un archivo sea imprimible (esta se suele establecer en un millón de polígonos, pero más adelante veremos como se pueden imprimir objetos con muchos más polígonos). Se sobrentiende que un modelo tridimensional impreso a una escala menor, tendrá mayor resolución que si se imprime a mayor escala.

## 5.5. SINTERIZADO LÁSER SELECTIVO (SLS)

**Sinterizado láser selectivo** o sinterización selectiva por láser es un proceso de impresión 3D desarrollado a mediados de los años 80 en Estados Unidos por Carl Deckard (por entonces estudiante de la Universidad de Texas) y su profesor de Ingeniería Mecánica Joe Beaman. «Sin embargo no fue hasta 1991 cuando las primeras máquinas de sinterizado láser (Sinterstation® 2000 de DTM Corporation versión beta) fueron instaladas en KODAK y en University of Louisville, siendo estas impresoras comercializadas en 1992» (Storey y Booth,2012).

### 5.5.1. El proceso

El proceso, como cualquier sistema de prototipado 3D, parte de un archivo 3D CAD, que es dividido matemáticamente en capas o secciones 2D.

Una capa de polvo, que en los primeros desarrollos era de poliamida (comercialmente conocido como nylon), de unas décimas de milímetro, es depositada en una cuba calentada a una temperatura ligeramente inferior al punto de fusión del polvo. Un láser CO<sup>2</sup> incide sobre

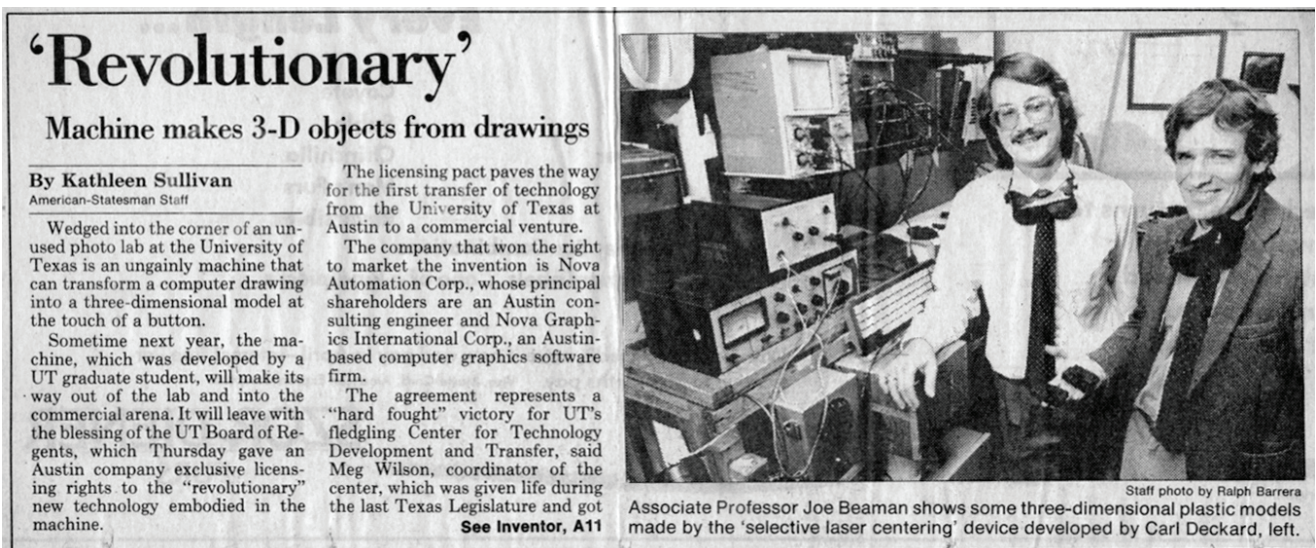


FIGURA 1

Recorte de prensa del periódico Austin American Newspaper, fechado en 1987, que habla sobre la impresión 3D. En la imagen se puede ver a Joe Beaman y Carl Deckard.

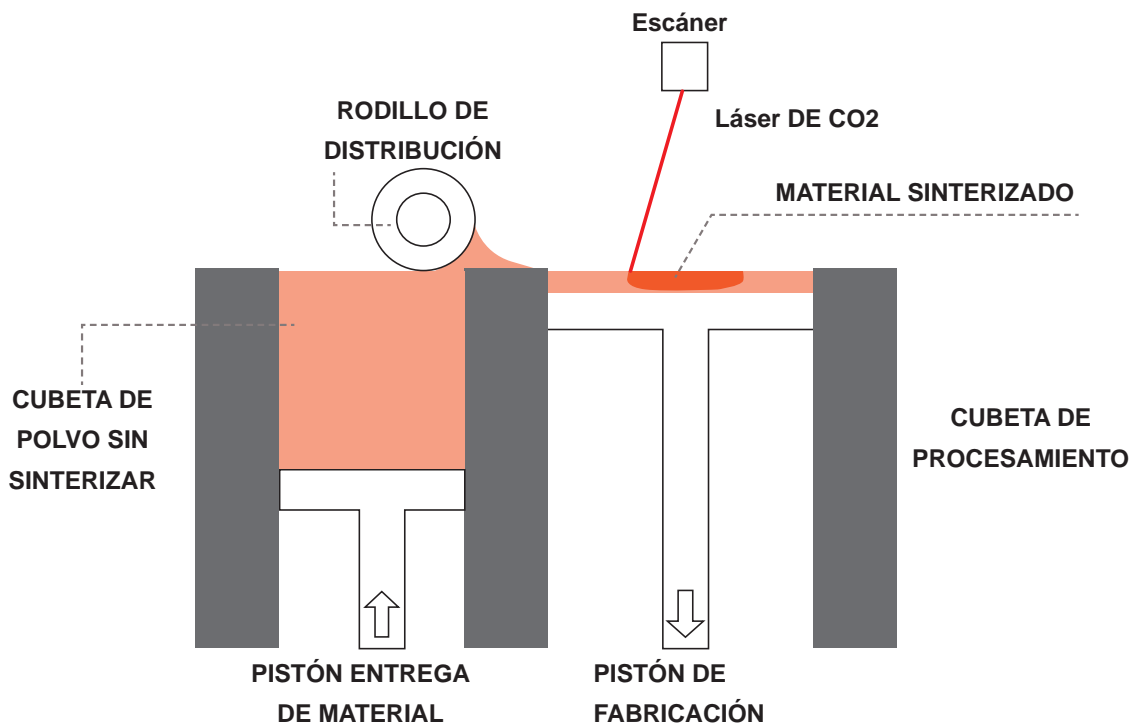


FIGURA 2

Esquema básico de la estructura de una máquina de prototipado por Sinterizado Láser Selectivo.

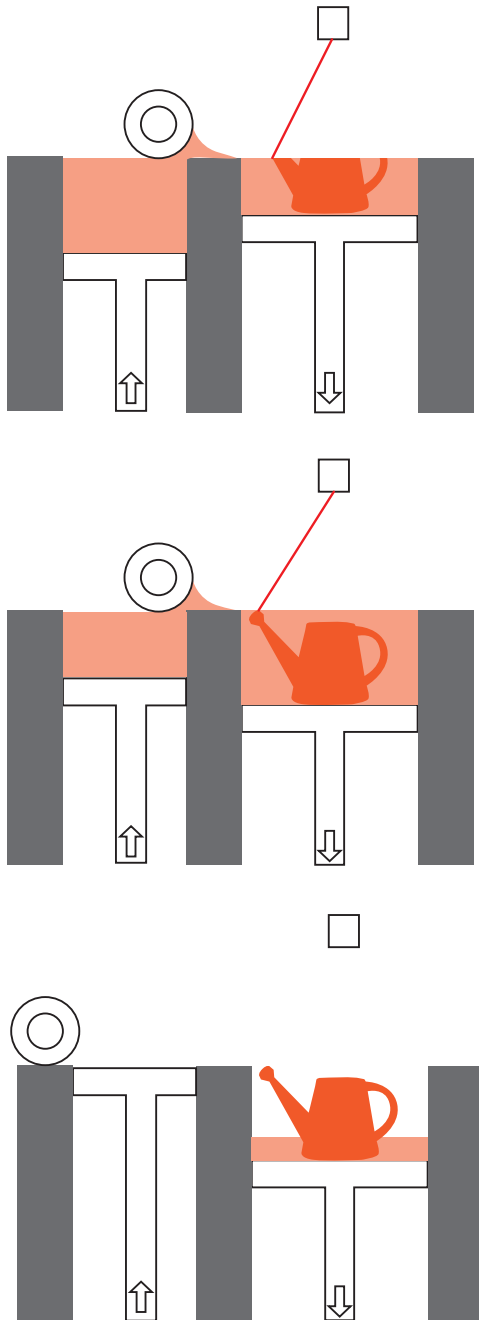
el polvo en puntos seleccionados mediante el barrido de finas capas transversales haciendo, mediante la aplicación de calor, que las partículas se fusionen y solidifiquen. El sinterizado tiene lugar entre las partículas de una misma capa y la capa inmediatamente inferior, generando así el objeto tridimensional.

El láser (de CO<sup>2</sup> y una potencia de salida de aproximadamente 60w) calienta el polvo justo por debajo del punto de ebullición (sinterizando) o por encima (fundiendo), fusionando así las partículas del compuesto para conseguir un objeto sólido.

El haz láser va configurando la geometría establecida por el programa de control, gracias a un sistema de espejos que lo conducen. El grosor de la capa puede ser configurado con el software de la máquina, pudiendo oscilar entre 0,10 mm y 0,15 mm.

El proceso sería el siguiente:

1. Sobre la cubeta se dispone una fina capa de polvo de tan solo unas micras de espesor (habitualmente de menos de 0,1 mm).



2. El láser pasa por encima de esta capa de polvo incidiendo sobre las partículas que se van a fusionar.

3. La cubeta desciende tantas micras como espesor tiene la capa de polvo y entonces el cabezal vuelve a extender una capa del compuesto para así repetir el proceso tantas veces como capas se necesiten para completar el objeto a producir.

A diferencia de otros procesos como la estereolitografía o el Fused Deposition Modeling, el SLS no necesita fabricar soportes para sustentar la pieza durante su fabricación, ya que la parte sinterizada se encuentra rodeada de polvo sin sinterizar que actúa de soporte.

Inicialmente este láser sinterizaba básicamente nylon (puro, con fibras de vidrio u otras fibras), pero la tecnología ha evolucionado y ahora es posible sinterizar diferentes compuestos. Así, dependiendo de la fuente que estudiemos, podemos encontrar clasificado dentro del SLS o de forma independiente otro proceso, el Sinterizado Láser Directo de Metal o *Direct Metal Laser Sintering* (DMLS).

El proceso DMLS es exactamente igual que el SLS de no ser porque el polvo que se utiliza no es a base de poliamida. Se trata en este caso de un

FIGURA 3

Esquema básico del funcionamiento del sistema de Sinterizado Láser Selectivo.

polvo de origen metálico, habitualmente hierro, aluminio o titanio. En este trabajo incluimos el DMLS dentro del SLS, ya que el proceso por el cual se compone el objeto tridimensionalmente es el mismo,

### 5.5.1. Materiales

La tecnología SLS puede imprimir en muchos materiales de gran calidad, desde materiales plásticos flexibles, hasta cerámicas (aunque este último proceso no está comercializado, si es una de las posibilidades que la tecnología del sinterizado permite). Las primeras pruebas de sinterizado láser selectivo se realizaron con cera, y con el desarrollo de nuevos materiales

se desarrollaron también las aplicaciones tecnológicas de los elementos fabricados mediante este procedimiento. La introducción de la poliamida 11, en 1993, permitió la creación de un prototipo realmente funcional. Así el Nylon 11 y Nylon 12 se han mantenido como los materiales base para la mayoría de los compuestos que se utilizan en el SLS. Los objetos impresos con Nylon 11 han mejorado en lo que respecta a sus aplicaciones mecánicas gracias a su fuerza y resistencia.

Hoy en día entre el 85 %-90 % de las impresoras de SLS del mercado son capaces de procesar Nylon 11 y 12.

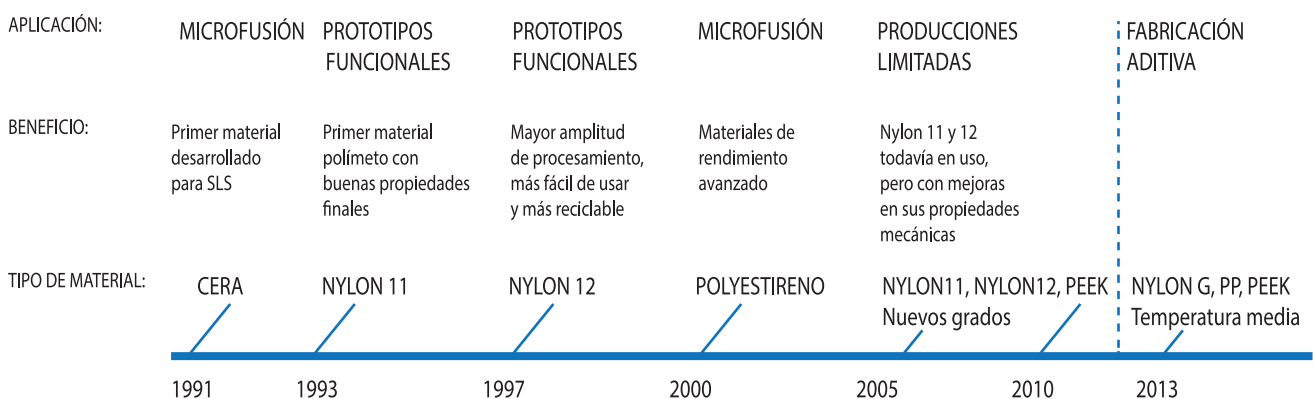


FIGURA 4

Línea temporal que muestra el desarrollo de la aplicación de diferentes materiales para el Sinterizado Láser Selectivo. (Storey y Booth, 2012).

MATERIAL	GROSOR MÍNIMO	CARACTERÍSTICA DIFERENCIADORA
PA11 : Nylon 11	0,60 mm	Alta resistencia y elasticidad
PA11-FG50 : 50% Nylon 11 50% Fibra de Vidrio	0.85 mm	Más resistente que el PA11 pero menos elástico
PA12 : Nylon 12	0,85 mm	Acabado con más detalle pero menos elástico.
TPE : Termoplástico Elastómero	0,60 mm	Acabado tipo goma.
PEEK	0.60 mm	Aplicaciones médicas en sustitución del acero inoxidable y el titanio.
ACERO INOXIDABLE 17-4	0.85 mm	Prototipos funcionales.
ACERO INOXIDABLE 15-5	0.85 mm	Prototipos funcionales.
ACERO MARTENSÍTICO	0.85 mm	Aleación de acero y cromo entre otros. Piezas para industria aeroespaciales
CROMO COBALTO	0.85 mm	Aplicaciones médico-dentales
INCONEL 625 y 718	0.85 mm	Aleación de níquel y cromo entre otros. Alta resistencia a la corrosión.
TITANIO	0.85 mm	Peso específico bajo. Creación de prototipos funcionales.

FIGURA 5

Tabla de materiales principales utilizados en SLS y DMLS.

El Peek es el último polímero de alto rendimiento «introducido por EOS en 2009. Este polímero pertenece al grupo de la poliariletercetona (PAEK), es un polímero semicristalino y termoplástico apto para producir piezas de gran resistencia que ofrecen propiedades mecánicas mejores que los materiales dominantes que

hay hasta ahora en el mercado: el Nylon 11 y Nylon 12» (Storey y Booth, 2012). Los materiales PEEK requieren de una alta temperatura para ser procesados, fundiéndose las partículas a una temperatura de 370 °C.

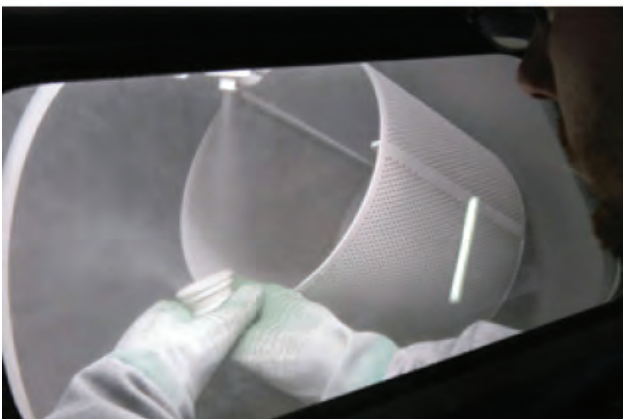


FIGURA 6

Imágenes de la extracción y limpieza de la pieza una vez impresa. ([www.materialise.com](http://www.materialise.com)).

### 5.5.2. Resolución

La resolución en la Sinterización Láser Selectiva viene dada por un lado por el grosor de la capa, que suele estar entre 0,1 mm y 0,15 mm y el grosor del láser que suele estar entorno a los 0,3 mm.

### 5.5.3. Ventajas

Entre las ventajas que ofrece el proceso de fabricación mediante SLS destaca el hecho de que el material sin fundir o sinterizar funciona como soporte, por lo que la SLS funciona bien para modelos que tienen partes finas, zonas al aire o geometrías complejas. Esto supone en sí mismo un ahorro, ya que no será necesario fabricar piezas de soporte durante el proceso de fabricación, lo cual de otro modo implicaría un sobrecoste adicional.

Respecto al material, si hablamos de las poliamidas, sus características mecánicas, en muchas ocasiones, son próximas a las que corresponderían al material utilizado mediante procesos de fabricación convencionales.

El Sinterizado Láser es un proceso que se utiliza para fabricar rápidamente objetos de una compleja geometría, que son a la vez funcionales y duraderos. Tiene muchas ventajas entre ellas

el alto nivel de detalle y amplio abanico de materiales: plásticos, metales.... Casi todos con alta tolerancia a la tensión y resistencia térmica.

La producción con SLS es ideal para piezas donde la complejidad geométrica hace que sea difícil de producir a través de procesos de fabricación tradicionales.

Los objetos fabricados mediante SLS requieren de muy poco trabajo adicional después de impresos, es decir, no necesitan pasar por otro tipo de procesos, el objeto impreso es el definitivo, si bien, acepta una amplia gama de tratamientos posteriores como una lija fina o aplicar algún tipo de pátina o tinte como aparece la Figura 7.

Cuando las dimensiones del objeto a producir son mayores que las que la impresora permite, la solución es imprimir el objeto en varias partes y unir las mediante un adhesivo. Para la gran mayoría de los materiales los pegamentos basados en el uso de resina epoxy suelen dar muy buen resultado.

Cabe destacar, como inconveniente, que el Sinterizado Láser Selectivo desperdicia bastante material, ya que hasta el 30 % de material no sinterizado debe ser reemplazado por material nuevo.

#### 5.5.4. Aplicaciones

Las aplicaciones del sinterizado láser a nivel industrial son muy amplias, por ejemplo en la industria aeroespacial se utiliza esta tecnología para construir prototipos de partes de aviones.

Gracias al SLS, las compañías pueden crear prototipos que son almacenados de forma digital como archivos .stl que pueden rediseñar o volver a imprimir cuando lo necesiten.

El SLS es un proceso que es poco habitual en lo que a la producción particular se refiere, dado que es un sistema que requiere de potentes láseres para funcionar. Esto hace de esta tecnología un sistema muy caro, además de ser potencialmente más peligroso que otros sistemas como el *Fused Deposition Modeling*.

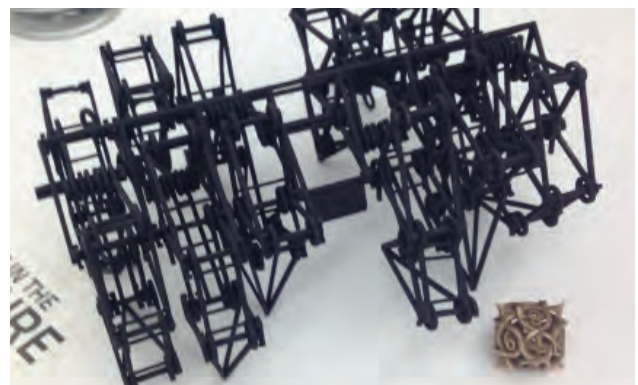


FIGURA 7

*Animaris Geneticus Ondularis*, obra de Teo Jansen, impresa mediante Sinterizado Láser Selectivo por Shapeways. El color original de la poliamida que se utiliza en estos procesos es blanco pero puede teñirse, ya que acepta muy bien el color. En la imagen la pieza teñida de negro.

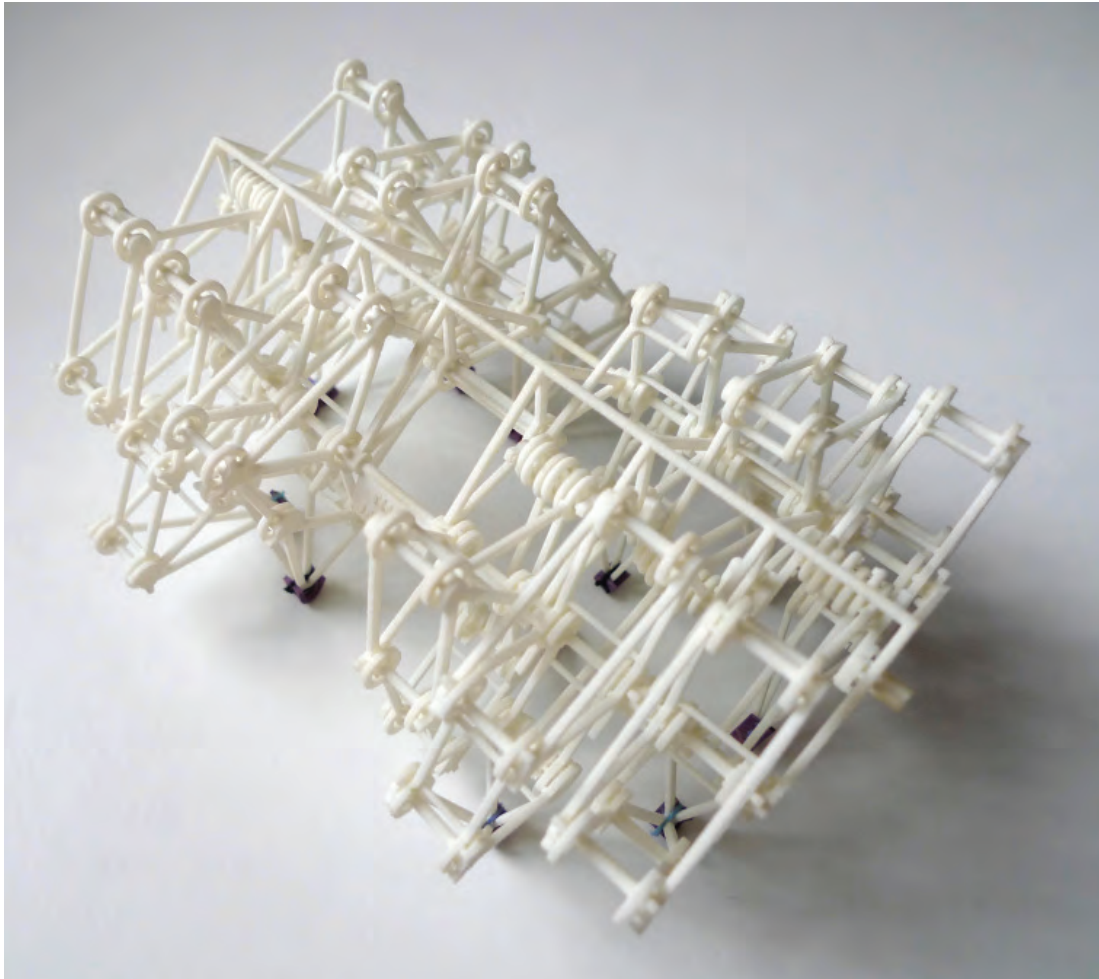


FIGURA 8

*Animaris Geneticus Ondularis*, obra de Teo Jansen.  
18.48 cm. x 14.884 cm x 8.708 cm.

## 5.6. ESTEREOLITOGRAFÍA

En 1984, Chuck Hull inventó el primer sistema de impresión tridimensional y lo llamó **Estereolitografía** (SLA). Comercialmente el sistema vería la luz en 1987, de ahí que en algunas fuentes se cite este año como el año del nacimiento de los sistemas de impresión 3D.

Es el sistema que estableció las bases para el resto de los procesos. A partir de un modelo 3D, un software de procesamiento divide este modelo en capas mediante un proceso conocido como *slicing* (rebanar), para luego generar el modelo 3D a partir de esas capas generadas.

La estereolitografía es el proceso mediante el cual un haz de luz ultravioleta convierte en sólido un fotopolímero líquido.

### 5.6.1. El proceso

La fabricación se realiza en una cubeta o tanque relativamente grande lleno de un polímero líquido que se “cura” mediante la incidencia de un haz de luz ultravioleta que lo solidifica. La impresora dibuja la primera capa sobre una fina capa de polímero líquido.

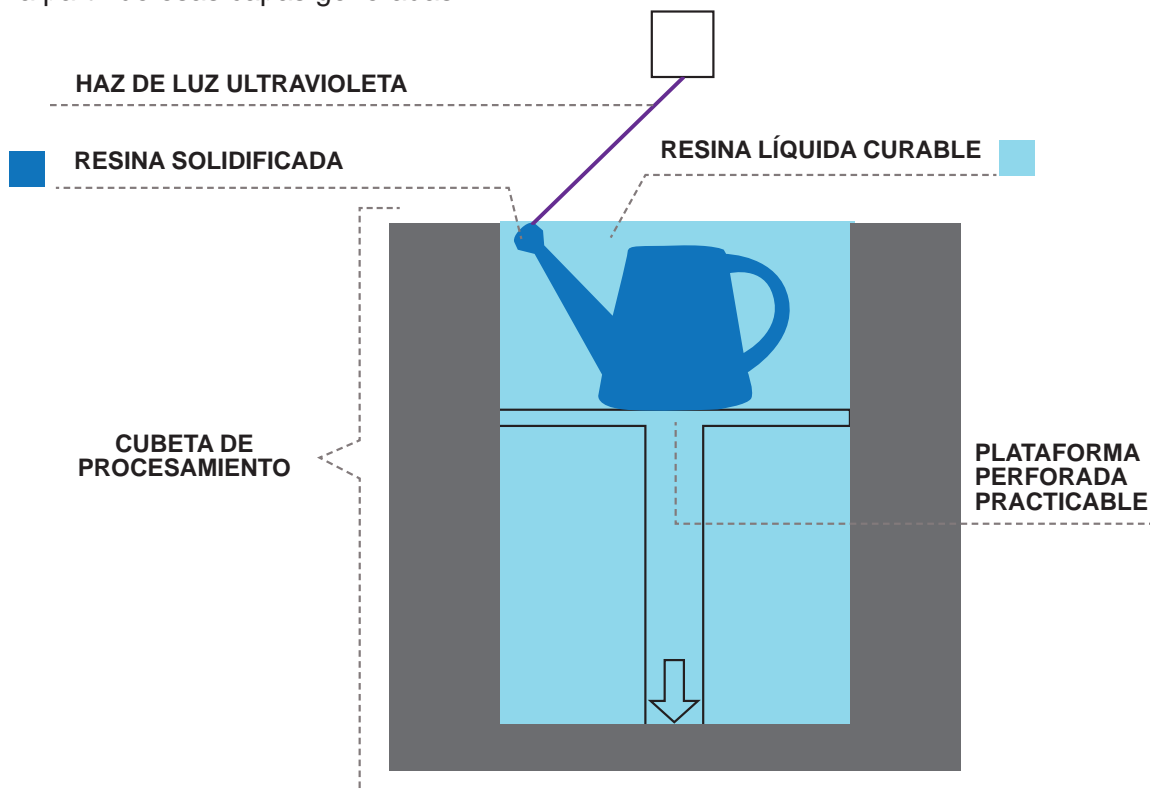


FIGURA 9

Esquema básico de la estructura de una máquina de prototipado por estereolitografía.

Una vez dibujada esta primera capa la plataforma perforada sobre la que esta capa se ha solidificado desciende, sumergiéndose en el líquido tanta distancia como grosor tienen las capas creadas por el software de la impresora. Entonces el haz ultravioleta dibuja la siguiente capa sobre la que ya está creada, repitiéndose el proceso hasta que la pieza está completamente creada. Cuando el objeto ha terminado de crearse en la cubeta, la plataforma asciende sacando el objeto del fotorresina líquida (Figura 10).

El software de la máquina, además de traducir el modelo en capas ultrafinas que serán posteriormente procesadas, genera una estructura de sujeción del modelo 3D dependiendo de como sea este modelo para evitar que las partes delicadas se puedan romper o mover durante el proceso de producción. Los soportes creados se retiran manualmente antes de extraer el modelo de la impresora.

Una vez que la pieza ha salido de la impresora, se limpia en disolventes para eliminar todo resto de material no fotorresina y se introduce la pieza en una cámara ultravioleta para terminar de curar el material.

En los procesos estereolitográficos el desperdicio de material es prácticamente inexistente, ya que la resina que no ha sido fotorresina puede utilizarse en procesos posteriores.

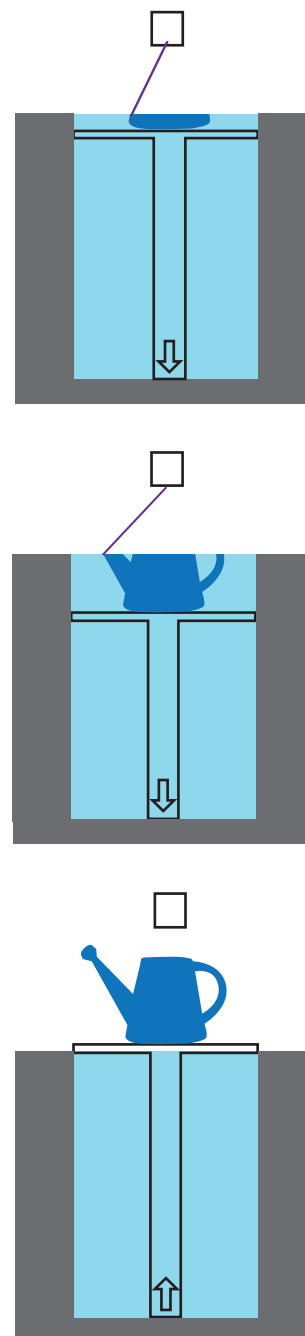


FIGURA 10

Esquema básico del funcionamiento del sistema de Sinterizado Láser Selectivo.

### 5.6.2. Resolución

En el mercado hay diferentes máquinas que ofrecen distintos grados de resolución. Lo habitual es que el modelo CAD se traduzca en 5 a 10 capas por milímetro de espesor, es decir, que sean capas de entre 0,1 mm y 0,2 mm.

Por el método en que la pieza es creada, es habitual encontrar pequeños escalones o dientes de sierra en las piezas producidas. Estos escalones serán más evidentes en piezas con menor resolución.

La precisión y resolución de la pieza se deberá fundamentalmente a 2 factores. Por una parte, al diámetro del haz de luz ultravioleta que

habitualmente es de 0,254 mm; y por otro, al grosor de la capa que suele ser de 0,10 mm. Con estos valores estándar, el margen de error suele estar entre 0,127 mm y 0,152 mm. Se considera alta resolución cuando el haz de luz ultravioleta se encuentra entre 0,07 mm y 0,1 mm y el espesor de la capa es de menos de 0,1 mm, dando una precisión de entre 0,05 mm y 0,075 mm.

La resolución final de la pieza se traduce por lo tanto en un mayor nivel de detalle pero también en un mayor tiempo de procesamiento y, en consecuencia, un aumento del coste de producción de la misma.

### 5.6.3. Materiales

Habitualmente cuando se habla de materiales para estereolitografía se habla de resinas fotopoliméricas o composites.

Composite es un término ampliamente utilizado en el mundo del prototipado 3D con el que se nombran aquellos materiales compuestos por una mezcla de otros con el objetivo de conseguir diferentes tipos de comportamientos mecánicos por parte del material.

El mercado de las resinas fotopoliméricas ha crecido de una forma exponencial en los últimos años.



FIGURA 11

Imagen de la primera máquina de prototipado creada por Chuck Hull

La invención de la estereolitografía y su difusión han propiciado la investigación en este campo, lográndose un amplio abanico de materiales con características diferentes. Por ejemplo, en cuanto a resistencia al calor, las resinas más básicas tienen una resistencia de hasta 55 °C, por lo que la tendencia a deformarse es bastante grande, mientras que las resinas que actualmente se utilizan resisten sin variaciones en su estructura hasta los 105 °C.

Los materiales para estereolitografía son muy diversos en cuanto a propiedades mecánicas, por lo que pueden utilizarse para un gran número de aplicaciones diferentes, ya que las propiedades de estos materiales composites se pueden asemejar a las de un plástico ABS o a las del polipropileno, policarbonato e, incluso hay materiales biocompatibles que pueden ser utilizados en diversas aplicaciones médicas como herramientas quirúrgicas, piezas dentales o piezas ortopédicas.

#### 5.6.4. Estereolitografía infrarroja

Todas las resinas utilizadas hasta el momento son resinas que fotopolimerizaban bajo la influencia de un haz de luz UV, pero según Paulo Jorge Bártolo, como bien indica en su libro de 2011 *Stereolithography: materials, processes and applications* «investigadores del

Instituto Politécnico de Leiria, en Portugal han desarrollado un nuevo sistema estereolitográfico que han llamado stereo-thermal-lythography el cual utiliza radiación ultravioleta y energía termal producida por radiación infrarroja para realizar la fotopolimerización» (p.16). La gran ventaja de este proceso según indican sus creadores es que las piezas no necesitarán el proceso de curado posterior a la impresión, pues las piezas saldrán completamente curadas tras el proceso.

#### 5.6.5. Características

Como característica fundamental la estereolitografía destaca por el alto nivel de detalle y nitidez de las piezas, así como por el mínimo margen de error. Por ello, es un proceso especialmente adecuado para piezas que requieren de un nivel de precisión muy alto.

Es un sistema de producción de los más rápidos del mercado, a pesar de necesitar un procesamiento posterior una vez terminada la impresión (limpieza con disolventes y curado final en horno ultravioleta). Generalmente las resinas presentan una gran resistencia mecánica y térmica y como ya se ha mencionado anteriormente las diferentes resinas tienen distintas propiedades mecánicas que hacen de ellas unos materiales excelentes para prototipos industriales de todo tipo, incluso para usar como moldes.

	Material Properties/Characteristics						Key Application Areas					
	Accuracy	HiTemp	Moisture Resistance	Optical Clarity	Durability	Color	Investment Casting/QuickCast	RTV/Master Patterns	Snap Fit Assemblies	General Purpose Models	Automotive Under the hood	WindTunnel Testing
<b>Polypropylene-Like Class</b>												
Accura 25	●●●●		●●●		●●●●	White		●●●●	●●●●	●●●●		
Accura PP White (SL 7811)	●●●		●●●●		●●●●	White		●●●	●●●●	●●●		
<b>Tough/Durable Class</b>												
Accura Xtreme	●●●●		●●●		●●●●	Grey		●●●●	●●●●	●●●●		
Accura Xtreme White 200	●●●●				●●●●●	White		●●●	●●●●●	●●●		
<b>ABS-Like Class</b>												
Accura 55	●●●●		●●●		●●●	White		●●●	●●●	●●●●		
Accura ABS White (SL 7810)	●●●		●●●●		●●●●	White		●●●	●●●	●●●		
Accura ABS Black (SL 7820)	●●●		●●●●		●●●●	Black		●●●	●●●	●●●		
<b>Clear Class</b>												
Accura ClearVue Free (SL 7870)	●●●		●●●●	●●●●	●●●●	Clear	●●●	●●●	●●●	●●●		
Accura ClearVue	●●●		●●●●●	●●●●●	●●●●	Clear		●●●	●●●	●●●		
Accura 60	●●●●		●●●	●●●	●●●	Clear/Blue	●●●●	●●●●	●●●	●●●●		
<b>Casting Class</b>												
Accura CastPro	●●●●		●●●●●			Clear Amber	●●●●●					
Accura CastPro Free (SL 7800)			●●●			Clear Amber	●●●●●					
<b>High Temp &amp; Composite Class</b>												
Accura 48 HTR		●●●●	●●●			Clear Amber					●●●●	
Accura SL 5530		●●●●	●●●			Clear Amber					●●●	
Accura PEAK	●●●●	●●●●	●●●●			Translucent Amber					●●●●●	●●●●
Accura CeraMAX	●●●●●	●●●●●	●●●●●			White						●●●●●
Accura Bluestone	●●●●●	●●●●●	●●●●●			Blue						●●●●●

FIGURA 12

Gama de productos para estereolitografía de la marca 3D Systems, donde se describen características principales como color y aplicaciones de cada una de las resinas.

<b>Functional Parts</b> Thermoplastic-like modulus, durable and suitable for snap-fits	PE-like	Somos® 8120
	PP-like	Somos® 9120, Somos® 9420
	ABS-like	Somos® WaterShed XC 11122*, Somos® 14120, Somos® DMX 100, Somos® NeXt, Somos® ProtoGen 18120/18420*/18920, Somos® NeXt LV Grey
	High Temperature	Somos® ProtoGen 18120/18420*/18920, Somos® ProtoTherm 12120, Somos® NanoForm 15120
<b>Master Patterns</b> Highly accurate and durable		Somos® WaterShed XC 11122*, Somos® WaterClear Ultra 10122, Somos® 14120*, Somos® ProtoGen 18120/18420*/18920, Somos® ProtoTherm 12120, Somos® NanoForm 15120, Somos® NeXt, Somos® NeXt LV Grey
<b>Clear Parts</b> Automotive lens, light pipes		Somos® WaterClear Ultra 10122, Somos® WaterShed XC 11122*
<b>Investment Casting Pattern</b> Highly accurate, low ash, antimony-free		Somos® WaterShed XC 11122*, Somos® ProtoCast 19122
<b>Wind Tunnel Models</b> Very rigid, strong and accurate Aerospace, automotive		Somos® WaterShed XC 11122*, Somos® ProtoTherm 12120, Somos® NanoForm 15120

FIGURA 13

Gama de productos de la marca DSM para estereolitografía con descripción de algunas características y aplicaciones.

	Viscosity (@ 30° C)	Flexural Modulus (MPa)	Flexural Strength (MPa)	Tensile Modulus (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation at Break	Impact Strength (J/m)	Heat Defl. Temp
		ASTM D 790	ASTM D 790	ASTM D 638	ASTM D 638	ASTM D 638	ASTM D 256	ASTM D 648
<b>Polypropylene-Like Class</b>								
<b>Accura 25</b>	250	1380-1660	55-58	1590-1660	38	13-20%	19-24	@ 66 PSI - 58-63° C @ 264 PSI - 51-55° C
<b>Accura PP White (SL 7811)</b>	210	1960-2060	64-66	2030-2230	40-42	7-13%	42-59	@ 66 PSI - 47° C
<b>Tough/Durable Class</b>								
<b>Accura Xtreme</b>	250-300	1520-2070	52-71	1790-1980	33-44	14-22%	35-52	@ 66 PSI - 62° C @ 264 PSI - 54° C
<b>Accura Xtreme White 200</b>	650-750	1380-1660	75	1590-1660	45-50	7%	55	@ 66 PSI - 47° C @ 264 PSI - 42° C
<b>ABS-Like Class</b>								
<b>Accura 55</b>	155-185	2690-3240	88-110	3200-3380	63-68	5-8%	12-22	@ 66 PSI - 55-58° C @ 264 PSI - 51-53° C
<b>Accura ABS White (SL 7810)</b>	210	2040-2120	74-76	2290-2400	46-48	8-14%	24-47	@ 66 PSI - 51° C
<b>Accura ABS Black (SL 7820)</b>	210	2260-2370	75-78	1890-2440	45-47	6-13%	39-56	@ 66 PSI - 51° C
<b>Clear Class</b>								
<b>Accura ClearVue Free (SL 7870)</b>	180	1940-2250	73-76	1920-2010	38-42	10-22%	23-51	@ 66 PSI - 48° C @ 264 PSI - 41° C
<b>Accura ClearVue</b>	235-260	1980-2310	72-84	2270-2640	46-53	3-15%	40-58	@ 66 PSI - 51° C @ 264 PSI - 50° C
<b>Accura 60</b>	150-180	2700-3000	87-101	2690-3100	58-68	5-13%	15-25	@ 66 PSI - 53-55° C @ 264 PSI - 48-50° C
<b>CastPRO Class</b>								
<b>Accura CastPro</b>	240-260	2310-2340	82-84	2490-2620	52-53	4.1-8.3%	43-49.5	@ 66 PSI - 51° C @ 264 PSI - 50° C
<b>Accura CastPro Free (SL 7800)</b>	205	2200-2480	81-83	1940-2350	45-48	9-19%	35-50	@ 66 - 62° C
<b>High Temp &amp; Composite Class</b>								
<b>Accura 48 HTR</b>	200-250	2760-3400	105-118	2800-3980	64-67	4-7%	22-29	@ 66 PSI - 65° C @ 264 PSI - 57° C
<b>Accura SL 5530</b>	210-270	2620-3240	63-87	2889-3144	57-61	3.8-4.4%	21	@ 66 PSI - 70-85° C @ 264 PSI - 55-58° C
<b>Accura PEAK</b>	605	4180-4790	77-126	4220-4790	57-78	1.3-2.5%	21.3-27.3	@ 66 PSI - 78° C @ 264 PSI - 59° C
<b>Accura CeraMAX</b>	1500 -2000	8270-8370	137-145	9460-9680	78-87	1.0-1.5%	14.5-17.9	@ 66 PSI - 148° C @ 264 PSI - 95° C
<b>Accura Bluestone</b>	1200-1800	8300-9800	124-154	7600-11700	66-68	1.4-2.4%	13-17	@ 66 PSI - 65-66° C @ 264 PSI - 65° C

FIGURA 14

Descripción técnica detallada de las características de los productos para estereolitografía de la marca 3D Systems.

Material	Benefits/Type	Appearance	Viscosity cps @ 30°C	Photospeed E <sub>10</sub> mJ/cm <sup>2</sup>	Tensile Modulus MPa	Tensile Strength MPa	Elongation at Break %	Impact Notched Izod J/cm	HDT @0.46MPa, °C, UV (+TPC)*
Somos® 8110/8120	Flexible, PE-like	Translucent	600/600	40/35	317/690	26.0/26.0	27.0/27.0	0.87/0.59	54/54
Somos® 9110/9120	All-Purpose, PP-like	Translucent	230/450	55/65	1,590/1,350	31.0/31.0	18.0/21.0	0.55/0.51	50/57
Somos® 9420	Robust, PP-like	White	475	95	700	18.5	28.0	0.46	49
Somos® ProtoTherm 12110/12120	High Temp Tolerant, ABS-like	Clear, Red	410/550	75/63	3,430/3,520	57.6/70.2	5.0/4.0	0.12/0.12	53 (155)/56 (126)
Somos® 14120	All-Purpose, ABS-like	White	240	64	2,460	45.7	7.9	0.24	53
Somos® NanoForm 15120	Accurate ProtoComposite	Gray	570	112	5,000	48.0	2.1	0.15	66 (269)
Somos® ProtoGen 18120	All-Purpose, Tunable, ABS-like	Translucent	300	57	2,680	53.3	8.0	0.20	57 (95)
Somos® ProtoGen 18420	All-Purpose, Tunable, ABS-like	White	350	67	2,250	43.0	12.0	0.21	55 (95)
Somos® ProtoGen 18920	All-Purpose, Tunable ABS-like	Gray	350	76	2,210	47.2	16.0	0.23	59 (97)
Somos® ProtoCast 19122	Low ash, Antimony-free for Investment Casting	Clear, Peach	100	85	2,100	44.9	6.1	0.23	59
Somos® DMX 100	Tough & Durable, ABS-like	Off-White	1,500	92	2,410	30.9	20.0	0.73	44
Somos® WaterShed XC 11112/11122	Clear, Water-Resistant, ABS- like	Clear, Near Colorless	150/260	72/54	2,640/2,765	48.3/50.4	25.0/16.0	0.19/0.3	50/50
Somos® WaterClear Ultra 10122	Optically Clear, Colorless	Clear, Colorless	165	46	2,880	55.5	8.0	0.25	47 (60)

FIGURA 15

Descripción técnica detallada de las características los productos para estereolitografía de la marca DSM.

En relación a los materiales utilizados en el sinterizado láser, las resinas fotopoliméricas utilizadas en la estereolitografía suelen ser más frágiles y menos flexibles.

Como punto negativo cabe destacar que la estereolitografía necesita la creación de soportes a la hora de fabricar las piezas que deben ser retirados de forma manual, lo que implica un tiempo de procesado posterior a la impresión y una manipulación que puede llegar a dañar la pieza.

Si bien las resinas permiten tratamientos muy diferentes donde cabe destacar el galvanizado, que no afecta únicamente a la resistencia de la pieza, sino que además la convierte en un elemento conductor de electricidad y más resistente a los ambientes húmedos.

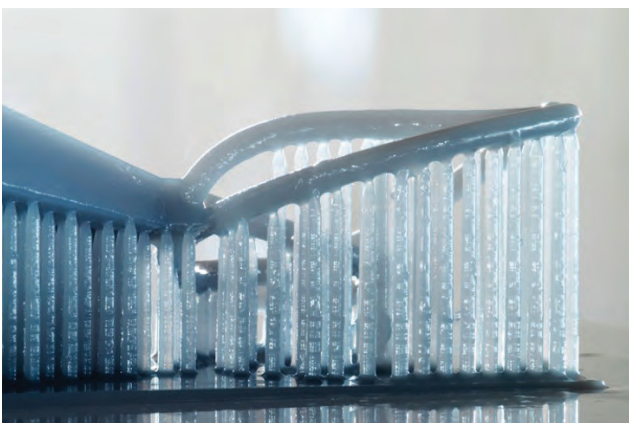


FIGURA 16

Detalle de una pieza impresa mediante estereolitografía donde se puede apreciar la estructura de sujeción creada para soportar el elemento voladizo.

#### 5.6.5. Micro estereolitografía proyectada

Una forma de democratizar un sistema de prototipado tan caro como la estereolitografía ha sido simplificar su funcionamiento. El elemento más complejo de una máquina de prototipado estereolitográfica es el juego de láser y espejos que lo controlan. Para ello, basándose en un proceso ya en desuso pero que en realidad era la base de este proceso, el *Solid Ground Curing*, se ha desarrollado lo que se conoce como Micro Estereolitografía proyectada.

En este sistema, el láser y los espejos son sustituidos por un proyector de luz UV que va proyectando cada capa sobre la placa cubierta de resina, funcionando como una máscara dinámica que solo deja pasar la luz a la parte que nos interesa curar en ese momento hasta que la pieza ha sido completamente creada.

El *Solid Ground Curing* es un sistema actualmente en desuso que consistía exactamente en eso, en generar formas tridimensionales con resina fotopolimérica a través de la utilización de máscaras y una lámpara UV.

La facultad de Bellas Artes de la UCM adquirió para un proyecto de investigación en el año 2014 una máquina de Micro Estereolitografía proyectada con la que se ha impreso el modelo

que se muestra en la Figura 17. Al ser un producto enfocado al mercado de maquinaria de uso personal, el precio tanto de la impresora como de los cartuchos es bastante asequible, pero presenta unos cuantos inconvenientes. El proceso de impresión es bastante sensible a las vibraciones, y cualquier pequeño movimiento de la impresora puede hacer que los modelos se fabriquen de forma defectuosa.

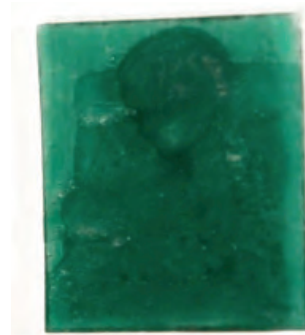


FIGURA 17

Medalla impresa mediante el proceso de Micro SLA en una resina calcinable.

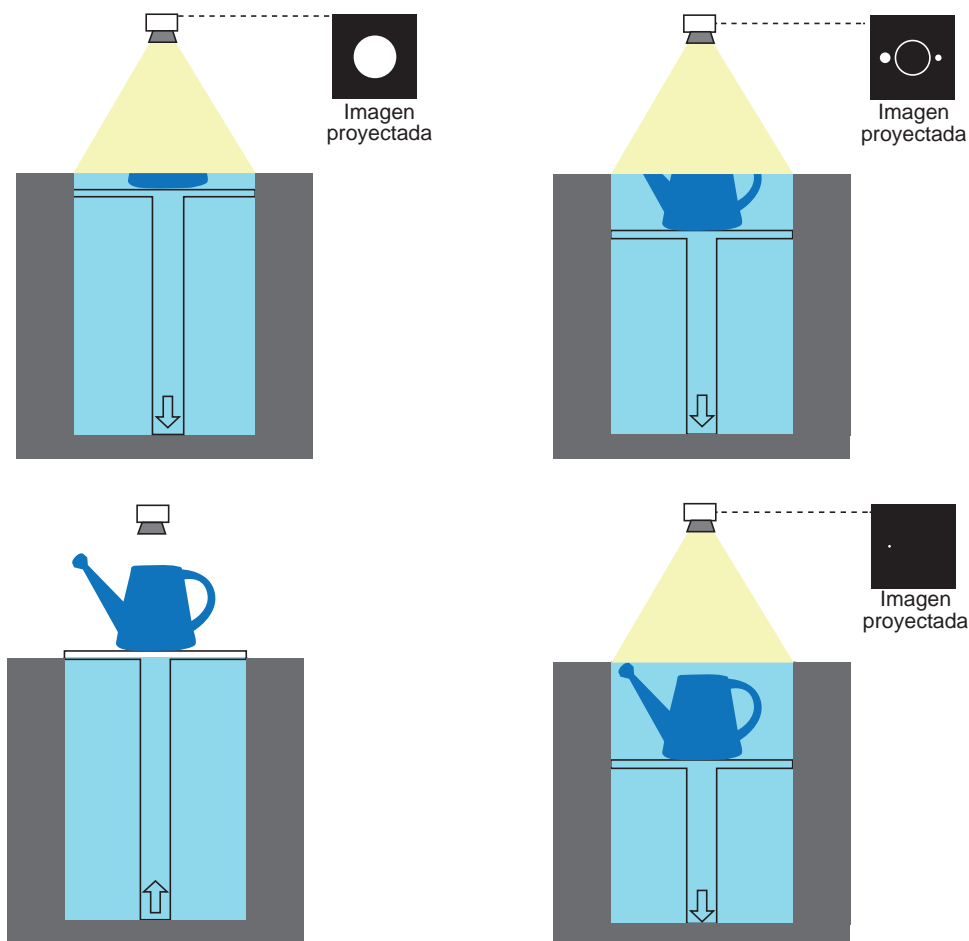


FIGURA 18

Esquema básico de la funcionamiento de una máquina de prototipado por MICRO SLA, donde se sustituye el haz láser por una imagen proyectada (el proceso se lee en sentido de las agujas del reloj).

## 5.7. FUSED DEPOSITION MODELING FDM

El sistema de Modelado por Deposición Fundida (MDF) fue desarrollado por Scott Crump a finales de los años 1980. Crump fundó en 1989 Stratasys y por ello el nombre Fused Deposition Modeling y las siglas FDM son una marca registrada de esta empresa. Otra nomenclatura utilizada habitualmente es Fused Filament Fabrication (FFF), en castellano Fabricación por Filamentos Fundidos, y fue acuñada por los miembros del proyecto RepRap para poder tener un término con el que referirse a este proceso sin las restricciones legales que presentaba FDM. Este sistema también se puede encontrar bajo las siglas PJP (Plastic Jet Printing).

### 5.7.1. Proceso

El sistema de modelado por deposición fundida es un sistema comparable al funcionamiento de una pistola de pegamento caliente en la que se utilizan barras de pegamento que al calentarse se funde y se empuja a través de una boquilla fina. En el caso de las impresoras MDF en lugar de una barra de pegamento se utiliza un cable de material termoplástico (filamento). La impresora es alimentada por una bobina de filamento, y un motor controla con precisión la velocidad con la que es introducido en la impresora. El filamento antes de pasar por la boquilla de

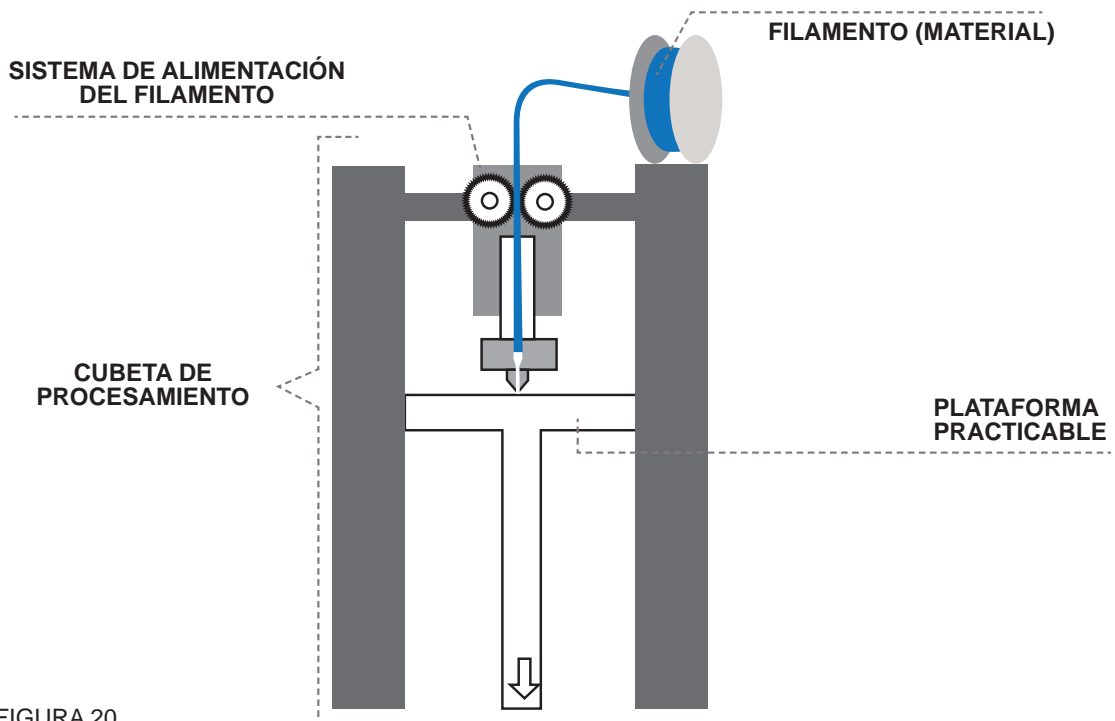


FIGURA 20

Esquema básico de la estructura de una máquina de prototipado de Modelado por Deposición Fundida.

salida, es calentado y derretido, en ocasiones y dependiendo del tipo de filamento a más de 200 °C, gracias a una resistencia o elemento cerámico que lo calienta. Al salir por la boquilla, el filamento se derrite, y el cabezal o la bandeja de la impresora (o ambos) se mueven 'dibujado' el modelo por capas. El material fundido se enfría inmediatamente endureciéndose.

Cuando se dibuja una capa, la plataforma desciende tanta distancia como espesor tiene la capa de material impreso para comenzar con la siguiente capa.

La bandeja suele mantenerse caliente mediante una resistencia para que la pieza se quede adherida a ella durante el proceso de impresión y evitar errores de impresión debido al movimiento indeseado de la pieza por la bandeja, esta además suele ser desmontable para que sea más sencillo manipular las piezas una vez impresas.

Cuando el modelo contiene secciones que sobresalen, la impresora contruye una estructura de soporte. En el caso de impresoras con dos boquillas, esta estructura se construye en otro material que, una vez impresa la pieza, se puede disolver habitualmente en un baño de agua con jabón.

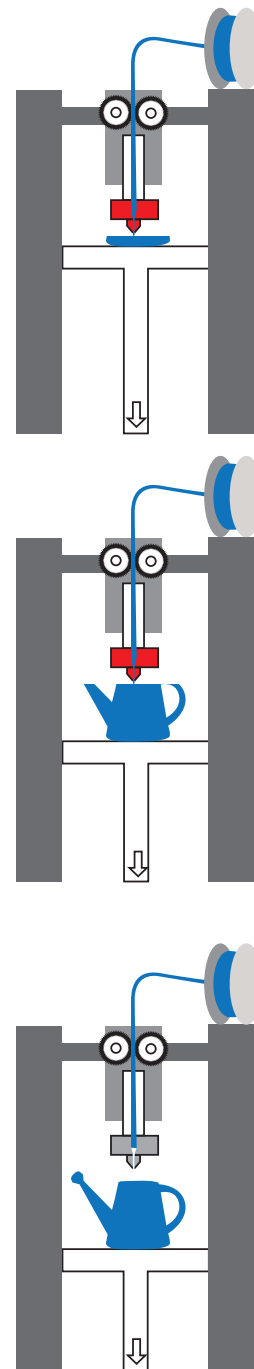


FIGURA 21

Esquema básico de funcionamiento de una máquina de prototipado de Modelado por Deposición Fundida.

### 5.7.2. Resolución

Las resoluciones más habituales están entre grosores de capa de 0,25 mm y 0,12 mm y esta se debe fundamentalmente a la apertura de las boquillas de salida del filamento fundido, aunque también a la velocidad a la que se imprima.

Este tipo de impresoras tiene un tamaño de impresión que ronda los 20 cm. x 20 cm. x 20 cm. pero hay algunas que llegan a sobrepasar un tamaño de bandeja de 1m<sup>2</sup> de superficie.

### 5.7.3. Materiales

El FDM (*Fused Deposition Modeling*) es el sistema para el que mayor número de materiales disponibles hay en el mercado. Fundamentalmente esto se debe a que la única limitación es que los materiales deben ser termoplásticos y que la impresora que se utilice adquiera la temperatura necesaria para poder extruir el material. Los materiales más comunes son el ABS, el nylon, el policarbonato y la polieterimida.

#### POLIETERIMIDA

La polieterimida (PEI) es un termoplástico amorfo, de color ámbar translúcido con características similares al plástico PEEK. Se utiliza para la fabricación de instrumental médico gracias a

su resistencia a los disolventes, al calor (puede mantenerse estable trabajando en temperaturas de hasta 170 °C) y a la llama directa.

#### ABS

El Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS) es uno de los termoplásticos más usados en la impresión 3D y está presente en muchos objetos de la vida diaria como, por ejemplo, en las piezas de LEGO. Es un plástico muy resistente y rígido con alta resistencia química y a la abrasión. No es biodegradable y no soporta bien la radiación UV. Para fundirse necesita una temperatura de 240 °C.

#### PLA

El ácido poliláctico es, a diferencia del ABS, biodegradable y se obtiene del almidón de maíz, por lo que es además un material apto para el uso alimenticio (Figura 22). La temperatura necesaria para su impresión es de unos 210 °C

#### PET

El tereftalato de polietileno es uno de los materiales más usados para envases habitualmente de bebidas (de ahí los envases PET de bebidas como por ejemplo la Coca-Cola). Se caracteriza por su resistencia y alta transparencia. Se puede encontrar en la red fácilmente manuales de como fabricar tu propio filamento para impresión 3D, reciclando las botellas de refrescos y dándole

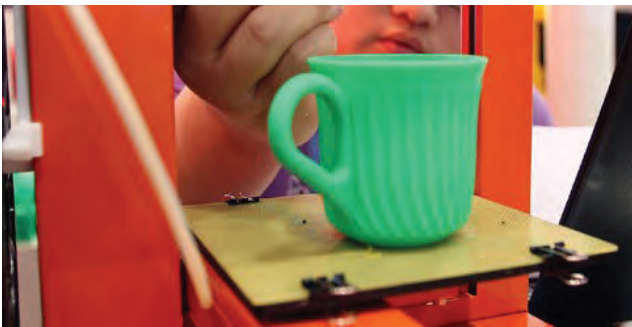


FIGURA 22

El PLA habitualmente se mantiene estable hasta 50°. En la imagen taza impresa en una mezcla de material PLA producido por ITRI que resiste temperaturas de hasta 100 °C. Imagen obtenida de la web Ingeneering.com.



FIGURA 23

En la imagen de la superior el modelo 3D del prototipo de Filabot, debajo la primera máquina contruida y comercializada. Imagen de [www.filabot.com](http://www.filabot.com)

forma de filamento para poder utilizarlos en las impresoras 3D. Filabot comenzó como un proyecto kickstarter cuyo objetivo era fabricar una máquina que convirtiera los restos de material PET en filamento apto para la impresión 3D. Actualmente es una empresa que comercializa a nivel mundial máquinas (Figura 23) para fabricar filamentos a partir de diferentes plásticos, lo que demuestra que estas tecnologías están en pleno desarrollo y juegan un papel importante en los mercados internacionales del presente, pero sobre todo del futuro.

#### TPE

Los elastómeros termoplásticos, ya los hemos visto por ejemplo aplicados en la Sinterización Láser Selectiva, y permite crear piezas con una gran flexibilidad, similar a la de las gomas con una temperatura de cabezal considerablemente alta ( 215 °C).

#### NYLON

El nylon es un material muy apto para el proceso de Sinterización Láser Selectiva, pero muy complejo de usar en el sistema de Impresión por Deposición Fundida debido a la falta de adhesión del material a la bandeja, que hace que se mueva y sea difícilmente controlable durante el proceso de impresión.

Orden	Marca	Tipo	Medidas	Formato	D-d1-d2-G (mm.)
F1-C1	Plastics3D	PLA Blanco	1,74+/-0,03	Bobina 9	165-38-60-116
F1-C2	LEAPto3D	ABS Dorado	1,78+/-0,01	Bobina 1	160-31-50-99
F1-C3	3DWorldPrinter	ABS Natural (chino)	1,74+/-0,01	Bobina 6	160-31-41-88
F1-C4	Reprapper	ABS Conductivo Negro	1,69+/-0,04	Bobina 1	160-31-50-99
F1-C5	Reprapper	ABS Fluo Rojo	1,75+/-0,02	Bobina 1	160-31-50-99
F2-C1	3DWorldPrinter	ABS Natural (español)	1,82+/-0,10	Muestra	
F2-C2	Reprapper	PLA Fluo Azul	1,75+/-0,04	Bobina 1	160-31-50-99
F2-C3	Thingibox	PLA Plata	1,74+/-0,07	Bobina 4	196-38-86-80
F2-C4	Plabs3D	PLA Gris	1,81+/-0,04	Bobina 2	201-53-100-55
F2-C5	Thingibox	ABS Fluo Verde	1,74+/-0,10	Bobina 5	196-38-86-86
F3-C1	Form Futura	PLA Eco Flex Rojo	1,80+/-0,07	Bobina 2	201-53-100-55
F3-C2	Form Futura	PET	1,78+/-0,02	Bobina 2	201-53-100-55
F3-C3	Plabs3D	Laywoo-d3	1,70+/-0,03	Muestra	
F3-C4	Fenner Drives Ninja	Flex Negro	1,79+/-0,06	Bobina 3	202-52-89-54
F3-C5	Plabs3D	HIPS Rojo	1,76+/-0,02	Muestra	
F4-C1	Reprapper	ABS Glow Azul	1,77+/-0,02	Bobina 1	160-31-50-99
F4-C2	Reprapper	PLA Glow Verde	1,81+/-0,03	Bobina 1	160-31-50-99
F4-C3	Form Futura	PLA Eco Thermo	1,76+/-0,03	Bobina 2	201-53-100-55
F4-C4	Reprapper	ABS Thermo Verde	1,80+/-0,03	Bobina 1	160-31-50-99
F4-C5	Plastics3D	ABS Negro	1,75+/-0,04	Bobina 9	165-38-60-116

FIGURA 24

Tabla que hace referencia a las muestras de la Figura 25, perteneciente a un estudio de materiales para FDM realizado por Daniel Burón, publicado en [www.siliconweek.es](http://www.siliconweek.es) con el título *Impresión 3D: qué materiales usar y dónde comprarlos*, en diciembre de 2013.



FIGURA 25

Muestras impresas mediante FDM con diferentes materiales. Referencias explicadas en la Figura 24.

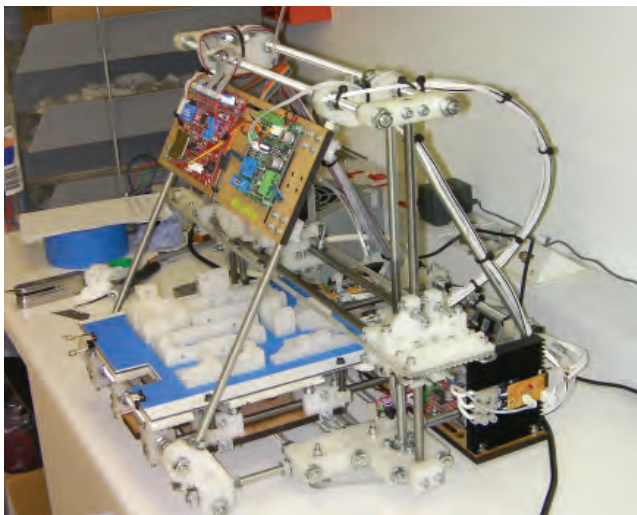


FIGURA 26

Impresora RepRap Mendel en pleno proceso de autoreplicación.

## POLIESTIRENO

Cuando se utiliza un segundo material para producir las estructuras de soporte, habitualmente lo que se usa es poliestireno de alto impacto. Es un material muy parecido al ABS y se elimina con D-Limoneno<sup>1</sup>.

### 5.7.3 Proyecto RepRap

El proyecto RepRap se basa en la idea de construir una impresora con la capacidad de autoreplicarse a sí misma. La impresora Rep Rap de filamento fundido fue inventada por Adrian Bowyer quien publicó su idea inicial en el año 2004. Es un proyecto de software libre, accesible a todo el mundo y ya en el año 2009 el Medialab Prado contaba con su primera RepRap. La impresora RepRap sale muy económica fundamentalmente porque vienen sin ensamblar y el precio de los materiales ronda los 400 euros. A partir de ahí están disponibles los modelos en formato STL para que la propia impresora pueda imprimir las piezas necesarias para construir tantas impresoras como se desee.

Es un ejemplo de los movimientos creativos más actuales donde la colaboración es la base de la creación y el desarrollo.

Aunque el acabado final de las piezas no tiene una calidad remarcada, si es cierto que con el paso

1. Sustancia obtenida de la cáscara de los cítricos. Es un disolvente biodegradable de resinas, pigmentos, tintas o pinturas entre otros. También se utiliza en la fabricación de adhesivos productos de limpieza del hogar, industria alimentaria y cosmética.



FIGURA 27

Juego completo de piezas que la impresora RepRap Mendel puede autorreplicar.

de los años y gracias a todos los *makers* como se denominan a sí mismo el grupo de inventores, técnicos y creativos involucrados en este tipo de proyectos, los resultados van siendo mejores. No obstante, a pesar del nivel de resolución y de la complicación que puede acarrear el hecho de tener que construir uno mismo la impresora, según una encuesta realizada en mayo de 2012, es el sistema más utilizado por los usuarios de las tecnologías de prototipado tridimensional.

#### 5.7.4. Gran formato

El Modelado por Deposición Fundida es el sistema de impresión 3D que permite fabricar objetos de mayor tamaño. La BigRep ONE es la impresora 3D de gran formato más grande del mercado creada por Lukas Oehmigen y Marcel Tasler, con un volumen máximo de impresión de 1,147 mm x 1,000 mm x 1,188 mm El nivel de detalle no es excelente pero permite tratar posteriormente la pieza impresa gracias a los materiales que emplea.

#### 5.7.5. Fused deposition modeling of metals

Aunque a día de hoy no hay ningún sistema comercialmente disponible en deposición fundida de metales, ha habido muchas investigaciones y aproximaciones que auguran una futura

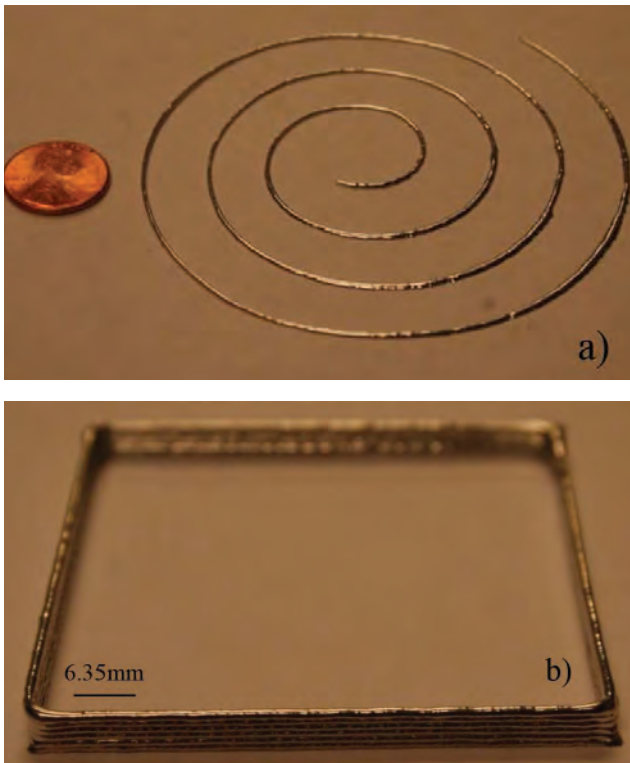


FIGURA 28

Demostración de resultados del Modelado por Deposición Fundida de Metales donde a) muestra un ejemplo de figura en 2D y b) una estructura 3D de 6 capas.

comercialización de este sistema adaptado a los metales. Este sistema fundamentalmente implicaría una reducción en el coste de fabricación de las máquinas de prototipado al no necesitar los complejos láseres utilizados para sinterizar el metal, si bien las pruebas realizadas se han hecho con aleaciones de metales blandos.

#### 5.7.6. Características

Respecto a las características del material que pueden influir en la calidad de la pieza prototipada, es muy interesante el comentario que hace Daniel Burón en un artículo muy completo sobre los materiales en la web [www.siliconweeks.com](http://www.siliconweeks.com) donde comenta que

«a efectos prácticos, los parámetros más importantes a tener en cuenta son el grado de variabilidad del diámetro y la calibración propia de la impresora, de forma que ..., el material que salga por la cabeza caliente sea realmente el que marcamos.

Esto es importante debido a que una gran variabilidad no solo puede crear deformaciones y errores en la pieza impresa, sino también problemas graves en la impresora 3D, como atascos del cabezal, cables que se partan en mitad de la impresión.»

Entre las ventajas más destacadas está el hecho de que es un procedimiento que puede resultar realmente económico, recordemos que podemos montar una impresora RepRap con una pequeña inversión de alrededor de 400 euros, y el material, si no queremos comprarlo podemos llegar, incluso, a fabricarlo nosotros mismos mediante el reciclaje de plásticos.

Podemos encontrar una amplia gama de materiales con características muy diversas que seguramente se adapten a nuestras necesidades. Por el contrario como desventaja, sobre todo en un ámbito como el de las bellas artes, es un procedimiento con una resolución muy baja y un acabado muy poco delicado. Si bien esta tesis está enfocada en la creación de piezas escultóricas de pequeño formato, sería interesante valorar las posibilidades que tienen en la fabricación de esculturas de gran formato y las posteriores intervenciones que podemos realizar sobre la superficie (lijado, fundido, color...).

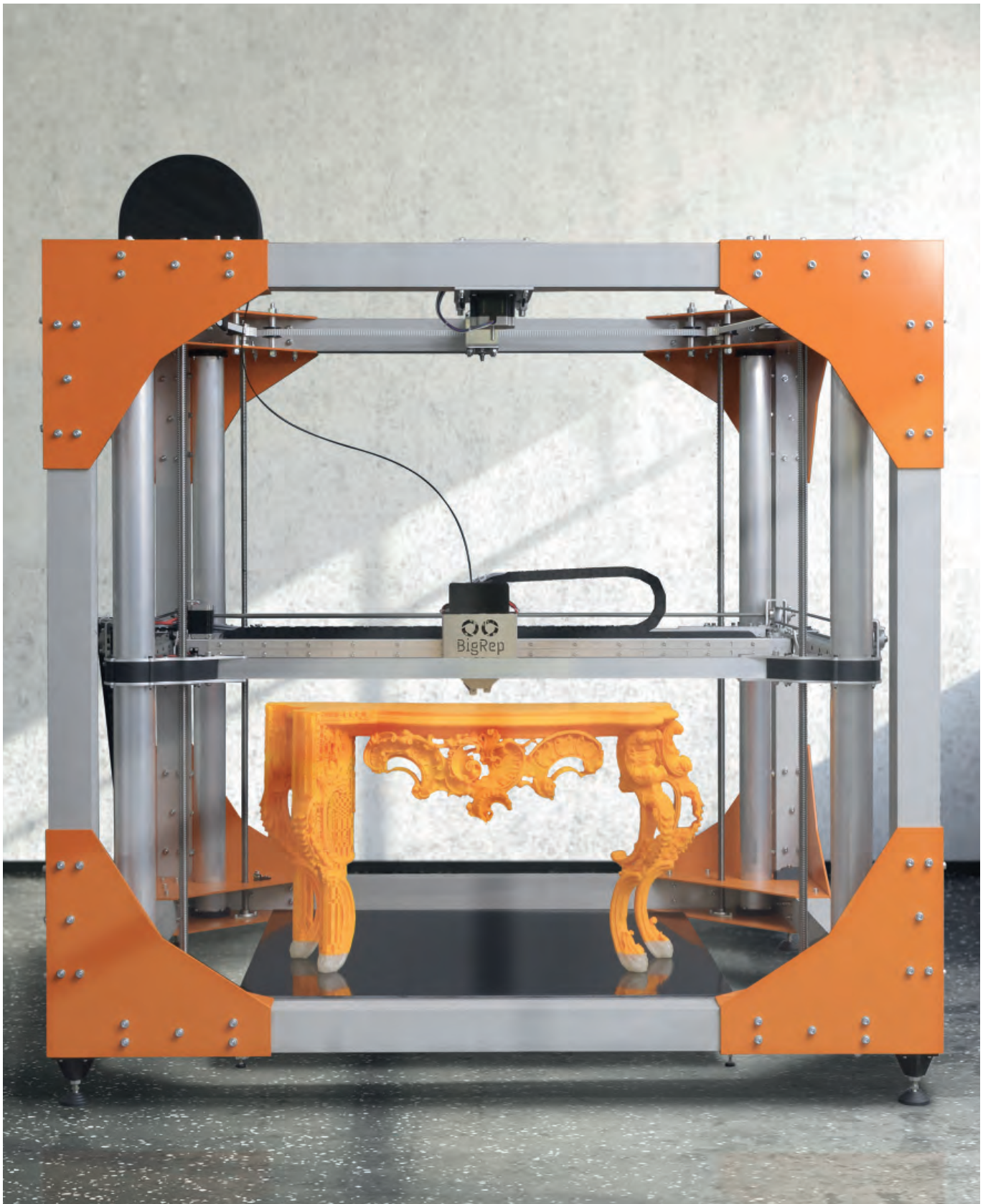


FIGURA 29

Impresora FDM de gran formato BigRep One imprimiendo un aparador en una sola pieza.

## 5.8. IMPRESIÓN 3D POR INYECCIÓN:

### 3D inkjet printing

Este es el procedimiento que se conoce originalmente como impresión tridimensional (3DP) y fue desarrollado en el Instituto de Tecnología de Massachusetts en 1993. Se conoce habitualmente con el nombre comercial Z-Print. Esta tecnología fabrica objetos tridimensionales solidificando capas de un polvo mediante el uso de un aglutinante líquido que funciona a modo de pegamento.

### 5.8.1. Proceso

El funcionamiento es básicamente como el de una impresora 2D de inyección de tinta. En lugar de utilizar papel bajo los cabezales de la impresora, estos cabezales se mueven sobre una capa fina de polvo inyectando el aglutinante con la forma de la capa correspondiente.

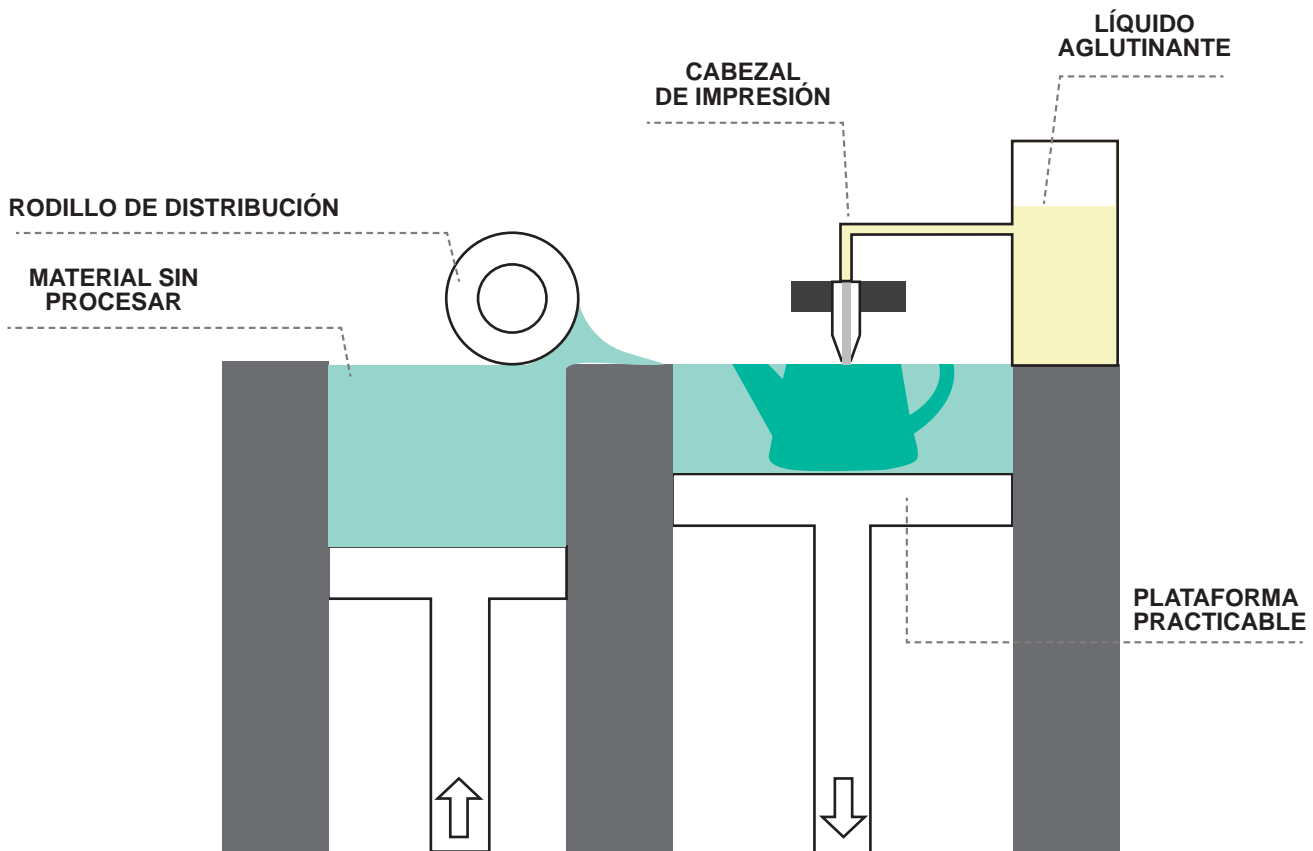


FIGURA 30

Esquema básico de la estructura de una máquina de impresión 3D por inyección.

Una vez dibujada o inyectada una capa completa, la plataforma sobre la que se ha dibujado esa capa desciende tanta distancia como grosor tienen las capas de material en polvo (aproximadamente 0,1 mm) y una nueva capa es depositada por un rodillo de distribución. Acto seguido se dibuja la siguiente sección del objeto con el aglutinante que no solo une las partículas de la sección que está dibujando, sino que las une con las partículas de la sección anterior.

En este proceso todo el material que no es aglutinado hace las veces de soporte y permite la fabricación de geometrías complejas sin necesidad de generar soportes ni estructuras extras.

Una vez que el proceso se ha completado se puede extraer manualmente la pieza de la impresora y recuperar todo el material no aglutinado para utilizar en procesos posteriores. Para eliminar el rastro de materia que pueda quedar en la pieza se aplica aire a presión para liberar todas las partículas que no han sido aglutinadas y, por tanto, no forman parte del objeto.

Una vez limpiada la pieza, se sumerge en un baño de cianocrilato para darle mayor resistencia y conseguir que los colores (en caso de haberse aplicado color a la pieza) sean más brillantes.

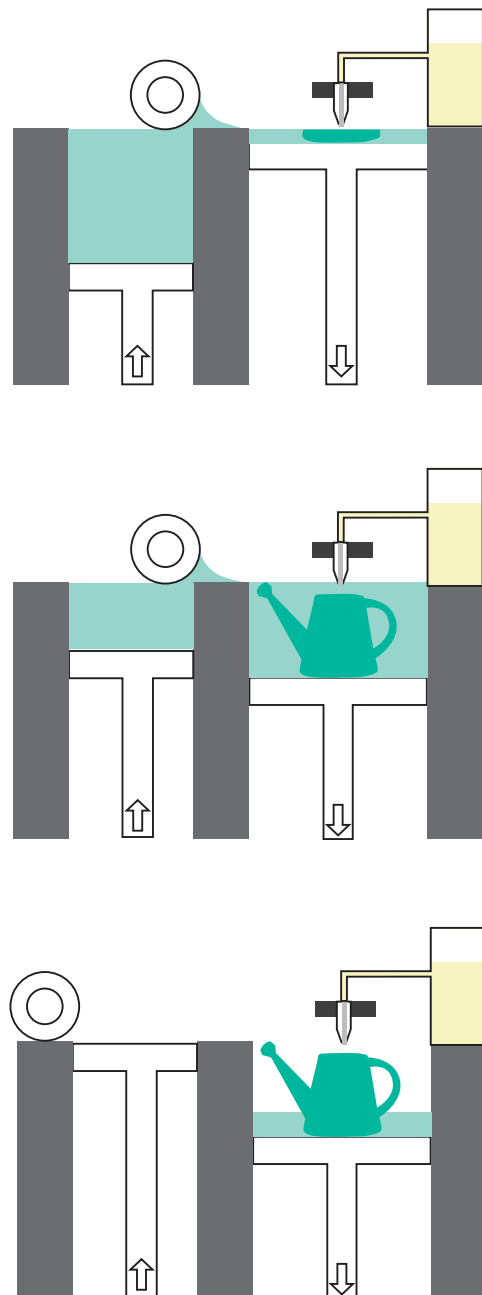


FIGURA 31

Esquema básico del funcionamiento de una máquina de impresión 3D por inyección.

Para finalizar se suele dar un barniz para proteger la pieza de las radiaciones ultravioletas para que de esta forma sean piezas más duraderas.

### 5.8.2. Resolución

La resolución de estas impresoras suele ser de unas 600 dpi (puntos por pulgada), generando capas de un grosor de entre 0,08 mm y 0,1 mm.

### 5.8.3. Color Jet Printing (CJP)

A día de hoy es el único procedimiento que permite la fabricación de piezas con impresión a todo color, pudiendo imprimir hasta 390.000 colores en una única pieza. Si bien es cierto que otras tecnologías permiten seleccionar entre una amplia gama de colores en los materiales, una vez elegido el color solo se puede fabricar la pieza con ese color. Hay dos excepciones: en el Modelado por Deposición Fundida hay máquinas que permiten combinar hasta dos colores diferentes; y en la impresión Polyjet (que veremos más adelante) se puede aplicar también más de un color.

En el sistema de impresión 3D por inyección se ha aplicado con éxito la metodología de impresión a color por inyección de tinta habitualmente utilizada en la impresión 2D, pero esta vez adaptada al sistema 3D.

El color se va aplicando a la vez que se van generando las capas, mediante el movimiento de dos cabezales de impresión, uno cuyo objetivo es aglutinar las partículas de polvo y otro que las colorea.

Una impresora de inyección de tinta habitualmente convierte las imágenes digitales de sistema RGB en sistema CMYK. En la impresión 3D a color además de usar los 4 colores habituales (magenta, amarillo, cian y negro) utiliza uno transparente.



FIGURA 32

Imágenes del proceso de extracción de una pieza una vez producida mediante CJP. Al terminar el proceso de impresión la pieza está cubierta por material en polvo, esta se limpia con una brocha para liberar la mayoría de este material que será utilizado en futuros procesos, y finalmente se limpia la pieza con aire a presión para retirar las últimas partículas y que de esta forma aparezcan los colores impresos.

El color en estas piezas se aplica imprimiendo solo en la capa superficial de la pieza, siguiendo las indicaciones de la textura que se haya aplicado al modelo 3D, por lo que cualquier imagen puede ser impresa.

#### 5.8.4. Materiales

Los materiales utilizados en este tipo de impresión se asemejan bastante a yesos y escayolas. Su componente fundamental es el sulfato de calcio dihidrato (comúnmente conocido como yeso) pero habitualmente se combina con otros materiales para conseguir características mecánicas distintas.

Los objetos impresos mediante este sistema aguantan temperaturas de hasta 60 °C, a temperaturas más altas, las propiedades del objeto pueden verse alteradas de una forma significativa.

Son objetos delicados en comparación a los objetos impresos en plástico o resina, con una resistencia parecida a la de la porcelana o la cerámica, por lo que una caída desde una altura determinada puede romperlos.

La textura del objeto final es porosa y permeable al agua, por lo que hay que evitar cualquier contacto ella.

#### 5.8.5. Ventajas del procedimiento

Es un sistema de impresión muy rápido y económico. Preparar la pieza para imprimir es relativamente sencillo, ya que no necesitamos generar ninguna estructura que soporte las parte frágiles. Es un sistema relativamente económico en relación a los otros procedimientos existentes en el mercado y es el único método que permite producir piezas a todo color. Sin embargo, la resolución del color no es demasiado buena y es muy débil, una pequeña gota de agua puede alterar los colores e incluso diluirlos. Es uno de los procedimientos que más textura de materia tiene, dando como resultado unas piezas que proporcionan sensación de estar hechas con piedra tipo arenisca. El grosor mínimo de las paredes es superior al de otros procedimientos siendo el grosor mínimo recomendado de entre 1,5 mm y 2 mm, lo que no significa que no se puedan imprimir piezas de menor grosor, simplemente serán piezas más delicadas.

Sin embargo, es un procedimiento que genera piezas muy robustas y es muy útil para generar moldes para fundir metales. No cualquier material sirve para hacer estos moldes, pero hay un material que mezcla arena de fundición, yeso y otros aditivos que combinados dan muy buen resultado.

## 5.9. INYECCIÓN DE FOTOPOLÍMEROS

Este sistema de prototipado se conoce más habitualmente por los nombres comerciales MultiJet Printing o Polyjet Printing (también Polyjet Modeling, Multijet Modeling, Polyjetting, Multijetting, Jetted Photopolymer). Es un procedimiento similar a los procesos de impresión por inyección de tinta que utilizan esta tecnología para imprimir una resina plástica fotocurable o una cera de fundición capa a capa.

Como nombre comercial Polyjet pertenece a la empresa Stratasys y Multijet a 3D System, y el tipo de resinas utilizadas así como el procedimiento son muy similares. Los orígenes de este procedimiento se encuentran, en ambos casos, a finales de la década de los años 1990 y es claramente una evolución y combinación de los procesos anteriormente explicados.

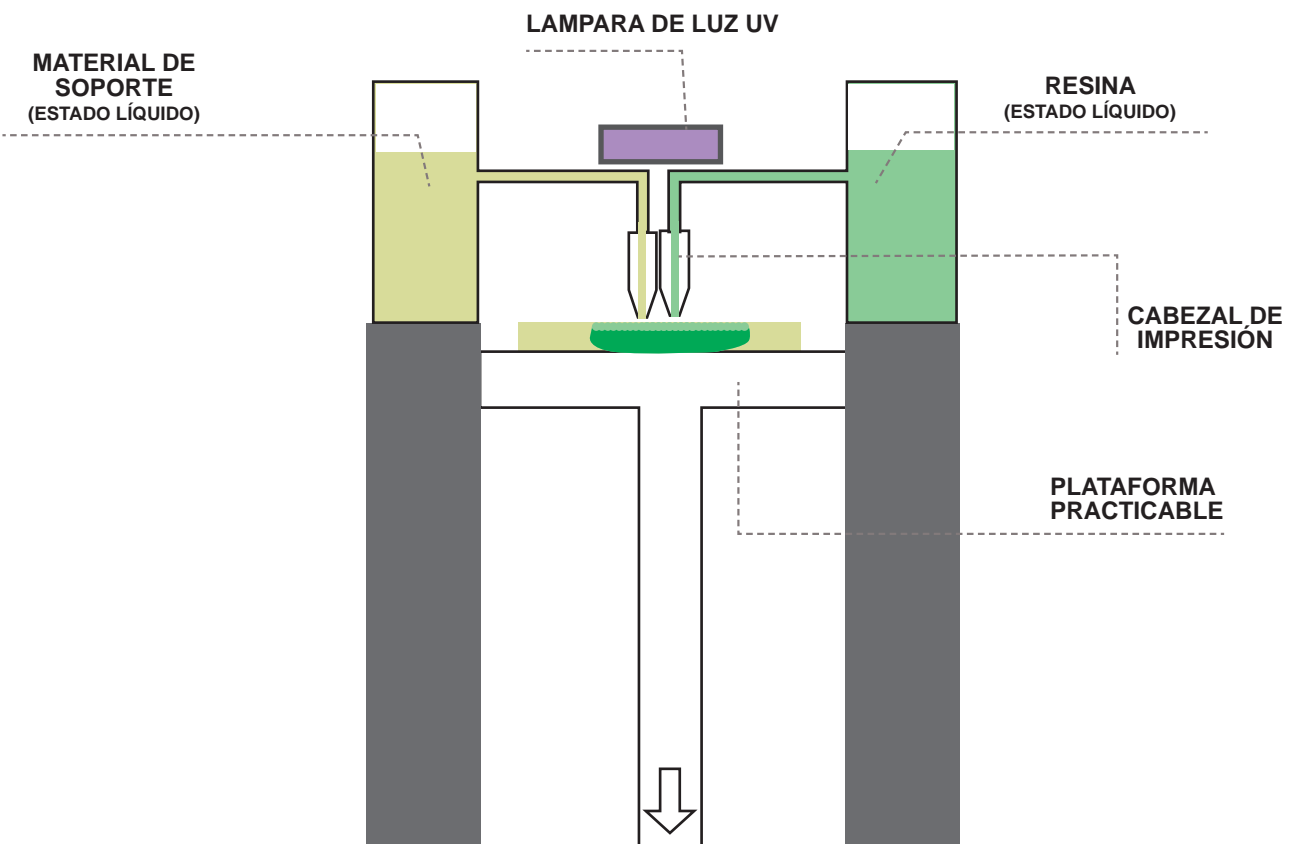


FIGURA 33

Esquema básico de la estructura de una máquina de sistema Polyjet o Multijet.

### 5.9.1. Proceso

Como cualquiera de los procesos de prototipado aditivo los modelos se dividen en finas capas o secciones (*slice*) que se van imprimiendo una a una. Cada capa de resina es curada por una lámpara de luz ultravioleta, así cuando se va a producir la siguiente capa la primera ya se ha endurecido y es lo suficientemente estable como para soportar la siguiente capa. Para las ceras no es necesario el proceso de curado, ya que estas se enfrían al contacto con la base de la plataforma de impresión o con la capa anterior y solidifica al instante.

Estos procedimientos dan un nivel de detalle muy alto y se sirven de un material de soporte que es soluble una vez producida la pieza sin necesidad de ser retirado manualmente, lo que garantiza que piezas muy delicadas con partes internas detalladas que hayan podido necesitar ese soporte para su producción, se puedan mantener sin correr ningún tipo de riesgo al retirar dichas estructuras.

Ofrecen la mayor resolución en el eje Y, con capas de tan solo 0,016 mm (16 micras) con un acabado suave que rivaliza en nivel de detalle con los sistemas estereolitográficos.

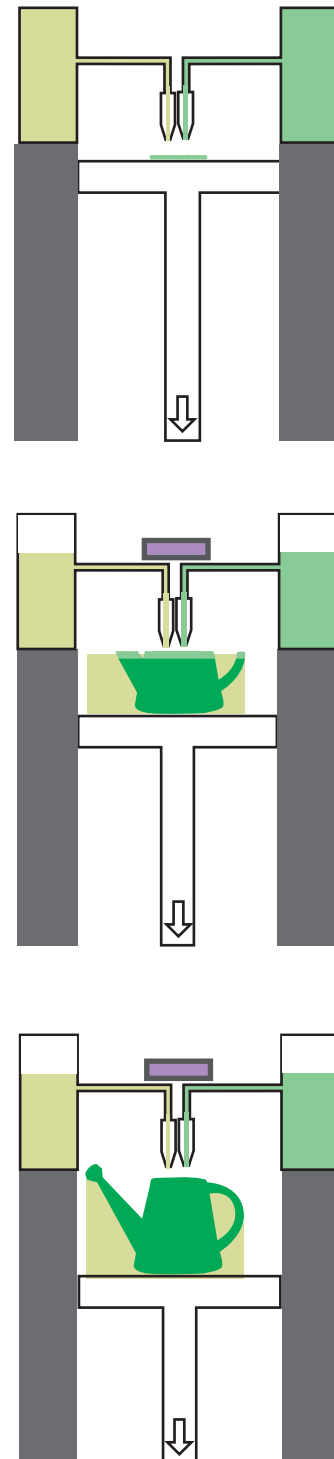


FIGURA 34

Esquema básico de la estructura de una maquina de sistema Polyjet o Multijet.

### 5.9.2. Materiales

La composición de las diferentes resinas fotopoliméricas consiste, en su mayoría, en diferentes porcentajes de acrilato de poliuretano, glicol de polipropileno y trietilenglicol dimetacrilato (TEGDMA), esta última considerada una resina biocompatible, por lo que los sistemas Polyjet y Multijet son muy apropiados para la fabricación de materiales quirúrgicos e implantes.

Los materiales que se utilizan se conocen con el término composite, que hace referencia precisamente a que son materiales compuestos por la suma de otros. Dependiendo de estos materiales y de sus porcentajes, las cualidades mecánicas de las piezas impresas serán unas u otras, lo que hace que sea un proceso apto para todo tipo de industrias e ideal para la fabricación de prototipos mecánicos.

### 5.9.3. Color

La gama de materiales fotopoliméricos adaptados a este sistema de producción es muy amplia por lo que se pueden encontrar materiales en casi cualquier color. Habitualmente las impresoras permiten combinar hasta dos colores dentro del mismo material, aunque el último gran avance en este proceso de impresión ha sido la salida al mercado de una impresora que no solo



FIGURA 35

Piezas impresas mediante el sistema Polyjet con la impresora Objet500 Connex de Stratasys. En la imagen superior con resinas de diferentes colores, en la inferior combinando incluso materiales con distintas propiedades.

Properties	Condition	VisiJet M3-X	VisiJet M3 Black	VisiJet M3 Crystal	VisiJet M3 Proplast	VisiJet M3 Navy	VisiJet M3 Techplast	VisiJet M3 Procast	VisiJet® S300
Composition		UV Curable Plastic							Wax Support Material
Color		White	Black	Natural	Natural	Blue	Gray	Dark Blue	White
Bottle Quantity		2 kg	2 kg	2 kg	2 kg	2 kg	2 kg	2 kg	2 kg
Density @ 80 °C (liquid)	ASTM D4164	1.04 g/cm <sup>3</sup>	1.02 g/cm <sup>3</sup>	1.02 g/cm <sup>3</sup>	1.02 g/cm <sup>3</sup>	1.02 g/cm <sup>3</sup>	1.02 g/cm <sup>3</sup>	1.02 g/cm <sup>3</sup>	N/A
Tensile Strength	ASTM D638	49 MPa	35.2 MPa	42.4 MPa	26.2 MPa	20.5 MPa	22.1 MPa	32 MPa	N/A
Tensile Modulus	ASTM D638	2168 MPa	1594 MPa	1463 MPa	1108 MPa	735 MPa	866 MPa	1724 MPa	N/A
Elongation at Break	ASTM D638	8.3 %	19.7 %	6.83 %	8.97 %	8 %	6.1 %	12.3 %	N/A
Flexural Strength	ASTM D790	65 MPa	44.5 MPa	49 MPa	26.6 MPa	28.1 MPa	28.1 MPa	45 MPa	N/A
Heat Distortion Temperature @ 0.45MPa	ASTM D648	88 °C	57 °C	56 °C	46 °C	46 °C	46 °C	N/A	N/A
Ash Content		N/A	N/A	N/A	0.01 %	0.01 %	0.01 %	0.01 %	N/A
Melting Point		N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	60 °C
Softening Point		N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	40 °C
USP Class VI Certified*		No	No	Yes	No	No	No	No	N/A
ProJet Compatibility		SD, HD	SD, HD	SD, HD	SD, HD	SD, HD	SD, HD	HD	SD, HD
Description		ABS-like Plastic	High strength & flexibility plastic	Tough Plastic, Translucent	Plastic, Natural	Plastic, Blue	Plastic, Gray	Castable Plastic	Non-toxic wax material for hands-free melt-away supports

FIGURA 36

Tabla de materiales disponibles para impresión con sistema Multijet printing de 3D Systems.

Material Mimic	Rigid Opaque/Color (Vero™)	Transparent Rigid	High Temp	Durus™	Endur™	Digital ABS™	Rubber-like/Flexible (Tango™)	Rigid Digital	Rubber-like Digital	Bio-compatible
Polypropylene – PP	*	*		***	***	**		**		*
High-Density Polyethylene – HDPE (PEHD)				***	***			**		
Polystyrene – PS	*	**		***	***	**		**		**
Poly Methyl Methacrylate – PMMA (Plexiglas)		***								***
Polycarbonate – PC		**								**
Acrylonitrile Butadiene Styrene – ABS	**	**	*	*	**	***		**		**
High-Impact Polystyrene – HIPS	**	**	*	*	**	***		**		**
Styrene-Based Thermoplastic Elastomers							***		***	
Ethylene Propylene Diene Monomer M-class – EPDM Rubber							**		**	
<b>Mechanical/Thermal Properties</b>	<b>Rigid Opaque/Color (Vero)</b>	<b>Transparent Rigid</b>	<b>High Temp</b>	<b>Durus</b>	<b>Endur</b>	<b>Digital ABS</b>	<b>Rubber-like/Flexible (Tango)</b>	<b>Rigid Digital</b>	<b>Rubber-like Digital</b>	<b>Bio-compatible</b>
Thermal Resistance – HDT (Heat Deflection Temperature)	**	**	***	*	**	***		**		**
Toughness	*	*	*	**	**	***		*		*
Elongation at Break	*	*	*	**	**	**	***	*	***	*
<b>Part Colors</b>	<b>Rigid Opaque/Color (Vero)</b>	<b>Transparent Rigid</b>	<b>High Temp</b>	<b>Durus</b>	<b>Endur</b>	<b>Digital ABS</b>	<b>Rubber-like/Flexible (Tango)</b>	<b>Rigid Digital</b>	<b>Rubber-like Digital</b>	<b>Bio-compatible</b>
Color	White, Gray, Blue, Black, Wide Variety of Colors	Transparent, Transparent Colors	White	Milky White	White	Green	Translucent, Gray and Black	Varying Gray Scale and Opacity	Varying Gray Scale and Opacity	Transparent, Rose

\* = Good \*\* = Better \*\*\* = Best

FIGURA 37

Tabla de materiales disponibles para impresión con sistema Polyjet printing de Stratasys.

permite combinar más de dos colores, sino que además permite combinar hasta dos materiales diferentes.

La impresora Objet500 Connex3 de Stratasys permite incorporar hasta 46 colores en un prototipo, eligiendo entre una gama de 10 paletas de color cerradas. Esta impresora además permite combinar hasta 3 materiales con diferentes cualidades, combinando así materiales rígidos con materiales elásticos, materiales opacos con materiales translúcidos.

#### 5.9.4. Acabados

Las resinas fotopoliméricas pueden tratarse con pintura y aceptan muchos tipos de tratamientos y procesos posteriores (cortar, pulir, taladrar...) e incluso pueden ser usadas directamente para fundir. Aunque hay algunas resinas específicas para fundición, hay otras más económicas que sin ser específicas para esto dan muy buen resultado, con un nivel de detalle más que suficiente y con un coste realmente bajo frente al coste de las ceras de fundición preparadas para usar con estos procesos.



FIGURA 38

---

Medalla en plata, resultado de fundir la resina Visijet Crystal producida mediante el sistema Multijet.

#### 5.9.5. Beneficios

El principal beneficio de este método de prototipado es el amplio abanico de materiales disponibles en el mercado, cada uno de ellos con unas propiedades específicas que imitan las cualidades de otros materiales ampliamente utilizados en la industria, lo que hace de este proceso un método idóneo para la creación de prototipos técnicos.

Además, el nivel de detalle que aporta es muy bueno, la resolución es la más alta respecto a la que ofrecen el resto de los sistemas. Por ello, es el proceso preferido por la industria joyera para la creación de piezas en cera.

## 5.10. CONCLUSIONES

Habitualmente se utiliza la expresión “impresión tridimensional” para hacer referencia a cualquiera de los procesos de prototipado rápido aditivo explicados en este capítulo. Cada uno de los procesos es lo suficientemente diferente a los otros como para referirse a ellos por su propio nombre. El objetivo de este capítulo ha sido el de estructurar las tecnologías presentes en el mercado de la forma más clara según el proceso de fabricación que utilizan, independientemente del material usado. Es probable que encontremos textos con terminologías que parezcan referirse a otras tecnologías, pero a día de hoy cualquiera de los procesos existentes se pueden clasificar dentro de uno de estos cinco procesos presentados, como es el caso del Direct Metal Láser Sintering, el cual habitualmente es presentado como una tecnología independiente pero que, en realidad y tal y como está recogido en este trabajo, es el proceso de Sinterizado Láser Selectivo aplicado al metal.

La idoneidad de cada uno de los procesos se verá afectada por varios factores entre los que cabe destacar, en primer lugar, el material a utilizar, ya que cada procedimiento cuenta con una gama de materiales que pueden ser utilizados y no son aplicables por igual en todos los procesos. Influirá, también, en la selección el nivel de detalle y el precio, el coste de la pieza a

imprimir, pues esta no solo depende del material sino que también se ve afectado por el proceso.

Estos factores entre otros se estudian en el siguiente capítulo que recoge el trabajo de investigación práctico y realizado con muestras hechas en casi todos los procedimientos aquí presentados.



# 6. IMPRESIÓN DE MODELOS TRIDIMENSIONALES EN DIVERSOS MATERIALES Y PROCESOS

El objetivo inicial de este trabajo de investigación, era el de estudiar y reunir en un único documento todas las tecnologías (o la mayoría de ellas) de prototipado rápido aditivo disponibles en el mercado de las que un artista se puede servir para producir sus modelos tridimensionales.

Después de explicar los diferentes procesos existentes y entender las diferencias principales de estos métodos de producción, nos centramos ahora en un factor fundamental para la creación escultórica, como son los tipos de materiales en los que podemos producir nuestra pieza. Existe una amplia variedad de materiales (cada vez más) entre los que podemos elegir para producir nuestra obra, algunos son considerados materiales definitivos y otros materiales de transición, aunque bien podrían ser considerados como definitivos.

Cada proceso trabaja con materiales diferentes, y la combinación de proceso y material otorga un acabado distinto a la pieza a producir. Ciertas características de los procesos están directamente relacionados con la marca o modelo de la impresora o maquinaria utilizada, como puede ser el tamaño máximo de producción. Si bien hay otras características que están relacionadas con el tipo de proceso o, incluso, el material con el que se produce, como puede ser el nivel de detalle, que es sin lugar a dudas un

elemento crítico para el campo que nos ocupa como es el de la creación plástica, o la textura.

Para entender las diferentes características que ofrecen los diferentes materiales se ha considerado necesario producir un mismo modelo en cada uno de los sistemas y materiales. De esta forma, tal como se muestra a continuación, se pueden apreciar las diferencias existentes de una manera más clara y objetiva.

## 6.1. EL MODELO DE BULTO REDONDO

Para realizar la comparativa de materiales y procedimientos se llevó a cabo el diseño de una regadera utilizando el programa de modelado Autodesk Maya. El motivo de realizar este elemento es que permite jugar con diferentes grosores y formas que ayudan no solo a ver la diferencia en el acabado de los diferentes materiales, sino que también a entender las limitaciones de cada uno de los procesos.

El hecho de diseñar una regadera también se definió como referencia al primer objeto diseñado por Martin Newell: La Tetera de Utah, pues la tipología del objeto es similar y de esta manera hacemos un pequeño homenaje a los orígenes y pionero del mundo del modelado tridimensional.

Respecto a la forma del modelo que se ha generado para este trabajo, cabe destacar que tiene una base plana, con una pequeña textura aplicada, que nos permitirá ver el nivel de detalle que alcanza cada uno de los materiales, también, al tener forma de embudo o cono podríamos identificar fácilmente los sistemas de producción que menos resolución ofrecen al ser más evidente el efecto de dientes de sierra o escalera.

El asa de la regadera es quizá el elemento más delicado de toda la pieza al tener una sección en forma de V. El cuello también es una parte delicada y nos permitirán identificar con cierta facilidad si algún sistema tiene problemas con los elementos volados.

El final de la regadera, la boca, lleva unos hendidos a modo de agujeros que nos permitirán ver el nivel de detalle que nos dan los diferentes procesos, al poder analizar si este detalle queda registrado o no.

El modelo, al que llamaremos REGADERA 1, ha sido diseñado con unas dimensiones que permitan su producción en todos los procesos sin que esto suponga un problema, así se ha definido una pieza con unas medidas de:  
5,716 cm. x 3,774 cm. x 3,190 cm.

El volumen total de la pieza es de 9.4257 cm<sup>3</sup>, y aunque en principio este dato pueda carecer de interés es el elemento principal que definirá el coste de nuestra pieza. El número de polígonos total que componen el modelo REGADERA 1 es de 23.712.

El tamaño de la pieza no supera los 3 cm. de altura y aun así hay procesos en los que la producción resulta extremadamente cara, por lo que para estos procesos se ha realizado una pieza más pequeña: un relieve, pues aquí lo que nos interesa es conocer el nivel de detalle de cada proceso.

Durante el desarrollo del trabajo se vio la necesidad de realizar ese mismo relieve en muchos de los procesos anteriores en los que no quedaba muy claro el nivel de detalle, dado que los objetivos de la investigación evolucionaron desde el objetivo inicial de estudiar únicamente materiales y procesos a incluir la parte del desarrollo de un relieve con procesos digitales, resulta más que evidente la necesidad de estudiar más a fondo las capacidades y resultados que ofrecen los diferentes procesos a la hora de producir un relieve.

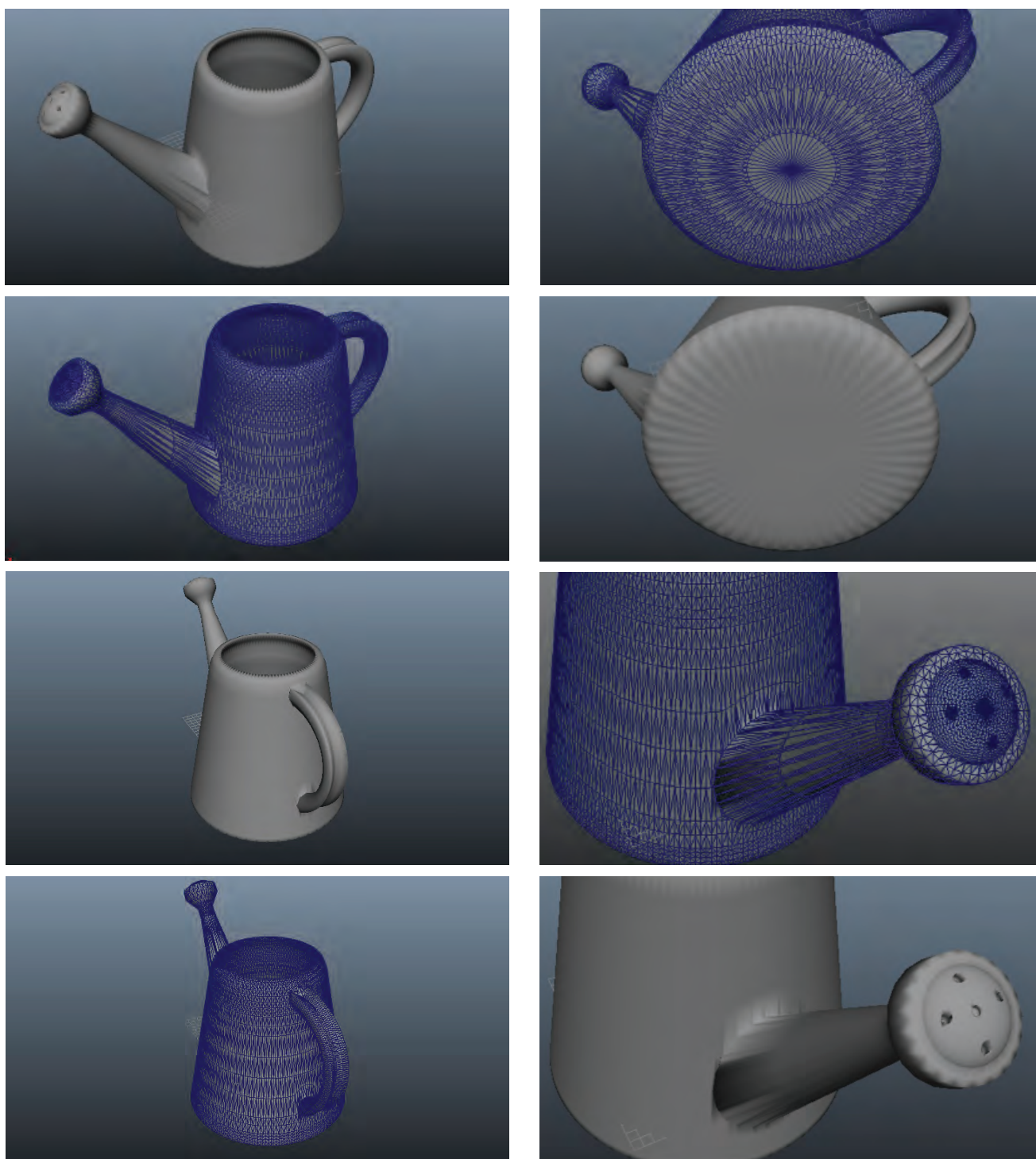


FIGURA 1

Imágenes del modelo REGADERA 1 con previsualización del render volumétrico y con polígonos, donde se puede apreciar la composición geométrica del modelo.

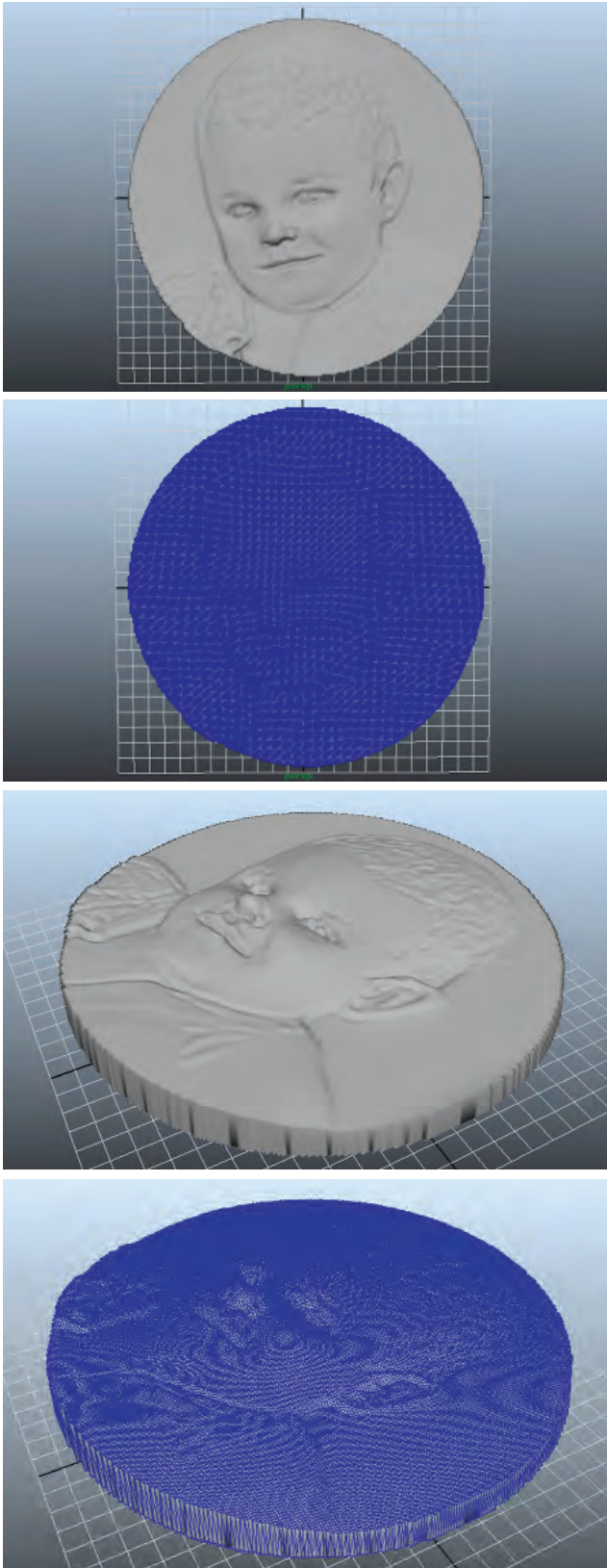


FIGURA 2

Imágenes del modelo MEDALLA1 con previsualización del render volumétrico y con polígonos, donde se muestra la composición geométrica del modelo.

## 6.2. EL MODELO DE RELIEVE

Se trata de una medalla de 22 mm. de diámetro y 2,6 mm de altura, con un volumen total de 0,56 cm<sup>3</sup> y un número total de 84.743 polígonos. MEDALLA 1 es el primer relieve que se modeló para este trabajo y sirvió para establecer las bases para la posterior investigación en creación de relieves con tecnologías digitales que se explica más ampliamente en el capítulo 7 de este trabajo.

## 6.3. CARACTERÍSTICAS DE LAS MUESTRAS

Cada una de las muestras impresas va acompañada de una ficha técnica donde se analizan algunos aspectos que se han considerado relevantes para definir el material y procedimiento.

Algunas características están directamente relacionadas con el proceso o material, como puede ser la temperatura de ignición o la temperatura de reblandecimiento VICAT, por lo que no aparecen reflejadas en todos los análisis de las muestras, solo en aquellos procesos o materiales en los que aplica, y otras características que se detallan en cada una de las muestras como el tamaño máximo de impresión o el grosor de las paredes.

Una de las características diferenciadoras entre unos procesos y otros es la capacidad de producir piezas entrelazadas, como cadenas o engranajes,

y piezas o volúmenes que contienen otras piezas manteniéndose de forma independiente (piezas encapsuladas), sin estar unidas unas con otras. Esto no se da en todos los procesos y para que ocurra en los procesos que lo permiten, esta posibilidad está relacionada con el espacio necesario que hay que dejar entre una pieza y otra para que no se fundan, lo que denominamos como holgura.

Así, en las fichas que acompañan a cada uno de los procesos se analizan elementos comunes y algunos específicos de cada uno de los procesos en los que las muestras han sido producidas.

#### 6.4. MUESTRAS

En total se han producido 16 piezas de la regadera de las cuales 9 son del modelo REGADERA1, 3 han sido producidas utilizando el modelo REGADERA 2 y 3 impresiones corresponden al modelo REGADERA 3.

El modelo REGADERA 1 es el descrito en el punto 6.1. Este modelo presentó ciertos problemas a la hora de ser producido en algunos procesos y materiales y fue necesario hacer adaptaciones del mismo. Así, el modelo REGADERA 2 es un modelo con menos polígonos (y por lo tanto menor resolución) que permitió aplicar un mapa de textura a la pieza. El modelo REGADERA 3 es un modelo con menos detalles que el modelo

REGADERA 1 debido a los errores que surgían en algunos procesos al imprimir el reborde interior de la apertura superior de la pieza por ser demasiado fino.

La mayoría de los modelos se han producido fuera de España por motivos económicos. La diferencia de precio era sustancial para todos los procesos incluyendo los gastos de envío, por lo que el proceso de realizar todas las piezas ha tenido lugar a lo largo de 24 meses. Aunque en España hay empresas que ofertan este tipo de trabajos de prototipado, el mercado está tan poco desarrollado que los proveedores que hay están muy especializados en alguna de las técnicas mientras que a nivel internacional comienza a haber proveedores globales que trabajan en prácticamente todos los procesos, o en una amplia selección de ellos.

De la medalla se han producido en total 7 muestras, 1 de ellas producida en un material no utilizado con ninguno de los modelos de la regadera debido al alto precio del material (cera).

A parte de las piezas que se han producido específicamente para esta parte de la investigación cuyo objetivo es hacer una comparativa de materiales y procesos, se han producido otros modelos que se recogen al final de este capítulo.

## MUESTRA 1

---



MODELO  
**REGADERA 1**

MATERIAL  
**POLIAMIDA PA 2200**

PROCESO  
**SINTERIZADO LÁSER SELECTIVO**

PRECIO DE LA PIEZA  
19,53 €

GROSOR MÍNIMO DE LAS PAREDES  
0,7 mm.

Aunque los fabricantes recomiendan que los grabados deberían medir 0,5 mm., los grabados de 0,2 mm. se aprecian a la perfección.

TAMAÑO MÁXIMO  
650 mm. x 350 mm. x 550 mm.

TEMPERATURA DE ESTABILIDAD  
80 °C.

TEMPERATURA DE IGNICIÓN  
+350 °C.

TEMPERATURA DE REBLANDECIMIENTO VICAT  
172-180 °C.

RESOLUCIÓN  
60  $\mu\text{m}$  (0,06 mm.).

FLEXIBILIDAD  
Es un material de flexibilidad media, que depende del grosor de las partes.

EXACTITUD  
+0,15 mm., +0,15 %.

ENGRANAJES Y PIEZAS ENCAPSULADAS  
Sí, con una holgura mínima de 0,5 mm.

El resultado al imprimir la pieza mediante Sinterizado Láser Selectivo es una pieza con un acabado muy suave y una gran calidad en el detalle.

Está compuesta de un polímero sólido indisoluble en agua con poco nivel de flexibilidad. Es un material que ofrece bastante nivel de detalle (los relieves marcados en la boca de la regadera se aprecian perfectamente a simple vista) y además es de los más económicos de los que se dispone actualmente en el mercado.

La poliamida es un material flexible, duradero y apto para alimentación. Los objetos impresos con este material tienen una amplia gama de usos desde mecánicos (prototipos, objetos articulados...), hasta decorativos.



FIGURA 3

Imágenes de la pieza MUESTRA 1 impresa en poliamida mediante Sinterizado Láser Selectivo.

La flexibilidad de la poliamida está directamente relacionada con el grosor de la pieza, así, con un grosor de 0,8 mm., el modelo será relativamente flexible mientras que si el grosor de la pared es de 2 mm., la pieza será rígida.

Este material plástico trabajado mediante SLS permite imprimir diseños realmente complejos, como podrían ser piezas encapsuladas (un volumen dentro de otro) o entrelazados como cadenas o engranajes. Cuando se imprimen varios objetos, o en caso de querer fabricar volúmenes entrelazados, el espacio entre las partes independientes debe ser de al menos 0,5 mm. para evitar que durante el proceso se fundan.

Cabe destacar que al no necesitar estructuras de soporte no hay riesgo de que la pieza pueda romperse al retirarla y solo será necesario limpiarla una vez terminado el proceso de impresión.

## TEXTURA

La textura que deja el sinterizado láser de poliamida es bastante homogénea y suave con cierta rugosidad o grano. Con una resolución suficiente para que se aprecien los pequeños relieves con forma circular de la boca de la regadera (Figura 5).



FIGURA 4

Imagen ampliada de la textura de la Poliamida 2200.



FIGURA 5

Imagen ampliada del relieve de la boca de la regadera.



FIGURA 6

MUESTRA 23. Relieve de 60 mm. x 60 mm. x 5 mm.



FIGURA 7

Relieve de 60 mm. x 68 mm. x 4 mm.

A la izquierda relieve a escala 1:1; a la derecha ampliación de la imagen donde se puede apreciar el efecto de curvas de nivel y rugosidades erróneas. La resolución de impresión derivada del proceso y el material utilizado, así como la orientación incorrecta en el espacio de trabajo durante el proceso de impresión, ha dado lugar a este relieve.



FIGURA 8

Relieve de 22 mm. de diámetro x 2 mm. de alto.

A la izquierda relieve a escala 1:1, a la derecha ampliación de la imagen donde se puede apreciar el efecto de curvas de nivel y rugosidades erróneas. La resolución de impresión derivada del proceso de impresión y el material utilizado ha dado lugar a este relieve.

Depende de la resolución de la impresión y del material utilizado en el uso con relieves puede dar un resultado considerablemente bueno (Figura 6) o malo como se aprecia en la Figura 7 realizada con una resolución de 100-150  $\mu\text{m}$ . Además, de la resolución en el nivel de detalle también interviene la orientación de la pieza a la hora de ser impresa, esto se explica con más detenimiento en el siguiente capítulo.

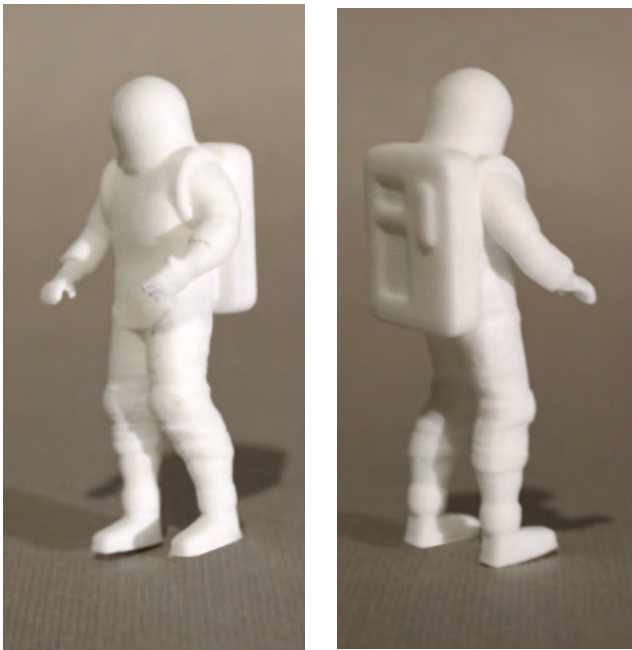


FIGURA 9

Pieza de bulto redondo *Astronauta* impresa en poliamida blanca de 3 cm. x 7 cm. x 2,5 cm. aproximadamente.

## ACABADOS

Es posible pulir el material y teñirlo o pintarlo con diferentes técnicas. Para limpiar las imperfecciones se puede hacer perfectamente con una cuchilla y unas lijas. Si nuestra figura es demasiado grande para estar realizada de una sola pieza, se puede producir por partes y posteriormente unir las utilizando un adhesivo de cianocrilato tipo Loctite o Araldite. Hay que tener en cuenta que el material es poroso y puede absorber el pegamento por lo que posiblemente necesite de varias capas a modo de tapaporos antes de unir las diferentes partes.

Se pueden encontrar on-line varias técnicas para pintar las piezas producidas con nylon, casi siempre basadas en pintura acrílica. Sería una línea de investigación interesante encontrar que materiales y técnicas pictóricas son las más apropiadas para este tipo de material, aunque a simple vista el acabado con acrílico funciona perfectamente como se puede apreciar en la imagen en color de la pieza *Astronauta*.



FIGURA 10

Pieza *Astronauta*, impresa en poliamida blanca y pintada con pintura acrílica.

## MUESTRA 2

---



MODELO  
**REGADERA 1**

MATERIAL  
**ALUMIDE: poliamida (nylon) +aluminio**

PROCESO  
**SINTERIZADO LÁSER SELECTIVO**

---

PRECIO DE LA PIEZA  
24,32 €

RESOLUCIÓN  
150  $\mu\text{m}$  (0.15mm.).

GROSOR MÍNIMO DE LAS PAREDES  
1 mm.

FLEXIBILIDAD  
Media.

TAMAÑO MÁXIMO  
310 mm. x 310 mm. x 400 mm.

EXACTITUD  
 $\pm 0.3 \%$

TEMPERATURA DE ESTABILIDAD  
130 °C

ENGRANAJES Y PIEZAS ENCAPSULADAS  
Sí, con una holgura de 0,5 mm.

TEMPERATURA DE REBLANDECIMIENTO VICAT  
De la poliamida 169 °C

PUNTO DE FUSIÓN  
172-180 °C

Alumide es el nombre comercial de una mezcla de polvo de poliamida con polvo de aluminio. Es un material muy fuerte, con una alta resistencia. Lo más característico es el acabado granular de color gris donde se pueden diferenciar las partículas de aluminio de las de poliamida por su brillo.

Es una textura porosa y al igual que la pieza impresa en poliamida permite un tratamiento posterior con lija fina y, por supuesto, con pintura plástica o esmaltes.

La resolución es equivalente a lo que se considera resolución estándar para la poliamida con capas de un grosor de 0,15 mm. Así como la poliamida permite el trabajo con una resolución mayor (0,06 mm.) que se conoce como Alta Resolución, el Alumide es un material que solo se puede trabajar en la resolución estándar.



FIGURA 11

Imágenes de la pieza MUESTRA 2, impresa en poliamida mediante Sinterizado Láser Selectivo.

No obstante, la calidad del detalle es bastante considerable, y se pueden apreciar perfectamente las marcas en la boca de la regadera.

Además de la regadera se ha impreso otra pieza. En este caso un relieve similar al que se ha impreso en otros materiales, pero con un formato diferente. El nivel de detalle es aceptable, pero debido a la resolución y a la textura no es un material adecuado para piezas que necesiten detalle.

Es un material interesante a nivel estético y muy resistente que puede tener aplicaciones muy interesantes a nivel escultórico. Al contener poliamida, el material acepta aplicaciones de pinturas y tintes.



---

FIGURA 12

Detalle de la boca de la regadera.



---

FIGURA 13

Relieve impreso en Alumide.

## MUESTRA 3



MODELO  
**REGADERA 1**

MATERIAL  
**ELASTÓMERO PLÁSTICO TPU\***

PROCESO  
**SINTERIZADO LÁSER SELECTIVO**

PRECIO DE LA PIEZA  
21,50 €

RESOLUCIÓN  
150  $\mu\text{m}$  (0.15mm.).

GROSOR MÍNIMO DE LAS PAREDES  
0,8 mm.

FLEXIBILIDAD  
Muy alta. Material elástico tipo goma

TAMAÑO MÁXIMO  
300 mm. x 300 mm. x 250 mm.

EXACTITUD  
Margen de error bastante alto ya que el material tiende a cambiar su volumen dependiendo de la temperatura.

TEMPERATURA DE ESTABILIDAD  
90 °C.

ENGRANAJES Y PIEZAS ENCAPSULADAS  
Sí, con una holgura de 5 mm.

PUNTO DE FUSIÓN  
160 °C.

\*No hay ficha técnica del material disponible.

Se trata de un material muy elástico pero robusto, con alta resistencia a las tensiones y abrasiones con un acabado granulado. La capacidad elástica depende del grosor, así los objetos impresos con paredes finas son más elásticos que los objetos más gruesos. Si bien los objetos gruesos tienen la robustez suficiente como para ser utilizados como elementos estructurales por ser un material muy fuerte.

Debido a las cualidades de este material, el tamaño de la pieza puede variar ligeramente durante el proceso de sinterizado, aumentando aproximadamente 0.4 mm. en el eje Z y hasta 0.2 mm. en los ejes X e Y.

Al utilizar el mismo método de impresión que el nylon, dependiendo de la orientación de la pieza en la impresora se puede ver una pequeña textura de escalera. Esto es debido, como ya se ha comentado anteriormente, a que el proceso de Sinterizado Láser Selectivo es un proceso que va sinterizando capas de material de un grosor aproximados a 0,15 mm. Se nota especialmente en superficies curvas.



FIGURA 14

Imágenes de la pieza MUESTRA 3 impresa en elastómero plástico TPU mediante Sinterizado Láser Selectivo.

## MUESTRA 4



MODELO  
**REGADERA 3**

MATERIAL  
**ELASTÓMERO PLÁSTICO TPU 92A-1\***

PROCESO  
**SINTERIZADO LÁSER SELECTIVO**

PRECIO DE LA PIEZA  
35,83 €

RESOLUCIÓN  
150  $\mu\text{m}$  (0.15mm.).

GROSOR MÍNIMO DE LAS PAREDES  
0,8 mm.

FLEXIBILIDAD  
Muy alta. Tipo goma

TAMAÑO MÁXIMO  
300 mm x 300 mm. x 250 mm.

EXACTITUD  
Margen de error bastante alto, ya que el material tiende a cambiar su volumen dependiendo de la temperatura.

TEMPERATURA DE ESTABILIDAD  
90 °C.

PUNTO DE FUSIÓN  
160 °C.

ENGRANAJES Y PIEZAS ENCAPSULADAS  
Sí, con un espacio de separación de 1 mm.

\*Material fabricado por Materialise. Sin ficha técnica disponible.

Esta muestra en elastómero se ha realizado usando el modelo REGADERA 3. Técnicamente el modelo REGADERA 1 daba un error al imprimir en el reborde interior que había en la apertura superior de la pieza. Este reborde al aire era marcado por el programa de procesamiento como erróneo por ser demasiado fino, por lo que el técnico que imprimió el modelo sugirió cambiarlo.

La muestra 3 y la muestra 4 están impresas en materiales considerados en ambos casos materiales de prueba, por lo que los datos técnicos están obtenidos de la ficha del material sin procesar, no de un material preparado para ser comercializado.

La calidad de la pieza es muy buena y el nivel de



FIGURA 15

---

Imágenes de la pieza MUESTRA 4 impresa en elastómero plástico TPU negro mediante Sinterizado Láser Selectivo.

detalle es aceptable aunque las marcas circulares de la boca de la regadera son prácticamente imperceptibles. Es un material muy resistente y flexible.

Como ya se ha comentado con anterioridad se trata de un material en proceso de investigación, lo que no ha limitado a artistas e ingenieros a probarlos y trabajar con ellos.

La artista alemana, Iris Van Herpen, presentó en al Semana de la Moda de París de 2012 una colección cuyas prendas estaban impresas con diferentes métodos y materiales. Entre las prendas presentadas destaca la que se muestra en la imagen de la derecha, impresa con TPU donde se muestra que las limitaciones de grosores y estructura pueden ser superadas con un buen ejercicio técnico. Se demuestra, así, que los estándares de trabajo y los protocolos de trabajo no están definidos para según que materiales, poniendo en evidencia el carácter innovador de estas nuevas tecnologías.

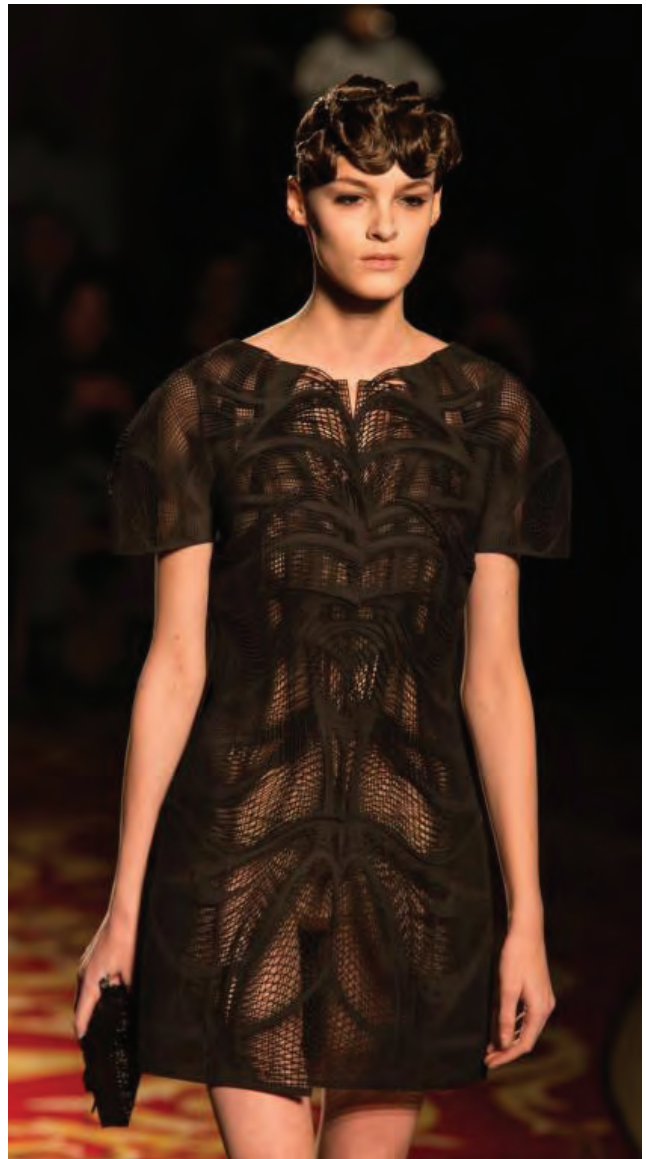


FIGURA 16

Pieza de Iris Van Herpen en un desfile durante la Semana de la Moda de París, de 2012.

## MUESTRA 5

---



MODELO  
**REGADERA 3**

MATERIAL  
**RESINA FOTOPOLIMÉRICA: ACCURA EXTREME**

PROCESO  
**ESTEREOLITOGRAFÍA (SLA)**

---

PRECIO DE LA PIEZA  
38,24 €

GROSOR MÍNIMO DE LAS PAREDES  
1 mm.

TAMAÑO MÁXIMO  
250 mm. x 250 mm. x 235 mm.

TEMPERATURA DE ESTABILIDAD  
62 °C.

PUNTO DE FUSIÓN  
N/A

RESOLUCIÓN  
150 µm (0.15mm.).

FLEXIBILIDAD  
No

EXACTITUD  
± 0.2 %

HOLGURA / SEPARACIÓN ENTRE PARTES  
0,3 mm.

ENGRANAJES Y PIEZAS ENCAPSULADAS  
NO

Para esta pieza se ha utilizado el modelo REGADERA 3, debido al error que daba al imprimir el reborde en la parte superior de la regadera.

El material utilizado es un material fuerte y rígido nada flexible, de tacto suave y acabado brillante. En la pieza impresa se puede apreciar el brillo en la base interior de la regadera.

El material puede ser trabajado, una vez impresa la pieza, mediante técnicas de mecanizado como corte o taladro y admite trabajos de esmaltado.

La parte inferior presenta un acabado mate y una marca derivada del proceso de impresión. Una vez impresa la pieza hay que retirar los soportes que sustentan la pieza durante su fabricación y, de ahí, el acabado mate de la base.

El modelo está claramente impreso en su posición natural ya que se aprecia perfectamente las líneas horizontales o dientes de sierra que se generan al producir el objeto capa por capa.

El nivel de detalle es bastante limitado ya que los relieves marcados en la boca de la regadera han desaparecido. Sería necesario hacer una segunda impresión en este material con el soporte de otro equipo técnico, ya que resulta cuanto menos extraño, que una tecnología que



FIGURA 17

Imágenes de la pieza MUESTRA 5 impresa en resina fotopolimérica mediante estereolitografía.

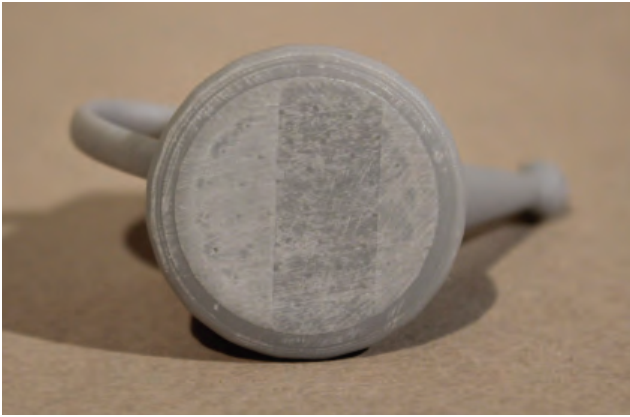


FIGURA 18

Detalle de la base de la Muestra 5.



FIGURA 19

Imágenes detalle de la pieza Muestra 5 donde se pueden ver las curvas de nivel generadas por el proceso de *slicing*.

se define como una de las que más calidad dan, marque tanto las curvas de nivel y elimine los pequeños detalles, por lo que creo que el programa de preprocesado del modelo (el que lleva a cabo el procedimiento de *slicing*) ha realizado una mala ejecución de la pieza.

La resolución de la pieza está dentro de los límites de lo que se considera una resolución estándar para estereolitografía que es de entre 0,12 mm. y 0,15 mm. Producir estereolitografía en alta definición (entre 0,05 mm. y 0,10 mm.) resulta muy caro y no todos los materiales lo admiten.

En conclusión, la pieza tiene un acabado muy robusto y brillante pero el nivel de detalle es bastante limitado con curvas de nivel o dientes de sierra muy evidentes a simple vista y al tacto.

## MUESTRA 6



MODELO  
**REGADERA3**

MATERIAL  
**ABS-M30**

PROCESO  
**MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA**

PRECIO DE LA PIEZA

65,00 €

RESOLUCIÓN

150  $\mu\text{m}$  (0.15mm.).

GROSOR MÍNIMO DE LAS PAREDES

1 mm.

FLEXIBILIDAD

Muy baja

TAMAÑO MÁXIMO

400 mm. x 365 mm. x 400 mm.

EXACTITUD

$\pm 0.1\%$

TEMPERATURA DE ESTABILIDAD

82 °C.

HOLGURA

0,4 mm.

TEMPERATURA DE REBLANDECIMIENTO VICAT

99 °C.

ENGRANAJES Y PIEZAS ENCAPSULADAS

Sí.

Para el proceso de Modelado por Deposición Fundida (MDF) hemos producido el modelo REGADERA 3 debido al tamaño mínimo de las paredes que requería el proceso. En este caso el problema de usar un modelo con un grosor menor a 1 mm. no habría resultado en un error de impresión como puede ocurrir en otros procesos en los que simplemente esa parte acabaría rompiéndose, sino que las paredes del modelo con un grosor menor a 1 mm. acabarían teniendo precisamente ese grosor.

Es un material que deja bastante textura gracias a la cual se puede descifrar el recorrido del cabezal de impresión durante el proceso simplemente observando el resultado (Figura 21).

El material es bastante ligero y permite trabajar sobre él una vez impresa la pieza: se puede lijar y pintar sin problemas. El nivel de detalle que da este proceso es bastante pobre, pero en sí es un proceso bastante económico en comparación con el resto debido al bajo precio del material.

En este caso el coste de la pieza ha salido bastante alto debido a que ha sido producida por un proveedor externo y no en una máquina propia, al ser un proceso especialmente lento el tiempo de producción es mucho, lo que incrementa el coste total de la pieza.



FIGURA 20

Imágenes de la pieza MUESTRA 6 impresa en plástico ABS mediante Modelado por Deposición Fundida.

El Modelado por Deposición Fundida está enfocado a la producción propia, hay pocos proveedores que trabajen el proceso por encargo. Sin embargo hay muchas tiendas y negocios enfocados a la distribución de filamentos (nombre que recibe el plástico preparado en bobinas listo para ser procesado por las máquinas MDF). Resulta ser un procedimiento muy sencillo, y de los menos peligrosos al no tener que utilizar materiales líquidos que puedan ser inflamables o tóxicos, ni el material en polvo que puede ser respirado si no tenemos cuidado. El único riesgo que entraña este procedimiento para la salud es que el cabezal alcanza altas temperaturas para fundir el filamento.

Es un procedimiento muy apto para la producción de piezas de medio y gran formato más allá de la limitación del espacio de trabajo de la impresora con la que se trabaje, ya que los materiales con los que se puede imprimir permiten sin ningún problema ser unidos mediante adhesivos posteriormente generando así piezas de gran tamaño.

La amplia gama de materiales plásticos disponibles para trabajar con el proceso MDF permiten que los objetos que imprimamos tengan usos de todo tipo ya que hay materiales aptos para la alimentación, incluso materiales que pueden ser usados a nivel médico como herramientas o implantes.



FIGURA 21

Imágenes detalle de la base de la pieza Muestra 6 donde se puede apreciar la textura resultado del proceso.

## MUESTRA 7

---



MODELO

**REGADERA 1**

MATERIAL

**VisiJet-PXL-Core**

**Sulfato de calcio hemihidrato (yeso)**

PROCESO

**IMPRESIÓN 3D POR INYECCIÓN. Z-PRINT**

---

PRECIO DE LA PIEZA

18,05 €

RESOLUCIÓN

0,1 mm.

GROSOR MÍNIMO DE LAS PAREDES

1,5 mm.

FLEXIBILIDAD

No. Muy frágil

TAMAÑO MÁXIMO

254 mm. x 381 mm. x 204 mm.

EXACTITUD

N/A

PUNTO DE FUSIÓN

1.460 °C.

HOLGURA / SEPARACIÓN ENTRE PARTES

0,9 mm.

ENGRANAJES Y PIEZAS ENCAPSULADAS

Sí.

La muestra número 7 está impresa mediante el proceso de impresión 3D por inyección de tinta. Este proceso se conoce habitualmente por su nombre comercial Z-Printing o Z-Corp.

Es un material muy rígido, nada flexible y bastante delicado, parecido a una escayola. El modelo una vez impreso, se termina sumergiendo en un baño de cianocrilato para dotar al material de mayor resistencia.

Con una textura arenosa pero con un nivel de detalle bastante bueno. Es usado para modelos visuales sin propiedades funcionales, ya que las cualidades mecánicas del material no permiten su utilización para prototipos útiles.



FIGURA 22

Imágenes detalle de la pieza MUESTRA 7.



FIGURA 23

Imágenes de la pieza MUESTRA 7 impresa mediante impresión 3D por inyección.

MUESTRA 8

---



MUESTRA 9

---



---

MODELO

**REGADERA 2**

MATERIAL

**VisiJet-PXL-Core**

**Sulfato de calcio hemihidrato (yeso)**

PROCESO

**IMPRESIÓN 3D POR INYECCIÓN. Z-PRINT**

---

PRECIO DE LA PIEZA

19,25 €

Las muestras 8 y 9 han sido realizadas con el mismo procedimiento y archivo (el modelo REGADERA2) pero a la hora de ser preprocesado por el programa que prepara el archivo para su impresión uno fue colocado en posición vertical (posición natural) y el otro en posición horizontal.

El modelo REGADERA 1 no estaba previsto para que se le aplicara una textura, estaba modelado para que tuviera resolución y diferentes formas sugerentes que permitieran estudiar los diferentes comportamientos de sistemas de impresión.

A la hora de aplicar un mapa de textura resultaba imposible descomponer la figura de tal forma que fuera sencillo aplicar este mapa, por lo que se utilizó un modelo simplificado (REGADERA 2) con menos planos, lo que implica una menor resolución, que permitiera aplicar un mapa UV de una forma sencilla.



FIGURA 24

Imágenes de la pieza MUESTRA 8.

FIGURA 25

Imágenes de la pieza MUESTRA 9.

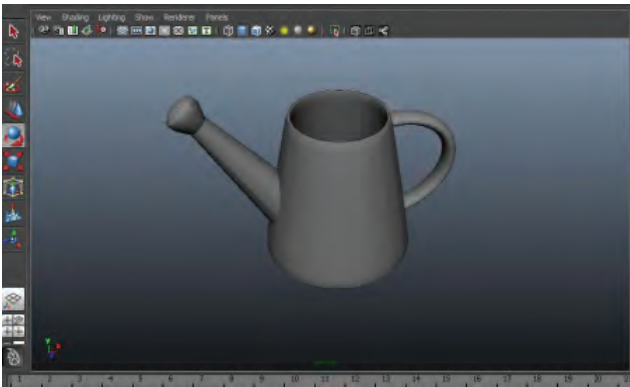


FIGURA 26

Modelo sin textura aplicada.

Aplicar un mapa de textura UV es relativamente sencillo si el modelo está construido de tal forma que se puede descomponer su geometría para aplicar una imagen como mapa de textura.

Una vez diseñada la imagen, se aplica en el programa de modelado colocando las distintas secciones obtenidas del modelo hasta que el mapa aplicado sobre el modelo tridimensional da el resultado deseado. En este caso, para hacer las pruebas de color se diseñó una imagen para que la regadera tuviera un color plano en su interior que invade parcialmente la parte exterior (marrón), otro color en el exterior (verde oscuro) y una imagen con detalle para poder ver la calidad de la impresión final.

Al terminar el archivo y mandarlo a la impresora, no solo hay que mandar el archivo con la

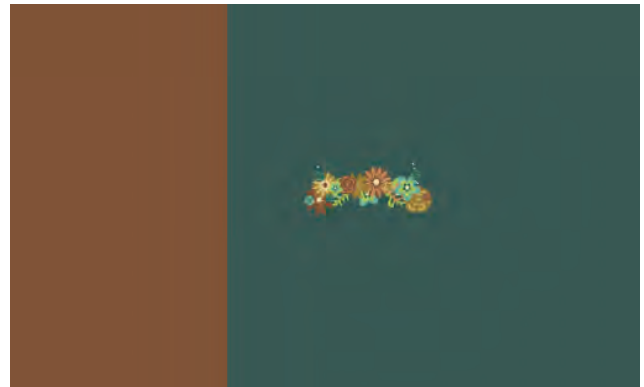


FIGURA 27

Imagen JPG que se aplicará como mapa de textura.

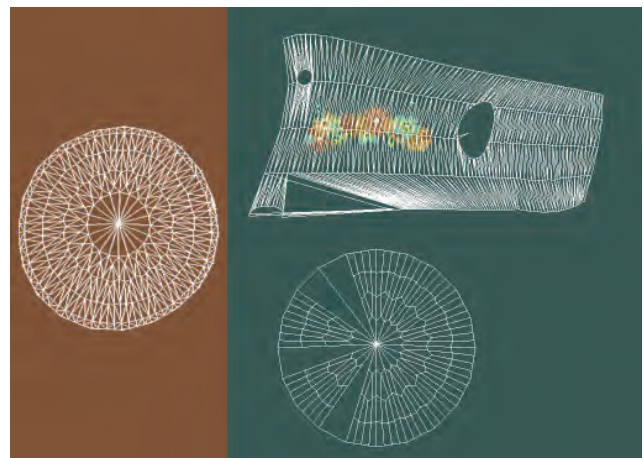


FIGURA 28

Descomposición de la maya sobre el mapa.

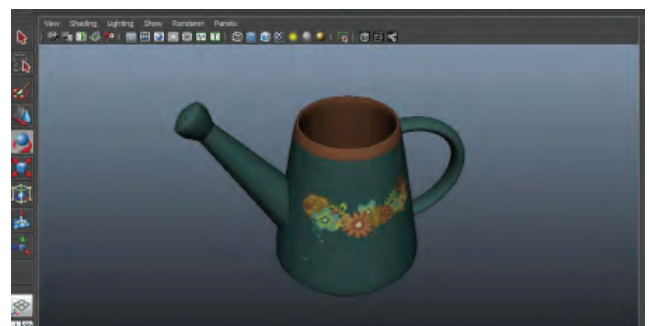


FIGURA 29

Modelo 3D con el mapa aplicado.

información tridimensional, sino que hay que mandar también el archivo de color, en este caso un JPG.

Primero se imprimió la muestra número 8. El resultado no fue todo lo satisfactorio que cabría esperar. La imagen de la base de la muestra 8 tiene muy buena calidad, es la parte más nítida, pero la imagen impresa sobre las paredes carece de calidad, nitidez e intensidad. Debido a esto se realizó una segunda impresión, esta vez colocando la regadera en posición horizontal. El resultado (Muestra 9) fue el inverso, una calidad de impresión mucho mejor en las caras exteriores de la regadera y peor en la base.

En conclusión, la impresión en color resulta de mayor calidad cuando se imprime en el plano ZX que sobre los planos XY y ZY.

Respecto a la intensidad de color cabe destacar que a pesar del baño de cianocrilato que se le aplica para mantener la intensidad del color, el contacto con el agua o con un elemento húmedo, como podría ser un trapo mojado, hace que la imagen se desvanezca, por lo que son piezas muy delicadas cuya conservación habría que estudiar. En las fotografías de la muestra 8 se puede apreciar perfectamente la pérdida de intensidad de color.

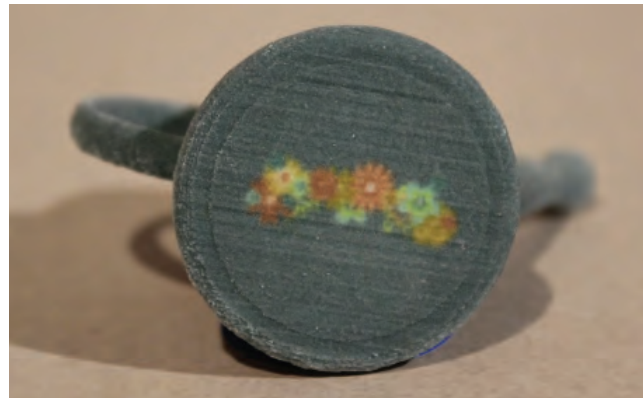


FIGURA 30

La imagen superior muestra la base de la Muestra 8; la inferior la de la Muestra 9.

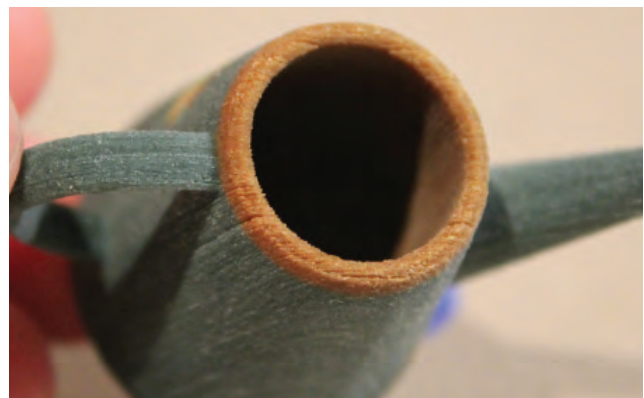


FIGURA 31

Imagen donde se aprecia el color aplicado en el interior de la regadera.

MUESTRA 10

---



MODELO

**REGADERA 1**

MATERIAL

**Polvo de acero inoxidable + Infiltrado de bronce**

PROCESO

**IMPRESIÓN 3D POR INYECCIÓN. Z-PRINT**

---

PRECIO DE LA PIEZA

55,65 €

RESOLUCIÓN

0,1 mm.

GROSOR MÍNIMO DE LAS PAREDES

1 mm.

FLEXIBILIDAD

No.

TAMAÑO MÁXIMO

762 mm. x 393 mm. x 393 mm.

EXACTITUD

N/A.

HOLGURA / SEPARACIÓN ENTRE PARTES

0,8 mm. / 1 mm.

ENGRANAJES Y PIEZAS ENCAPSULADAS

No.

La muestra 10 ha sido impresa mediante el procedimiento de Impresión 3D por inyección de tinta usando como material de base un polvo de acero inoxidable. Finas capas de este polvo de acero inoxidable se depositan en la bandeja de impresión, el cabezal de impresión deposita sobre esta capa gotas de aglutinante configurando así la forma de la pieza.

Una vez que la pieza ha sido fabricada, esta es extraída de la impresora y se introduce en un horno que la sinteriza. En este punto, que se conoce como *estado verde*, la pieza todavía es muy débil. Para dotar a la pieza de mayor resistencia se infiltra bronce líquido, que reemplazará al aglutinante convirtiendo nuestra pieza en un objeto de metal sólido.

Para este procedimiento es aconsejable que la pieza tenga un grosor mínimo de 3 mm., aunque para el proceso de impresión no se requiere (pueden imprimirse grosores de 1 mm.) es aconsejable, por el proceso de sinterizado y de infiltrado. A pesar de ello nuestro modelo tiene un grosor de 1 mm. en la parte superior y se ha impreso sin errores.



FIGURA 32

Imágenes de la pieza MUESTRA 10 impresa mediante impresión 3D por inyección.

El resultado del proceso completo es una pieza muy sólida con un acabado bastante bueno. Al estar realizada en metal es, sin duda, el modelo con mayor peso, y el procedimiento de impresión mediante inyección da un nivel de detalle bastante aceptable, como se puede observar en la boca de la regadera y en la base, donde el relieve se aprecia perfectamente.

A simple vista se puede apreciar las curvas de nivel generadas por el proceso de impresión donde queda patente que la pieza se ha impreso en posición horizontal. Estas marcas se pueden eliminar de una forma sencilla con solo pasar una fina lija.

El color de la pieza, en este caso, es bastante homogéneo, pero si se compara el tono con el de la medalla impresa mediante el mismo sistema se aprecia claramente tonalidades diferentes. Esto es debido a que el material está compuesto por acero inoxidable 420 infundido con bronce, con una composición final de aproximadamente 60 % de acero y 40 % de bronce. Al infiltrar el bronce en el acero puede variar el color de la pieza. Si hay una mayor concentración de bronce cerca de la superficie del producto, el color será más oscuro, más parecido al color del bronce.



FIGURA 33

Imágenes detalle de la pieza MUESTRA 10 donde se puede ver la resolución de impresión.



FIGURA 34

Detalle de la superficie de la regadera.

En este mismo material y procedimiento se ha impreso también el modelo MEDALLA 1. Aunque el nivel de detalle que se obtuvo al imprimir la regadera daba indicios de que el resultado con la medalla podía ser bastante satisfactorio a pesar del efecto de curvas de nivel, lo cierto es que el resultado no es bueno. El nivel de detalle es pobre y las curvas de nivel restan protagonismo al resto del modelo.

Sería interesante repetir la impresión colocando la medalla sobre otro plano distinto a ZX, como ya se verá en el siguiente capítulo, este resultado es típico de una orientación inadecuada en la cubeta de procesamiento.

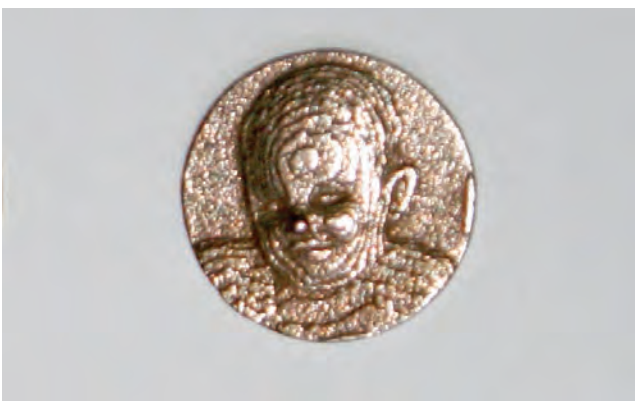


FIGURA 35

Imágenes de la pieza MEDALLA 1 donde se pueden apreciar las curvas de nivel generadas durante el proceso de producción.

MUESTRA 11

---



MODELO  
**REGADERA 2**

MATERIAL  
**CERAMICA**

PROCESO  
**IMPRESIÓN 3D POR INYECCIÓN. Z-PRINT**

---

PRECIO DE LA PIEZA  
9,15 €

GROSOR MÍNIMO DE LAS PAREDES  
Entre 3 mm. y 6 mm.

TAMAÑO MÁXIMO  
340 mm. x 240 mm. x 200 mm.

TEMPERATURA DE ESTABILIDAD  
600 °C.

RESOLUCIÓN  
100 µm. (0.1 mm.).

EXACTITUD  
+ - 3% (el proceso de esmaltado añade 0,1 mm.).

HOLGURA / SEPARACIÓN ENTRE PARTES  
4 mm.

ENGRANAJES Y PIEZAS ENCAPSULADAS  
No.

La pieza muestra 11 está impresa con polvo de cerámica de alúmina y sellados con porcelana y sílice. Una vez impreso el objeto se termina con un esmalte brillante libre de plomo y no tóxico. Es un material reciclable y apto para ser utilizado en alimentación, lo que hace que sea perfecto para elementos de decoración o vajilla.

La tecnología empleada para fabricar esta pieza es el método de impresión 3D por inyección de tinta (ZCORP). Una vez que la pieza se ha impreso esta se pone en un horno para secar sin extraerla de la bandeja de impresión. Una vez seco el modelo, se extrae de la bandeja y se retira el material sobrante, para poner la pieza a cocer en un horno.

Después de la primera cocción se aplica una capa de porcelana y sílice para sellar la pieza y se vuelve a cocer por segunda vez. Finalmente se aplica el esmalte y se cuece por tercera y última vez.

Como en cualquier proceso de esmaltado la base de la pieza queda sin esmaltar al ser el área donde se apoya la pieza durante todo el proceso.



FIGURA 36

Imágenes de la pieza MUESTRA 11 impresa mediante el sistema Multijet Printing.

Para este proceso no se ha podido imprimir el modelo REGADERA 1 debido al grosor de las paredes.

El programa de preprocesamiento marcaba toda la parte superior de la regadera en un color amarillo, lo que significaba que era un área de dudoso resultado (Figura 37) por lo que se optó por usar el modelo REGADERA 2, cuyas paredes tenían mayor grosor. La pieza se pudo imprimir sin mayor problema.

En este sistema es mucho mejor producir piezas más gruesas que piezas finas, sobre todo, porque tiene un proceso de manipulación muy largo y es durante ese proceso donde la pieza es más vulnerable. Al ser, además, un material que va cogiendo resistencia según se van aplicando los pasos de la producción (secado, primera cocción, segunda cocción y esmaltado) las primeras fases son críticas y una pieza con grosores mayores, aunque no dan ninguna garantía, es menos probable que se rompa.

Respecto a la resolución en sí esta es equivalente, inicialmente a la que tienen el resto



FIGURA 37

Imagen obtenida del programa de preprocesamiento donde marca en color amarillo el área crítica.



FIGURA 38

Imagen de la base de la pieza Muestra 11, donde se puede apreciar que no ha sido esmaltada.

de los materiales trabajados mediante impresión 3D por inyección de tinta. Si bien el resultado final no tiene esa calidad, ya que se ha aplicado primero una capa para sellar la pieza y después un esmalte que añade prácticamente un grosor extra de 1,5 mm.

Aunque a nivel de resolución y detalle no es una pieza que asombre por los detalles, si hay que decir que el resultado general es una pieza muy cálida que parece hecha con sistemas de producción tradicionales. El mismo factor que hace que pierda resolución es lo que otorga a la muestra 11 de una fragilidad, entendida desde el punto de vista más conceptual, que la aleja de los acabados y texturas del resto de los procesos y materiales.

Sería interesante ver un relieve producido mediante este material y analizar qué profundidad sería la necesaria para que el proceso registrara el relieve y el resultado fuera estética y técnicamente correcto.

MUESTRA 12

---



MODELO

**REGADERA 1**

MATERIAL

**VisiJet M3 PROPLAST**

PROCESO

**MULTIJET PRINTING**

**Inyección de fotopolímeros**

---

PRECIO DE LA PIEZA

41,08 €

RESOLUCIÓN

16µm / 0,016 mm.

GROSOR MÍNIMO DE LAS PAREDES

0,8 mm.

FLEXIBILIDAD

No.

TAMAÑO MÁXIMO

284 mm. x 184 mm. x 203 mm.

EXACTITUD

+ - 0,1 mm.

TEMPERATURA DE ESTABILIDAD

46°C.

HOLGURA / SEPARACIÓN ENTRE PARTES

0,5 mm.

PUNTO DE FUSIÓN

N/A.

ENGRANAJES Y PIEZAS ENCAPSULADAS

Sí.

La muestra número 12 ha sido impresa mediante el procedimiento Multijet Printing.

El resultado es una pieza muy ligera, de un tacto muy suave y color blanco translúcido (muy cercano al transparente) con un nivel de detalle muy alto.

En la zona de la base donde se une el asa al cuerpo de la regadera, la resina adquiere un color amarillento. En principio es un error de impresión, previsiblemente derivado de la utilización de una resina en mal estado. A veces los cambios de color y textura pueden deberse al uso de estructuras de soporte que estos procesos necesitan crear para fabricar según que piezas. Dichas estructuras son fabricadas con un material distinto y pueden contaminar en alguna situación la resina, y a la hora de ser retiradas pueden dejar marcas en la zona de la pieza con la que estaban en contacto.



FIGURA 39

Detalle de la base de la regadera donde se puede apreciar el cambio de color.



FIGURA 40

Imágenes de la pieza MUESTRA 12 impresa mediante el sistema Multijet Printing.

MUESTRA 13

---



MODELO

**REGADERA 1**

MATERIAL

**VISIJET CRYSTAL**

PROCESO

**MULTIJET PRINTING.**

**Inyección de fotopolímeros**

---

PRECIO DE LA PIEZA

41,74 €

RESOLUCIÓN

16 µm. / 0,016 mm.

GROSOR MÍNIMO DE LAS PAREDES

0,8 mm.

FLEXIBILIDAD

No.

TAMAÑO MÁXIMO

284 mm. x 184 mm. x 203 mm.

EXACTITUD

+ - 0,1 mm.

TEMPERATURA DE ESTABILIDAD

56°C.

HOLGURA / SEPARACIÓN ENTRE PARTES

0,5 mm.

PUNTO DE FUSIÓN

N/A.

ENGRANAJES Y PIEZAS ENCAPSULADAS

Sí.

Esta muestra se ha impreso, al igual que la número 12 mediante el proceso Multijet printing, pero en otro material, en este caso una resina fotosensible, de acabado translúcido.

El resultado es igual de bueno a nivel de detalle y resolución, pero mucho más homogéneo en lo que a color se refiere.

El material Visijet Crystal es una resina biocompatible y calcinable que no deja ningún residuo durante el proceso de fundición pudiendo ser utilizada para procedimientos de microfundición sustituyendo las clásicas ceras de joyería. Da muy buen resultado en fundición a temperaturas de entre 800 °C y 850 °C durante 2 horas.



FIGURA 41

Imágenes de la pieza MUESTRA 13 impresa mediante el sistema Multijet Printing.

Además de las dos muestras del modelo REGADERA 1 producidas con el proceso multijet, también se ha producido el modelo MEDALLA1 en diversos materiales mediante el mismo proceso.

Por un lado en la misma resina translúcida en la que se ha impreso la muestra 13 y, por otro en cera de fundición. El proceso Multijet Printing permite imprimir directamente en cera, lo que unido a su gran calidad de detalle hace de esta técnica un método idóneo para el trabajo de piezas de joyería que requieren de un gran nivel de detalle. La Figura 44 es resultado de fundir la Figura 43 en bronce.

A parte de las ceras específicas para fundición, el sistema Multijet, así como el Polijet, como veremos en la siguiente muestra, cuenta con una gama de productos que sin ser ceras se pueden utilizar para fundir ya que son resinas calcinables.



FIGURA 42

---

Medalla impresa en resina Visijet Crystal.



FIGURA 43

---

Medalla impresa en cera de fundición.



FIGURA 44

---

Pieza en bronce obtenida al fundir la medalla impresa mediante el sistema Multijet Printing en cera.

## MUESTRA 14



MODELO  
**REGADERA 1**

MATERIAL  
**VEROWHITE**

PROCESO  
**POLYJET**  
**Inyección de fotopolímeros**

PRECIO DE LA PIEZA  
34,47 €

GROSOR MÍNIMO DE LAS PAREDES  
1 mm.

TAMAÑO MÁXIMO  
250 mm. x 250 mm. x 200 mm.

TEMPERATURA DE ESTABILIDAD  
43,6 °C.

RESOLUCIÓN  
16  $\mu$ m. / 0,016 mm.

FLEXIBILIDAD  
Media.

EXACTITUD  
+ - 0,1 mm.

HOLGURA / SEPARACIÓN ENTRE PARTES  
2 mm.

ENGRANAJES Y PIEZAS ENCAPSULADAS  
Sí.

El resultado al imprimir la muestra número 14 con el proceso Polyjet es realmente bueno, dando una calidad de detalle prácticamente igual que la conseguida mediante el sistema Multijet.

En esta ocasión, el acabado del material es blanco opaco, con un acabado mate muy suave. Todos los detalles del modelo tridimensional están registrados en la pieza impresa mediante este procedimiento. Además cabe destacar que el precio es casi un 25 % más barato que las piezas impresas mediante el sistema Multijet.

También se ha producido una pieza en este material del modelo Medalla 1, con un acabado y nivel de detalle muy próximo al obtenido mediante el proceso Multijet Printing.



FIGURA 45

Modelo MEDALLA 1 impreso mediante el sistema Polyjet.

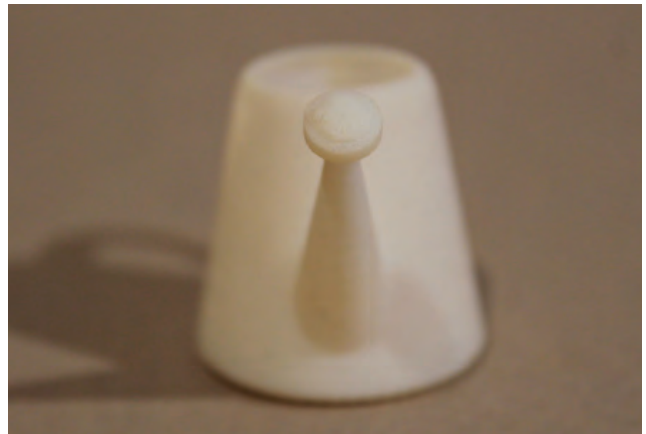


FIGURA 46

Imágenes de la pieza MUESTRA 14 impresa mediante el sistema Polyjet Printing.

## MUESTRA 15



MODELO  
**REGADERA 1**

MATERIAL  
**VeroClear-RGD810**

PROCESO  
**POLYJET**  
**Inyección de fotopolímeros**

PRECIO DE LA PIEZA  
34,47 €

RESOLUCIÓN  
16  $\mu\text{m}$ . / 0,016 mm.

GROSOR MÍNIMO DE LAS PAREDES  
1 mm.

EXACTITUD  
+ - 0,1 mm.

TAMAÑO MÁXIMO  
250 mm. x 250 mm. x 200 mm.

HOLGURA / SEPARACIÓN ENTRE PARTES  
2 mm.

TEMPERATURA DE ESTABILIDAD  
48 °C.

ENGRANAJES Y PIEZAS ENCAPSULADAS  
Sí.

PUNTO DE FUSIÓN  
Aguanta sin alterarse hasta 48 °C.  
Ha sido fundido a 850 °C durante 2 horas sin  
dejar restos y con un acabado muy bueno.

La muestra 15 ha sido producida mediante el mismo sistema que la muestra 14 pero en un material de acabado transparente. En este caso primero se imprimió la medalla (Figura 49) para hacer pruebas de fundición y el resultado, tanto en la pieza producida en resina, como en la fundida en metal es una pieza con muy buena resolución.

Al producir la muestra 15 el resultado inicial no fue todo lo satisfactorio que cabría esperar dado el buen resultado que dio la medalla.

El acabado en el plano ZX es muy suave y transparente, pero en los planos XY y ZY el acabado es rugoso, se marcan mucho las capas de resina y se puede apreciar al tacto el efecto de dientes de sierra. La pieza se puede pulir muy fácilmente con lija fina consiguiendo un acabado transparente muy cercano al cristal. Aunque la impresión da muy buen nivel de detalle, al ser un acabado rugoso, necesita de un pequeño trabajo de pulido que hace que ese nivel de detalle se pierda.

#### FUNDICIÓN DIRECTA

Como ya se ha comentado, la medalla impresa en este material y procedimiento ha sido utilizada para hacer piezas en metales preciosos como oro o plata mediante métodos de microfundición.

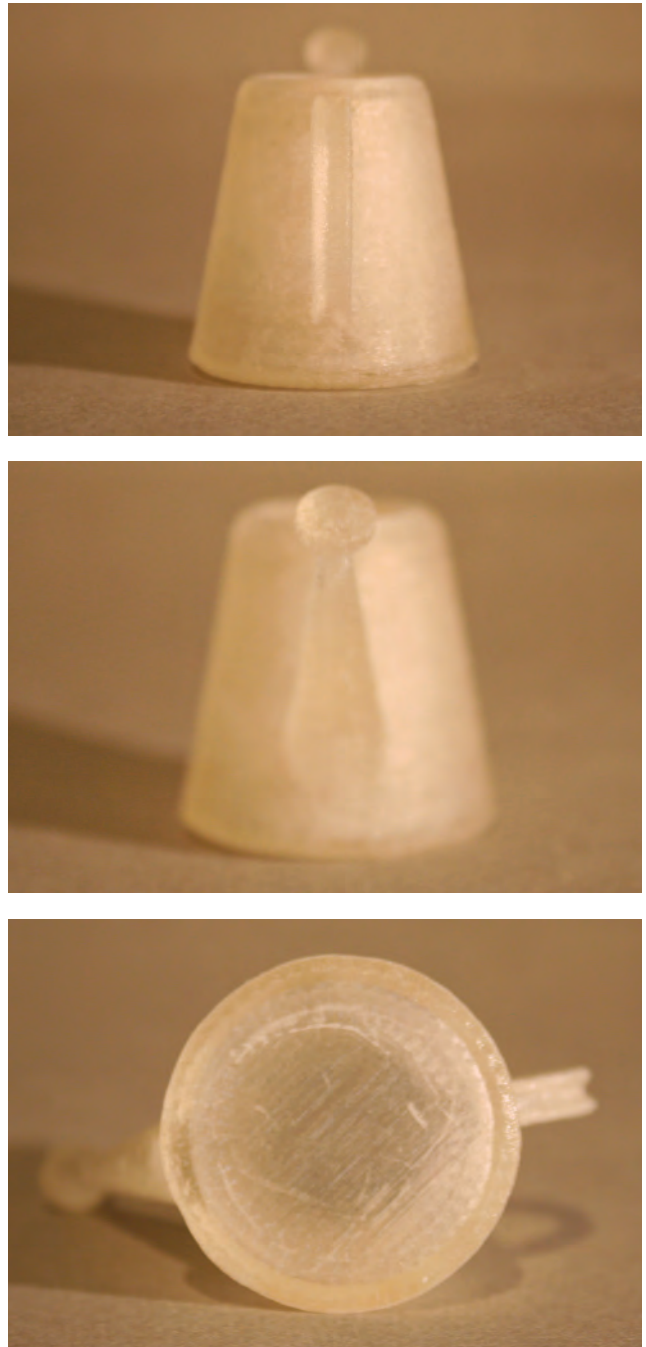


FIGURA 47

Imágenes de la pieza MUESTRA 15 impresa mediante el sistema Polyjet Printing en resina transparente.

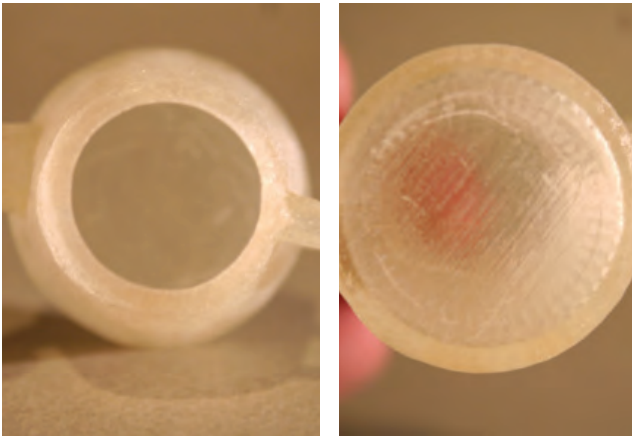


FIGURA 48

La base de la regedera, la resina depositada sobre el plano XY, da como resultado un acabado prácticamente transparente.



FIGURA 49

Medalla impresa mediante resina transparente VeroClear RGD-810.

Dadas las características de la resina, esta ha resultado ser una resina calcinable que no deja restos al ser fundida a cierta temperatura durante un tiempo concreto. En este caso las piezas se han fundido a una temperatura de 850°C durante un tiempo continuo de dos horas dejando mejores resultados que resinas diseñadas específicamente para procesos de joyería.

Esto es debido a que las resinas diseñadas para estos procesos requieren de temperaturas superiores a los 950°C con tiempos de entre 3 y 4 horas mientras que el proceso de microfusión utilizado con la resina VeroClear se corresponde con los tiempos y temperaturas utilizados con ceras y procesos de joyería tradicionales. Esto implica que estas piezas pueden introducirse en el horno con piezas realizadas en otros materiales como ceras de joyería sin necesidad de establecer parámetros específicos que, además, incrementarían el consumo de energía y por lo tanto el coste final de la pieza.

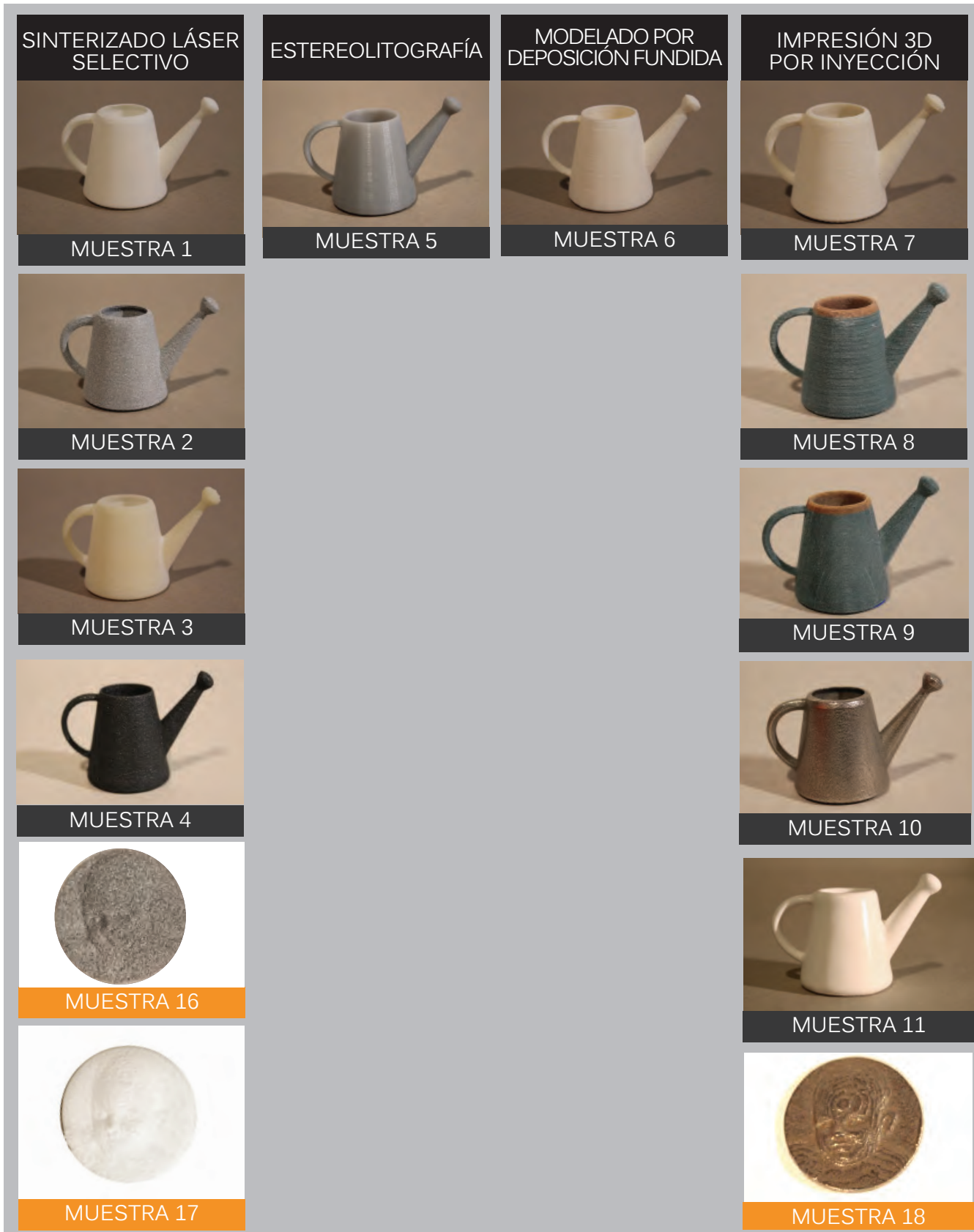


FIGURA 50

Tabla de muestras.

## INYECCIÓN DE FOTOPOLÍMEROS

MULTIJET



MUESTRA 12

POLYJET



MUESTRA 14



MUESTRA 13



MUESTRA 15



MUESTRA 19



MUESTRA 22



MUESTRA 20



MUESTRA 21

### 6.5. CONCLUSIONES

Tras producir 22 muestras para el estudio de materiales y procesos (en el siguiente capítulo se muestran más piezas impresas pero corresponden a otra parte de la investigación), se puede observar que todos los procesos tienen una capacidad bastante aceptable para reproducir modelos tridimensionales.

Analizando diferentes factores se pueden obtener diversas conclusiones. A nivel de calidad de resolución los procesos más aconsejables son los sistemas de Multijet y Polyjet Printing. Son, además, los procesos que se han enfocado mucho a la producción de piezas para joyería, desarrollando diferentes tipos de ceras con distintos niveles de dureza. Sin embargo, hemos visto que influye mucho el material utilizado para obtener esta calidad y que la pieza no necesite repasos posteriores (como la muestra 12).

El sistema que da peor nivel de resolución es el Modelado por Deposición Fundida, pero era lo que cabría esperar por la propia naturaleza del proceso, que se basa en extruir el material a través de un cabezal para dar la forma deseada al filamento. El sinterizado láser selectivo, así como el de impresión 3D por inyección de tinta (Z-CORP) son procedimientos que dan un nivel de calidad muy próximo y bastante bueno.

Dentro del procedimiento de impresión 3D por inyección, el material con el que menos calidad se obtiene es con el material cerámico, pero esto no está relacionado directamente con el proceso de impresión 3D en sí mismo, sino que más bien con los procesos de postproducción necesarios para trabajar con este material (recordemos que es necesario introducir la pieza en el horno hasta en 3 ocasiones diferentes).

También es el material que menos detalle da y el que necesita unos grosores mayores para asegurar la producción de la pieza. El sistema en sí da una calidad aceptable pero la naturaleza del material limita el resultado final. Aun así, el resultado que se consigue es bastante interesante, siendo el proceso que menos registra el proceso tecnológico mediante el que se ha producido, en parte por toda la manipulación posterior que sufren las piezas.

La estereolitografía es el sistema que menos análisis ha tenido, debido a que es el procedimiento más caro del mercado. El resultado es bastante deficiente, para ser el procedimiento referencia en sistemas de prototipado. Es probable que trabajando con un técnico distinto, el procedimiento pueda dar mejor resultado. A pesar de todo, viendo la comparativa de precios no resulta ser un procedimiento competitivo, a nivel de resolución tanto el Multijet



FIGURA 51

Modelo "ASTRONAUTA" en tres materiales diferentes. A la derecha en resina transparente impresa mediante sistema Polyjet, en el centro en cera para microfundición, realizada por el mismo sistema, y a la izquierda el resultado de fundir la pieza central en bronce.

como el Polyjet son sistemas que consiguen una resolución extraordinaria y en lo que a gama de materiales estos sistemas no tienen nada que envidiar a la gama disponible para procesos estereolitográficos.

Podría decirse que el procedimiento estereolitográfico no ofrece ninguna ventaja significativa desde el punto de vista creativo, habría que ver si, quizá a nivel de producción industrial, tiene alguna ventaja que no estamos analizando como puede ser el coste de producción a gran escala o la velocidad de producción, pero las necesidades plásticas y técnicas que pueden ser valoradas por un artista ya están resueltas (y mejor) mediante los sistemas de producción tridimensionales por inyección de fotopolímeros.

En cuanto a tamaño de producción es limitado, siendo el tamaño aproximado para todos los procesos de unos 300 mm. x 250 mm. x 200 mm. Hay materiales que permiten perfectamente ser ensamblados con resinas o adhesivos de distinto tipo. Y se puede encontrar la forma de fabricar nuestra pieza en el material y procedimiento deseado para después ensamblarla si esta supera el tamaño de impresión máximo. Para el sistema de Modelado por Deposición Fundida existen máquinas que permiten la producción en grandes dimensiones (como la BigRep One vista en el capítulo anterior) y cabe imaginar que para

el resto de los procesos irán saliendo al mercado con máquinas que permitan producciones de mayor tamaño.

Como conclusión general podríamos decir que hay una amplia gama de materiales y procedimientos disponibles en el mercado con aplicaciones para la creación escultórica. En la actualidad, están muy enfocadas a la producción escultórica de pequeño formato y joyería, tanto por el tamaño máximo de impresión como por el precio y coste de producción.

Es un mercado en pleno desarrollo y la posibilidad de obtener una pieza mediante cualquiera de estos procedimientos no se limita únicamente a la capacidad técnica de las máquinas, también influye la capacidad y conocimientos del técnico que ejecuta la producción. Por eso es imprescindible que el artista que vaya a trabajar con estos procedimientos conozca todas las características de los materiales y de los propios procesos para saber hasta donde puede llegar desde el punto de vista técnico con cada uno de ellos .



# 7. EL RELIEVE: DE LA IMAGEN 2D AL MODELO 3D

## 7.1. BUMP MAPPING Y DISPLACEMENT MAPPING

Cuando se habla de modelado 3D lo primero que nos viene a la mente son esas imágenes de figuras tridimensionales de bulto redondo, como personajes de películas de animación o esculturas clásicas, pero los relieves también tienen su espacio y peculiaridades en el mundo del modelado tridimensional.

Al percibir una imagen tridimensional como una imagen realista, debemos tener en cuenta que esto no se debe únicamente a un modelo ejecutado a la perfección, sino que en gran medida se debe a la iluminación y a las texturas del elemento 3D.

Muchas superficies del mundo real no tienen simplemente un color, sino que habitualmente tienen texturas o patrones, algunos incluso tienen pequeñas imperfecciones y rugosidades que configuran objetos mucho más ricos y complejos a nivel visual. El mapeado de texturas se utiliza para imitar estas superficies y hacer que los objetos modelados virtualmente resulten más realistas.

Un objeto tridimensional con una deficiente aplicación de la textura puede estar muy bien modelado pero con poco trabajo de finalización, lo que suele resultar en un mal objeto.

Si es cierto que para los procesos que nos atañen (los que tienen como objeto final la impresión del modelo) el mapeado de texturas no es especialmente relevante (de no ser por los procesos que permiten la impresión de estas texturas 3D). Hay un tipo de mapeado de objetos que sí es aplicable a los procesos que posteriormente resultarán en un objeto producido por los métodos de fabricación 3D: se trata del Mapeado por Desplazamiento o *displacement mapping*.

Los tipos de mapeado 3D pueden clasificarse de la siguiente manera:

1. Texture mapping
2. Bump mapping
3. Displacement mapping
4. Normal mapping
5. Vector displacement mapping

De todos ellos nos centraremos en los 3 primeros que son los que se aplican en este proyecto.

### 7.1.1. Texture mapping

El mapeado de texturas (*texture mapping*) nos permite aplicar a un simple polígono la apariencia de algo mucho más complejo simplemente añadiendo o aplicando una imagen bidimensional como si de una textura real se tratara.

Esto permite que elementos sencillos, objetos simples creados por una decena de polígonos, parezcan objetos mucho más complejos, dotándolos de un alto grado de realismo.

El texture mapping puede ir desde aplicar una textura basada en un color y en un comportamiento del material (por ejemplo, la refracción), hasta la aplicación de una imagen 2D (habitualmente un bitmap) que imita una textura existente en el mundo real.

Ed Catmull presentó este concepto en su tesis doctoral *A subdivision algorithm for computer display of curved surfaces*, de 1974 y posteriormente Blinn & Newell lo desarrollarían en su trabajo de 1976 *Texture and reflection in computer generated images*, de 1976. Ambos trabajos pueden resultar poco interesantes e incluso incomprensibles, pues están escritos en un lenguaje por el que se entiende que el mundo del modelado tridimensional estaba en su fase más primitiva, pero sin lugar a dudas sientan las bases del mapeado de texturas y del comportamiento de los diferentes materiales y acabados en el entorno tridimensional virtual.

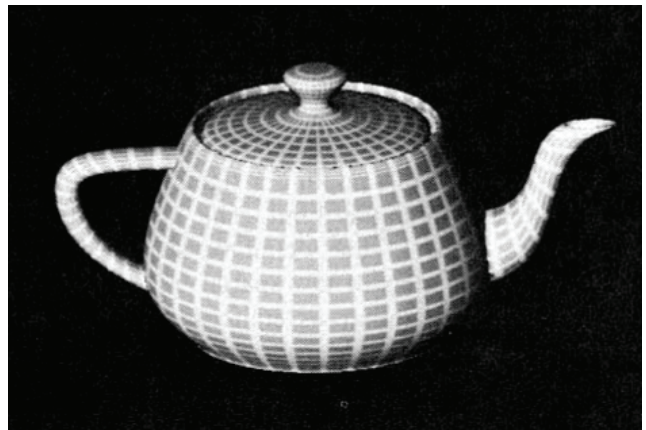
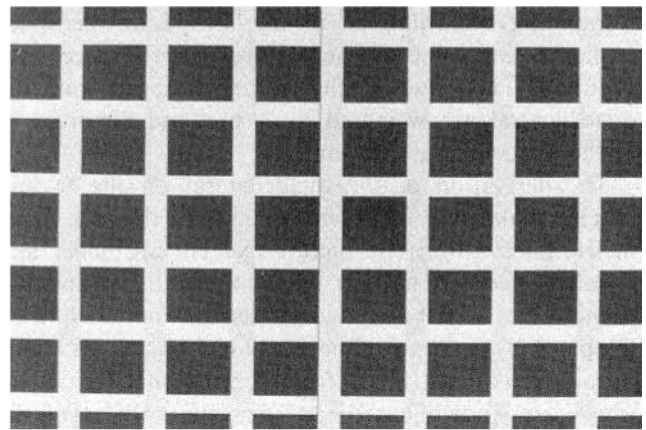


FIGURA 1

La imagen superior muestra una textura sencilla, un patrón, que es aplicado en el modelo tridimensional, tal como se muestra en la imagen inferior. Imágenes extraídas del trabajo de Blinn & Newell, de 1976.

### 7.1.2. Bump mapping

El bump mapping consiste en otorgar rugosidad a la superficie de un objeto sin modificar la posición de los polígonos de la superficie, trabajando lo que se conoce como “normales”. Esto se consigue aplicando una imagen o mapa que da volumen al modelo, simulando luces y sombras, pero se trata de una mera ilusión, la geometría no se ve alterada.

Cuando en el mundo real miramos una superficie rugosa, la forma que tiene nuestra mente para hacernos ver que esta superficie es así es fijándose en que el brillo, entendido como luminosidad, varía a lo largo y ancho de esta superficie. Nuestro cerebro es capaz de procesar esta información y nos hace entender que se trata de superficies con cierto abultamiento.

El bump mapping funciona básicamente como una textura de mapeado, pero en vez de contener una variación de colores contiene abultamientos.

El bump mapping consigue un efecto de textura muy preciso e impresionante sobre objetos que pueden estar compuestos únicamente por una decena de polígonos, dotando de gran detalle a estos objetos, los cuales, de no ser por el bump mapping requerirían estar compuestos por un número de polígonos mucho mayor.

### 7.1.3. Displacement mapping

En el caso del displacement mapping, el objetivo de su aplicación es otorgar rugosidad al modelo tridimensional modificando su geometría. A nivel visual el resultado sería exactamente el mismo que el resultado que nos da el bump mapping. A diferencia del primero, el displacement mapping sí modifica la geometría del modelo tridimensional, pues el mapa (imagen) que se aplica modifica la colocación de los polígonos en el espacio tridimensional virtual.

A nivel de complejidad del modelo tridimensional, esta opción crea mallas muchísimo más complejas de manejar y no es un mapeado apto para producciones audiovisuales ya que renderizar un objeto compuesto por muchos polígonos resulta ser un proceso más lento y además el peso del archivo se incrementaría. Sin embargo, esta solución es la adecuada para que una textura con volumen se pueda apreciar en una pieza producida por un método de prototipado 3D, dado que es la única que modifica la malla tridimensional (el mapa de textura también se puede “imprimir” según en que proceso de prototipado 3D pero no afecta en absoluto a la malla del modelo).

#### 7.1.4. Mapa de niveles: Imagen en escala de grises

Tanto el bump mapping como el displacement mapping funcionan mediante un método de niveles de altura. Para ello se utiliza una imagen en escala de grises, donde los diferentes tonos de gris representarán las alturas en un modelo 3D. En caso del bump mapping, el programa de modelado interpreta esta imagen modificando las normales del modelo, consiguiendo que parezca que la superficie se desplaza. Si se aplica esta imagen en escala de grises como displacement mapping lo que se consigue es modificar la posición de los vértices de la malla, cambiando por lo tanto su geometría y consiguiendo un relieve real.

Existen otros métodos como el normal mapping y el vector displacement maps que funcionan aplicando un mapa de normales. Para este tipo de mapas la imagen que se aplica en una imagen en RGB donde los vectores XYZ corresponden con los valores RGB de esa imagen, por lo que el resultado en el desplazamiento de las normales (en el caso del normal mapping) o de los vértices (en el vector displacement mapping) es más exacto. En otras palabras, en el displacement mapping los vértices se mueven de manera vertical, mientras que en el vector displacement mapping los vértices se colocan en unas

coordenadas XYZ exactas dadas por los valores RGB de la imagen.

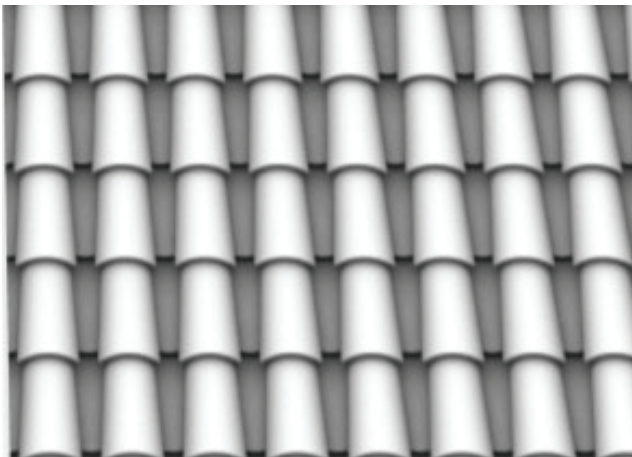
El normal mapping es ampliamente utilizado en el mundo de los videojuegos... «para generar mapas de relieve a partir de modelos tridimensionales CG muy densos, de manera que luego esa información pueda ser aplicada en una versión de mucha más baja resolución poligonal manteniendo un nivel de credibilidad impresionante» (Vila, 2008 p.2).

El vector displacement mapping, que es el que tendría aplicación para posteriormente poder ser producido en materia física, es de reciente creación y no es una herramienta habitual en los programas de modelado 3D.

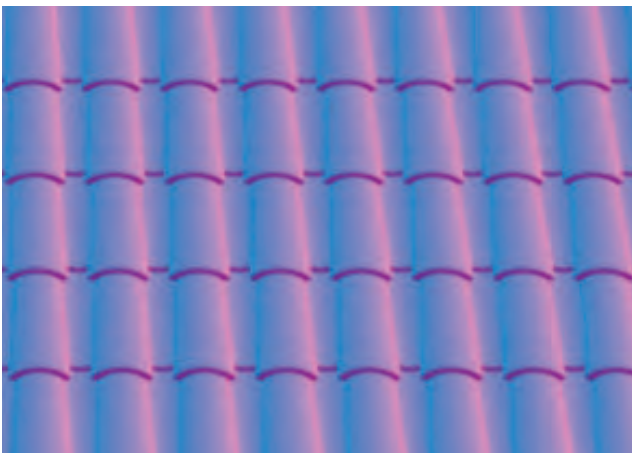
«Usando un vector displacement map podemos aportar un verdadero relieve mediante una imagen y además hacer que ese relieve crezca en las 3 dimensiones X, Y, Z. Esto proporciona unas posibilidades realmente espectaculares: podemos generar protuberancias en una superficie que serían completamente imposible obtener mediante un simple mapa de desplazamiento» (Vila, 2008 p.2).



Modelo tridimensional.



Mapa de niveles (bump mapping y displacement mapping).



Mapa de normales.

FIGURA 2

En la imagen superior, el modelo tridimensional. En la imagen de en medio, el mapa de niveles (escala de grises) obtenido de ese modelo, y en la imagen inferior, mapa de normales (RGB) obtenido del mismo modelo.

## 7.2. MODELADO DE RELIEVES Y MEDALLAS A PARTIR DE MAPAS DE DESPLAZAMIENTO

En lo que a modelado de bulto redondo se refiere, los sistemas de modelado están muy desarrollados y son ampliamente conocidos, pues son los sistemas mediante los que se crean la gran mayoría de los modelos tridimensionales. La aplicación de los métodos para aplicar texturas en relieve (bump mapping, displacement mapping) tienen aplicaciones fundamentalmente para desarrollos audiovisuales como videojuegos o animaciones tridimensionales.

Apreciando un vacío en el desarrollo de las texturas de relieve, consideré necesario desarrollar una metodología propia y lógica que fuera aplicable para el diseño y producción de relieves y medallas mediante los sistemas de prototipado. Hay programas de diseño 3D, como el **ZBrush**, que pretenden imitar el proceso creativo mediante el cual un escultor modela el barro, a través de las diferentes herramientas que tiene el programa se puede conseguir definir un relieve tridimensional, pero desde luego el proceso no tiene nada que ver con el proceso real y para conseguir un resultado con una calidad aceptable, no solo es necesario conocer la herramienta, sino que además hay que dedicar una infinidad de horas.

Investigando sobre el funcionamiento del sistema de displacement maps me resultó muy interesante el hecho de que una imagen en 2D pueda ser traducida en un volumen tridimensional aplicándola a través de un programa de modelado. Esta aplicación no solo existe en uno de los programas que he llegado a conocer a fondo durante el proceso de investigación de este trabajo, si no que es una herramienta que está presente en la gran mayoría de los programas de diseño y desarrollo 3D. Ahora bien, la complejidad en su aplicación, así como sus limitaciones, no son las mismas en unos programas o en otros, aunque de esto hablaremos más adelante.

La base del displacement mapping es que una imagen en escala de grises es aplicada sobre la superficie de un modelo tridimensional traduciendo los diferentes tonos de gris en diferentes alturas, aplicando el blanco y tonos más claros como los elementos más altos del relieve, y los grises más oscuros hasta llegar al negro, como los elementos más bajos.

Existe publicada mucha información sobre como funciona a nivel técnico este proceso y como se desarrolló, incluso de como extraer esta imagen a partir de un modelo tridimensional pero hay poca investigación plástica sobre como proceder a la hora de desarrollar un modelo tridimensionales a partir de una imagen en escala de grises. Es

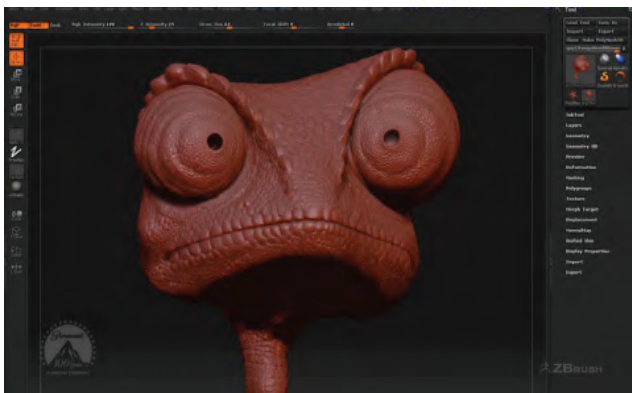


FIGURA 3

Z-Brush es un programa que permite el modelado de mallas con gran detalle, imitando el procedimiento de modelado con barro. El personaje principal de la película "RANGO" fue modelado en Z-Brush.

probable que esto se deba a que es un sistema que se utiliza fundamentalmente para aplicar texturas de relieve, como podría ser la veta de una madera o la textura de una roca, sobre un modelo ya desarrollado, y no para la creación de auténticos relieves en el concepto más puramente artístico.

Pero fundamentalmente la falta de información sobre como crear estas imágenes en escala de grises para aplicarlas posteriormente se debe a que estas imágenes, así como los mapas de normales (imágenes en RGB) no están pensados para diseñarse en un programa de creación de imágenes 2D, del estilo del Photoshop, sino que en realidad estas imágenes 2D se obtienen a partir de un modelo 3D. Para ser más precisos, cuando un artista 3D modela una figura que es muy compleja y pesada por el número de polígonos que tiene, puede obtener un mapa de normales (escala de grises) o un mapa de altura a partir de ese modelo, para después reducir el número de polígonos del modelo y posteriormente aplicar estos mapas como bump mapping, lo que hará que el modelo tenga mucha menos complejidad para ser procesado por los diferentes sistemas y, sin embargo, a nivel visual, una vez renderizada la imagen, no se apreciará pérdida de información ni de detalle. Es un sistema ampliamente aplicado en la creación de videojuegos y de películas, pero para nuestro

objetivo, que es la obtención de un modelo real a través de un sistema de prototipado, no es un sistema apropiado, ya que el modelo poligonal, el que será traducido por la máquina en un objeto material, no obtendrá todo ese detalle.

Conociendo ya los principios por los que se rige el displacement map, me resultó interesante el hecho de crear una imagen en escala de grises que posteriormente se convertiría en un relieve, y no en obtener esta imagen a partir de un modelo 3D ya existente.

Partiendo de esta base comencé con mis primeras investigaciones, que no solo se centraron en el desarrollo virtual de estos relieves, sino que también en su resultado una vez producida la pieza mediante un sistema de prototipado tridimensional. Me resultaban muy interesantes las posibilidades, aunque tenía mis reservas en cuanto a resultados plásticos ¿Serían capaces las tecnologías de prototipado de reproducir los relieves que yo creara con el suficiente detalle como para que se pueda apreciar o el resultado será un relieve tridimensional ininteligible?

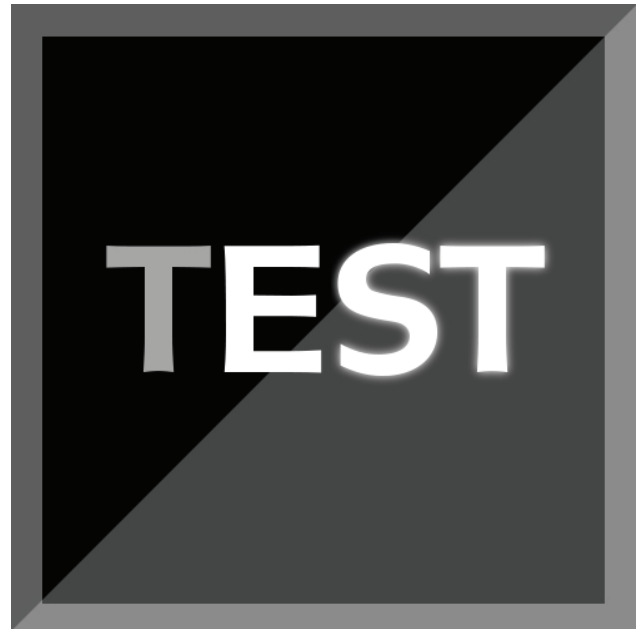


FIGURA 4

Mapa de altura (imagen en escala de grises).

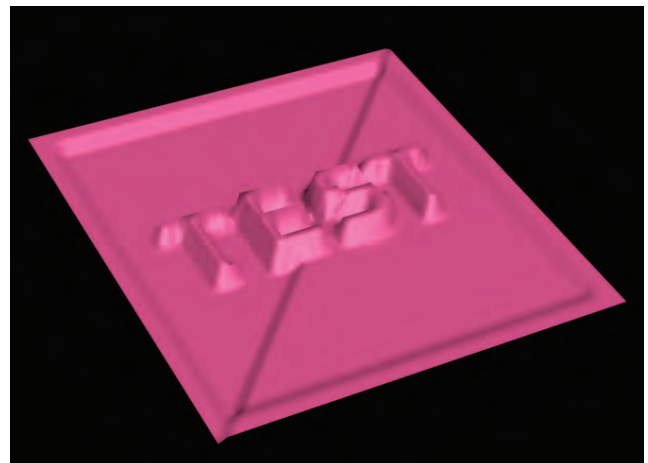
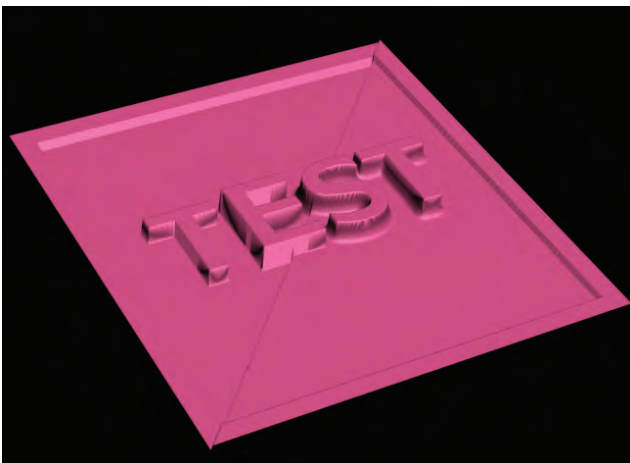
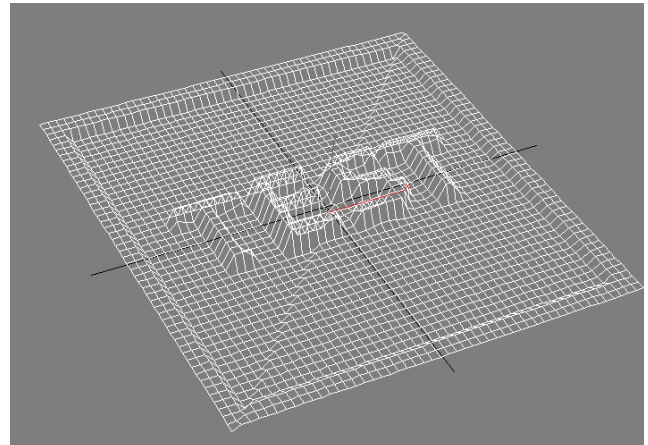
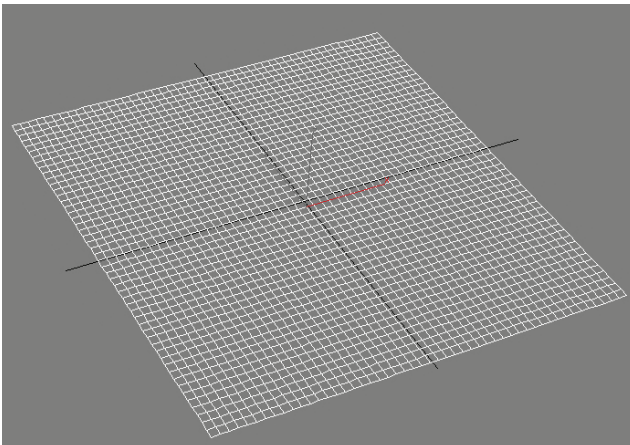


FIGURA 5

En la imagen superior: malla de modelo tridimensional sobre el que se ha aplicado un bump mapping.  
En la imagen inferior render de la misma malla.

Se puede apreciar que el modelo no está compuesto por más que unos pocos polígonos y, sin embargo, el render muestra una figura mucho más compleja.

FIGURA 6

En la imagen superior: malla de modelo tridimensional sobre el que se ha aplicado un displacement mapping.  
En la imagen inferior render de la misma malla.

Se puede apreciar que la malla del modelo superior, compuesta por el mismo número de polígonos que la Figura 5, está modificada. Sin embargo, el render tiene una calidad menor. En el displacement mapping la calidad del relieve es directamente proporcional al número de polígonos que componen la malla, mientras que en el bump mapping no tiene relevancia.

### 7.3 ACERCAMIENTO Y PRIMEROS PASOS

El primer desarrollo en el que, durante el desarrollo de este trabajo, se aplicó una imagen en escala de grises como displacement map, se basó en un retrato de un niño, partiendo de una fotografía. Al ser una aproximación, el objetivo era traducir los volúmenes del rostro aplicando tonos más claros a las zonas más altas (reservando el blanco para la parte más alta) y los más oscuros para lo que serían las zonas más bajas del relieve.

Se fueron desarrollando imágenes en escala de grises basadas en grupos de volúmenes independientes, por ejemplo la nariz o los ojos, y no como una única imagen. Estas imágenes se fueron aplicando cada una como un mapa de desplazamiento sobre el mapa de desplazamiento anterior, jugando con la profundidad que le aplicaría a cada una en el programa de modelado 3D, en este caso 3DStudio Max. Así cada vez que aplicaba una de las imágenes el mapa de desplazamiento variaba. Se desarrollaron imágenes para el volumen general de la cabeza y el cuello, la zona de los ojos, la nariz, los labios, la oreja, el pelo, la zona del pecho (camiseta) y alguna otra imagen aplicada al final para ajustar volúmenes. El resultado final es bastante bueno, si bien, el tiempo de desarrollo fue mucho (más de 9 semanas) así como el proceso de aplicar capa a capa los mapas de desplazamiento e ir



FIGURA 7

Resultados al aplicar sucesivamente las imágenes de la Figura 8.

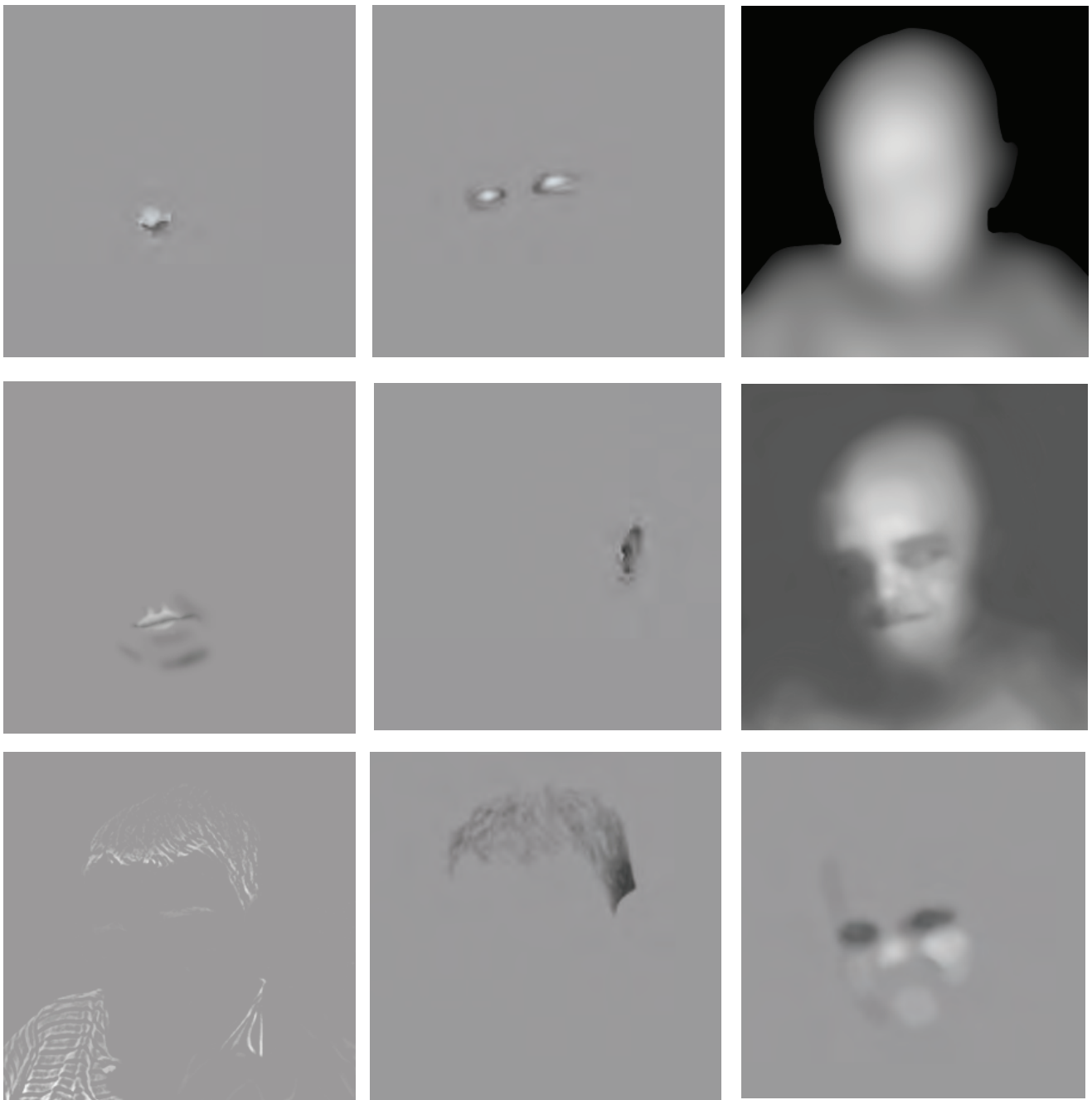


FIGURA 8

Algunas de las imágenes utilizadas para la creación de la pieza SAMUEL 1, primera aproximación al relieve mediante displacement mapping.

ajustando cada una no resulta un procedimiento cómodo, ágil ni inspirador .

Tras analizar los resultados y el procedimiento se planteó que, si bien el resultado es bastante interesante no lo es tanto la metodología, por lo que habría que encontrar un método o protocolo para la creación de estos relieves y sentar unas bases que permitan comprender y ejecutar relieves de una forma clara y concisa.

El objetivo concreto ha sido encontrar una metodología y protocolo claros de cómo traducir los diferentes niveles de los volúmenes de tal forma que se consiga un volumen coherente por partes, como se pudo conseguir con los diferentes volúmenes del relieve SAMUEL 1, pero también coherente en conjunto, donde los diferentes volúmenes generen una conversación lógica, armoniosa y con un resultado plástico de buena calidad.

#### 7.4 METODOLOGÍA: diseño del mapa de alturas



FIGURA 9

Imagen digital inicial del relieve, creada en un programa de procesamiento de imágenes donde se hace un estudio de los volúmenes que se pretenden trabajar.

(imagen en escala de grises).

Para el desarrollo del protocolo de creación de modelos de relieve 3D a partir de imágenes bidimensionales, es importante tener en cuenta el tipo de relieve que se desea crear: alto relieve, medio relieve o bajo relieve. Si bien no es imprescindible tener esto definido para empezar a trabajar la imagen, si es un elemento que nos ayudará a definir una de las primeras fases del desarrollo de la imagen que posteriormente aplicaremos como mapa de desplazamiento: el número de niveles.

La creación de la imagen que aplicaremos posteriormente sobre la malla tridimensional, será una imagen en escala de grises, donde el color blanco será el punto más alto del relieve y el negro el más bajo. Así, si se trata de un bajorrelieve no necesitaremos una amplia gama de grises, ya que básicamente con blanco y negro conseguiremos diseñar el mapa de desplazamiento. Para un altorrelieve, sin embargo, necesitaremos la mayor gama de grises, definiendo muy bien, si se trata de un relieve con diferentes niveles, a que altura proporcional queremos que se ubiquen unos planos respecto a los otros.

El relieve desarrollado está realizado aplicando

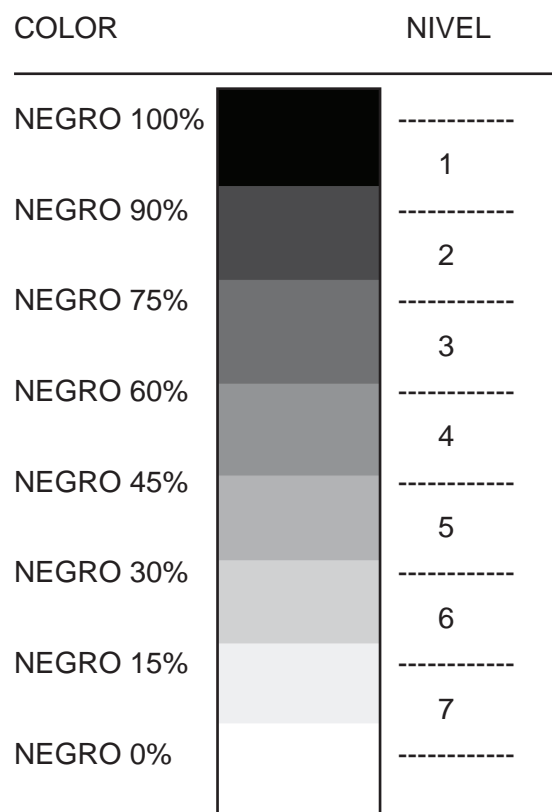


FIGURA 10

Escala de grises, blanco y negro expresados como porcentajes de negro, y niveles en los que se divide el relieve según esos porcentajes. Así, por ejemplo, el nivel número 6 se encuentra entre el negro al 30 % y el negro al 15 %.



FIGURA 11

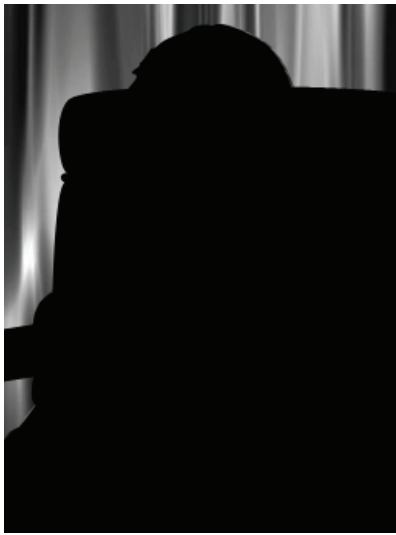
Imagen dividida por niveles según el color más oscuro que habrá en cada nivel.

una imagen en escala de grises sobre una malla tridimensional.

Lo primero que haremos será definir el número de niveles principales que tendrá nuestro relieve. Para el desarrollo de este relieve definimos un total de 7. Para cada uno de los niveles se creará una imagen que definirá los elementos cuya altura de relieve se encontrará entre la altura máxima del nivel anterior y la mínima del superior. Así, si el color blanco es el valor más alto y el negro el más bajo y se han definido 7 niveles básicos de relieve tendremos que generar 6 tonos de gris entre el blanco y el negro para definir y delimitar los 7 niveles de relieve (Figura 10).

Este es el punto más crítico para conseguir una jerarquía dentro de nuestro modelo ya que será lo que configure los volúmenes generales del mismo (Figura 11). A partir de aquí, lo importante es que cada nivel definido contenga su propia información de volumen donde el punto más bajo de ese nivel coincida en valores de color con el punto más alto del nivel inferior, y de la misma forma el color del punto más alto coincida con el color del punto más bajo del nivel siguiente.

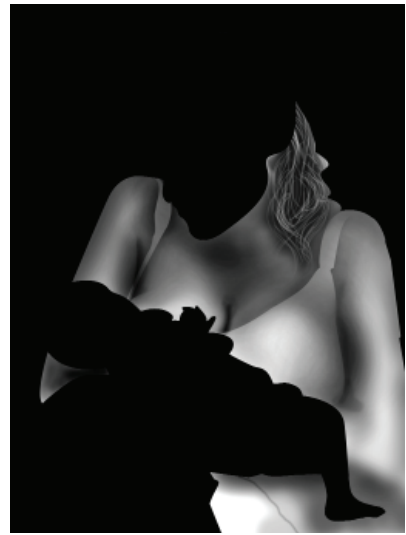
Para conseguir que esto ocurra y se ajuste a las necesidades para mantener la jerarquía establecida, el punto siguiente será dibujar el relieve limitándonos a blancos y negros, dibujando



NIVEL 1



NIVEL 2



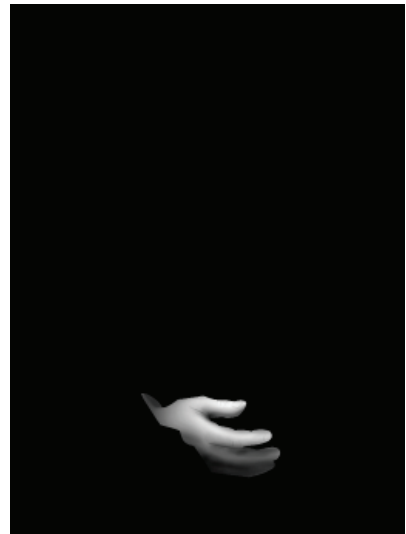
NIVEL 3



NIVEL 4



NIVEL 5



NIVEL 6



NIVEL 7

FIGURA 12

División de la imagen en 7 niveles de profundidad.

La imagen NIVEL 1 corresponde a la parte más baja del relieve, en este caso el fondo; y la imagen NIVEL 7 corresponde a la parte más alta del relieve, las rodillas y piernas.

cada uno de los elementos según hemos delimitado en nuestra división inicial por niveles (Figura 9). Los volúmenes que, conceptualmente hablando, se solapan, es conveniente tenerlos en consideración a la hora de hacer el trabajo en escala de grises inicial. No tenemos que mantener el principio global de que lo más profundo será más oscuro (en este caso el fondo) y que lo más claro será lo que está más cerca (la rodilla de la mujer), sino que debemos tener este concepto aplicado a los diferentes elementos que hemos jerarquizado por niveles. Así, por ejemplo, en la Figura 13, se puede apreciar que la mano del bebé es gris oscuro prácticamente negro y el pecho, donde apoya la mano se acerca al blanco. Esto es porque la mano del bebé se encuentra en un nivel de jerarquía superior al del pecho (Figura 14) y ambos elementos se encuentran en lo que denominaremos como horizonte y en la imagen final (Figura 15) se apreciarán como muy próximas en cuanto a color.

Una vez realizada esta aproximación inicial debemos conseguir que cada nivel se describa dentro de los parámetros de color definidos para este, es decir, si la escala de color la hemos definido con los 8 colores; negro 100 %, negro 90 %, negro 75 %, negro 60 %, negro 45 %, negro 30 %, negro 15 % y negro 0 % (blanco), para el nivel inferior: el nivel 1, la imagen en color tendrá que describirse dentro del rango definido por el

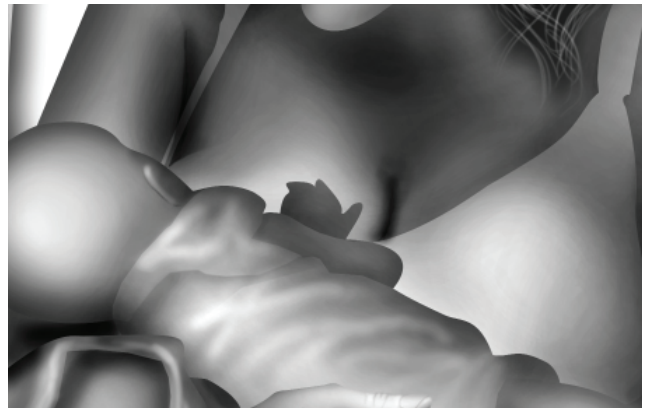


FIGURA 13



FIGURA 14



FIGURA 15

tono negro 100 % ,como color que define el punto más bajo, y negro 90 %, como el color que define el punto más alto de ese nivel. Así los rangos de color para cada nivel deberán describirse dentro de los colores tal como se describe en la Figura 10.

Para ello, utilizaremos la imagen completa del relieve en blanco y negro (Figura 9) y la redefiniremos utilizando únicamente los valores que se establecen para cada uno de los niveles tal como muestra la Figura 17. Después superpondremos las diferentes capas por orden y aplicaremos unas máscaras de recorte que dejarán visible, en cada nivel, el área correspondiente (Figura 18). Es importante que estas máscaras de recorte no se limiten solo al área que corresponde al nivel, sino que integren las capas superiores en aquellas zonas que sean comunes. Este punto es importante para trabajar más adelante la integración de las capas o niveles entre sí, ya que si aplicáramos esta imagen como mapa de desplazamiento en este estado, sí conseguiríamos volúmenes en diferentes niveles pero no un único volumen con distintos niveles.



FIGURA 16

Imagen obtenida al superponer los niveles o capas del relieve con máscara que se muestran en la Figura 18.

Para la integración de las diferentes capas o



NIVEL 1



NIVEL 2



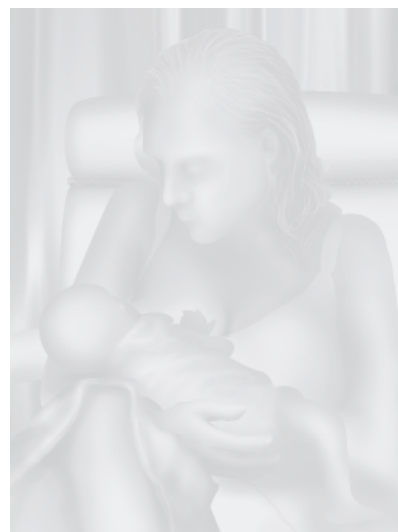
NIVEL 3



NIVEL 4



NIVEL 5



NIVEL 6



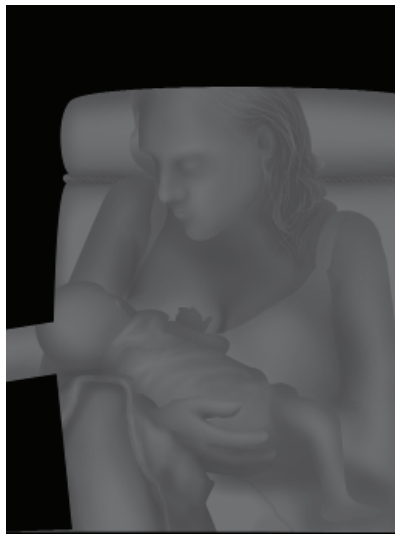
NIVEL 7

FIGURA 17

Imagen configurada en las diferentes escalas de grises que marcan cada uno de los niveles. Así el NIVEL 1 tiene como color más oscuro el negro 100 %, y como más claro un gris que corresponde a un negro al 90 %; y el NIVEL 2 tiene como color más oscuro el mismo gris al 90 % y como color más claro un gris al 75 %.



NIVEL 1



NIVEL 2



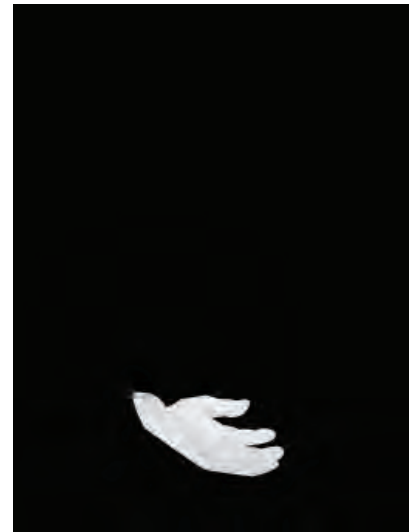
NIVEL 3



NIVEL 4



NIVEL 5



NIVEL 6



NIVEL 7

FIGURA 18

A cada una de las imágenes configuradas en las diferentes escalas de grises que marcan los niveles, se les ha aplicado la máscara correspondiente a su nivel.

Así, por ejemplo, la imagen cuya escala de grises correspondiera al nivel 7, el más alto y por lo tanto el que tendría la escala más clara, se le aplica la máscara que afecta solo a la zona correspondiente a este nivel de altura: las piernas y rodillas.



NIVEL 1



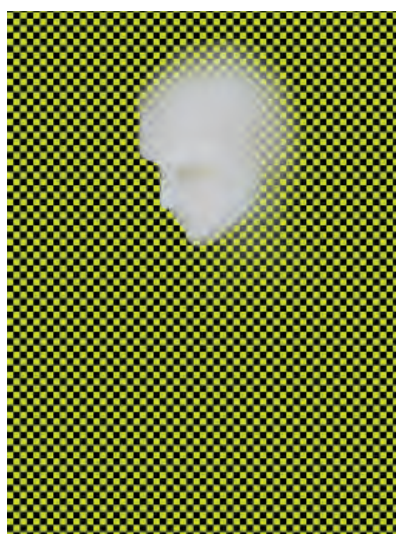
NIVEL 2



NIVEL 3



NIVEL 4



NIVEL 5



NIVEL 6



NIVEL 7

FIGURA 19

Resultado de cada una de las capas, correspondientes a cada uno de los niveles, al trabajar la integración para modular la transición de un nivel a otro. Se ha dejado una retícula negra y verde para que se puedan apreciar las distintas transparencias.

niveles es necesario trabajar las áreas delimitadas por las máscaras, los bordes, aplicando transparencias y degradados dependiendo del grado de integración que deseemos. Así puede ser importante que haya áreas en las que el cambio del volumen esté muy pronunciado (barbilla sobre el pecho) y otras en las que este cambio debe ser progresivo (unión cuello y cráneo).

Una vez definidas las diferentes gradaciones de capas y realizadas las integraciones consideradas, en principio, la imagen estaría lista para ser aplicada como mapa de desplazamiento (Figura 21).

Es muy complicado saber exactamente como se va a comportar la malla tridimensional al aplicar la imagen sin anteriormente hacer pruebas, por lo que es conveniente hacer varios ajustes hasta conseguir la imagen perfecta. Los cambios de nivel muy marcados nos darán saltos muy acusados y aunque nuestra intención sea que se marquen estos saltos siempre es aconsejable difuminarlos para evitar comportamientos indeseados en la malla al aplicar el desplazamiento.

Tras hacer ajustes y pruebas, la imagen en escala

de grises resultante será una imagen bastante difuminada, donde no se verán muy definidos los diferentes niveles, pero con gradaciones suficientes como para que el resultado final sea exactamente lo que deseamos. Al hacer las gradaciones de capa es posible que nos resulte necesario aplicar capas de ajuste para elevar algunas áreas o bajar otras oscureciéndolas. En el caso de este relieve se puede apreciar, en la Figura 22, como el área del pecho y el brazo derecho han sido subidos de luminosidad para dar mayor volumen a esa zona.

Una vez tenemos la imagen definitiva (Figura 22) la aplicaremos en el programa de modelado tridimensional donde todavía podremos hacer algunos ajustes que pueden influir sobre el resultado final de una manera determinante, como puede ser el nivel de profundidad, lo que hace que de una misma imagen se puedan obtener resultados muy diversos.

## 7.5 FORMATO Y RESOLUCIÓN DE LA IMAGEN



FIGURA 20

En la imagen se puede apreciar cierto nivel de integración en el Nivel 5, correspondiente al área de la cabeza.



FIGURA 21

Imagen resultado de la integración de las capas de la Figura 20.



FIGURA 22

Imagen final.



FIGURA 23

Displacement al aplicar la imagen a 250 ppp.



FIGURA 24

Displacement al aplicar la imagen a 500 ppp.

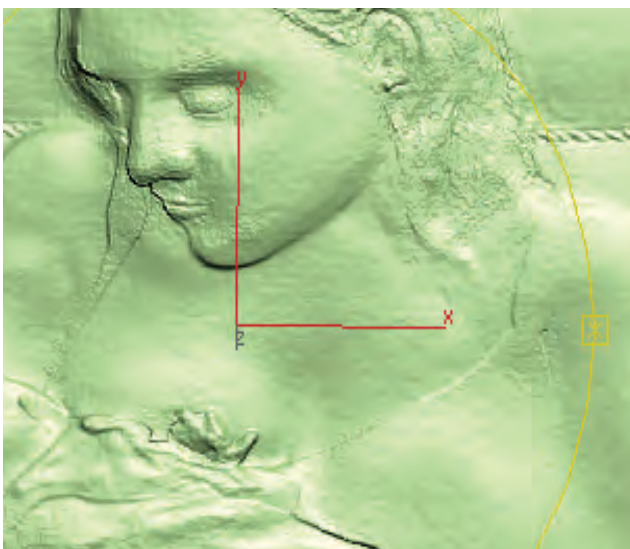
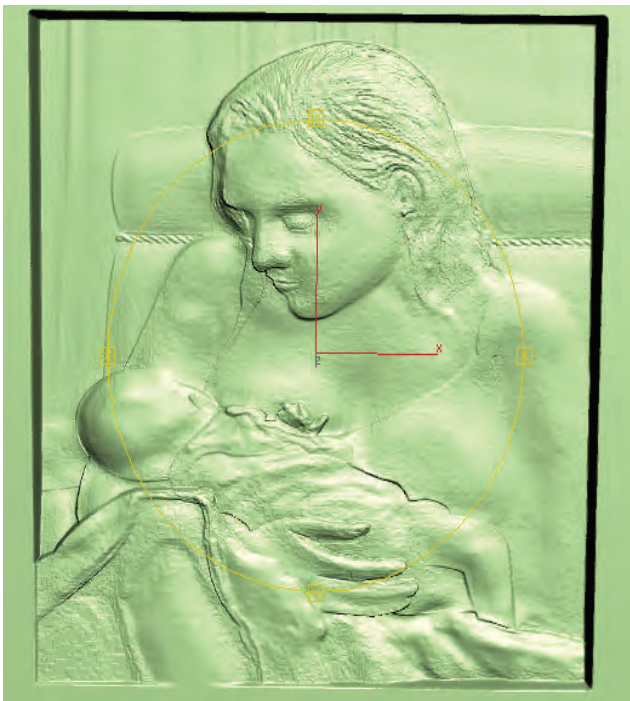


FIGURA 25

Displacement al aplicar la imagen a 800 ppp.

La resolución de la imagen juega un papel fundamental en el resultado final de la pieza como cabría esperar. La resolución mínima necesaria es de 250 píxel por pulgada, así, un relieve de 6 cm. x 6 cm. tendrá que tener un tamaño mínimo en píxeles de 591 cm. x 591 cm. La resolución ideal, que nos permitirá que el relieve tenga detalle suficiente será de unos 500 ppp., así, si deseamos crear la misma pieza de 6 x 6 en una resolución de 500 ppp., el tamaño total en píxeles de la pieza será de 1181 x 1181 píxeles. Como resolución superior para dar un gran nivel de detalle a la pieza utilizaríamos una resolución de 800 ppp. que nos daría para una pieza de la misma medida a las anteriores, obtendríamos una imagen de 1890 x 1890 píxeles.

La aplicación como displacement map de la imagen del relieve a 800 ppp. (Figura 25) ofrece un nivel de detalle tan grande que dará como resultado una superficie extremadamente rugosa, pues el programa de modelado registrará todo el detalle en la gradación de grises y se apreciará un efecto de ruido visual en toda la superficie del relieve. Aunque las tecnologías actuales de prototipado, las cuales tienen un gran nivel de precisión, podrían llegar

a reproducir este granulado, no nos conviene aplicar esta resolución porque, en comparación con una resolución inferior, genera una imagen con muchos más polígonos, lo que nos dificultará el trabajo con el modelo, impidiéndonos incluso trabajar con la pieza sin antes procesarla y reducir el número de polígonos (recordemos que el número máximo aproximado de polígonos establecidos como límite para un correcto funcionamiento y uso óptimo de la maquinaria de reproducción 3D es de 1 millón de polígonos).

La resolución de 250 ppp. (Figura 23) resulta suficiente según el proceso en el que vayamos a producir la pieza, por ejemplo, para los procedimientos de 3D Inkjet printing (Zcorp) o Sinterizado Láser Selectivo, daría una calidad perfecta ya que la resolución de las impresoras y el acabado final raramente nos darán mayor nivel de detalle. Sin embargo, para modelos que vayamos a producir con métodos como la esterolitografía o el Multijet/Polyjet Printing, que son procesos con gran nivel de detalle, la resolución perfecta es la de 500 ppp. (Figura 24).

El modo de imagen en que se ha de trabajar es fundamental para evitar errores, o minimizarlos según el programa en el que vayamos a aplicar el mapa de desplazamiento.

Este debe ser en escala de grises, y siempre que

sea posible se trabajarán imágenes en 32 bits, lo que nos obliga a guardarlas posteriormente en formato TIFF o IFF. Los formatos JPG o BMP, que son los más comunes, no permiten guardar las imágenes en 32 bits, y al guardar las imágenes en 8 bits lo que se consigue al aplicarla posteriormente en un programa de modelado 3D como mapa de desplazamiento es un efecto de *banding* o dientes de sierra (Figura 26).

Los mapas de desplazamiento habitualmente no generan ruido en la imagen, en la geometría, a no ser que se aplique ese valor entre las variables posibles, por lo que una gradación suave en escala de grises, dará como resultado un mapa de desplazamiento suave. El problema habitualmente viene dado por el tipo de formato de imagen que utilicemos, si para nuestro mapa de desplazamiento utilizamos una imagen JPG solo tiene 256 niveles de tono, por lo que al graduar una escala con ese número de variaciones se traduce en nuestras imágenes en un efecto de *banding* o posterizado, como si de curvas de nivel se tratara. A veces aplicando ruido o desenfoque al mapa de desplazamiento (en la aplicación de modelado 3D) hace desaparecer este efecto, pero también actúa sobre otros elementos de nuestra imagen que posiblemente no nos interesen, por lo que en general, bajará el nivel de detalle de la pieza.

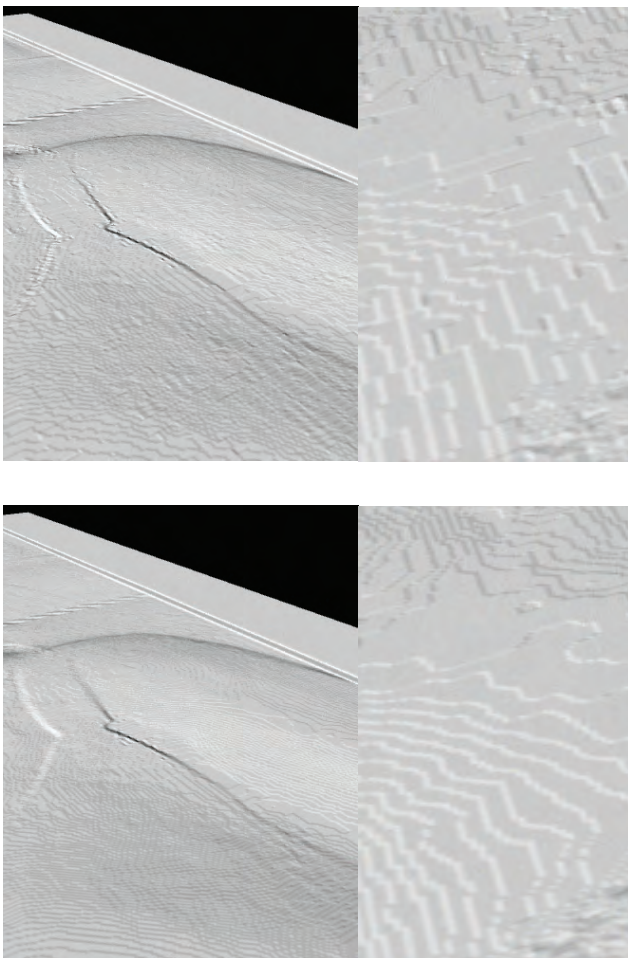


FIGURA 26

La imagen superior muestra una imagen exportada a JPG de 8 bits, donde se puede apreciar las líneas de nivel con ángulos rectos correspondientes a la cuadrícula que se genera por la compresión del archivo.

Debajo, la misma imagen esta vez exportada en TIFF 32 bits, aunque las curvas de nivel son evidentes, los ángulos rectos son sustituidos por curvas mucho más suaves.

La compresión de los archivos JPEG limita la información disponible en la imagen reduciendo su calidad. El proceso de compresión se basa, en resumen, en que la imagen es dividida en cuadrados de 8 x 8 píxeles aplicándose a estos 16 píxeles el mismo color, obtenido a través del cálculo del color medio. Habitualmente la compresión JPEG es válida para la gran mayoría de las aplicaciones gráficas, incluso cuando se trata de aplicar mapas de textura a los modelos 3D, pero no dan buen resultado al aplicarse como mapa de desplazamiento, ya que si algo se pone de manifiesto al aplicar un mapa de desplazamiento en un programa de modelado tridimensional son todas las imperfecciones que pueda tener nuestro archivo, ya que aplican las imágenes con una gran exactitud.

Por todo ello, es recomendable elegir otro formato de archivo para aplicar como mapa de desplazamiento. El presente trabajo se ha llevado a cabo utilizando como programa de edición de imágenes Adobe Photoshop CS6. El archivo estándar de trabajo en este programa tiene la extensión PSD y no tiene ningún tipo de pérdida de información, por lo que trabajar con este formato es la mejor opción. En los programas de modelado 3D no se puede aplicar el formato PSD por lo que hay que seleccionar bien el formato en

que vamos a guardar o exportar el archivo para aplicarlo como mapa de desplazamiento una vez que hayamos terminado la edición de la imagen. Así tendremos en cuenta que el formato de trabajo PSD no influirá en el efecto *banding* de nuestra imagen y debemos guardar en un formato que no dé como resultado dicho efecto como pueden ser el formato TIFF (a 32 o 16 bits) o el IFF, pero nunca JPG (8 bits).

En caso de tener una imagen en 8 bits, si la cambiamos a 16 ó 32 bits y la guardamos, el efecto que nos dará será el mismo, pues cambiar la calidad de una imagen ya creada no generará la información de color que no exista, es decir, no interpolará tonos de color. En caso de que no dispongamos del archivo sin compresión o PSD y queramos eliminar el efecto de *banding*, deberemos aplicar un pequeño desenfoque a la imagen para suavizarla.

Si bien es conveniente tener en cuenta esto para conseguir una imagen que no perjudique el resultado final, la aparición de este efecto *banding* está supeditado al proceso de prototipado que utilicemos, ya que solo en los procesos que aportan mayor resolución será visible (cuando hablamos de piezas de pequeño formato).

Durante el proceso de investigación del trabajo

se ha apreciado un factor más que incide en la percepción de este efecto *banding*, y tiene que ver con el programa de modelado 3D en el que se aplique el mapa de desplazamiento. No todos los programas aplican este mapa de desplazamiento de la misma forma, y al variar los procesos de aplicación (aunque el funcionamiento es el mismo) se ve reflejado en el resultado final en la pieza.

Aplicando el mismo mapa de desplazamiento en Autodesk Maya y en 3DStudio Max el resultado es diferente como puede apreciarse en la Figura 27. En 3DStudio parece que el mapa se aplica con mayor rigor y exactitud y el *banding* desaparece. Se abre aquí una línea de investigación interesante para encontrar las diferencias en la aplicación del displacement en los diferentes programas de modelado 3D.

## 7.6. APLICACIÓN DEL MAPA DE DESPLAZAMIENTO

Una vez terminada nuestra imagen hay que aplicarla en el programa de modelado 3D como mapa de desplazamiento. Los mapas de desplazamiento se aplican sobre polígonos ya creados, por lo que lo primero que debe hacerse es generar un plano o polígono del tamaño que deseemos prototipar la pieza.

Aunque los programas de modelado 3D permiten

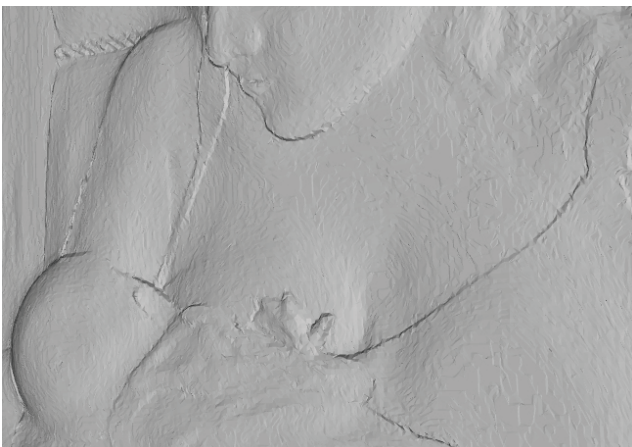
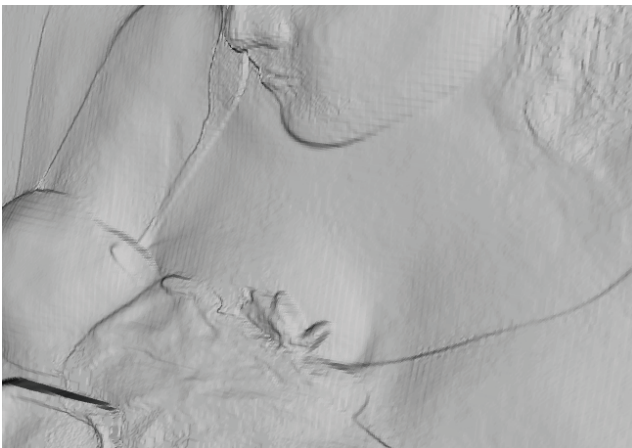


FIGURA 27

La imagen superior muestra el resultado de aplicar el mapa de desplazamiento con el programa 3DStudio MAX donde las curvas de nivel son prácticamente inapreciables.

En la imagen inferior el mapa de desplazamiento aplicado en el programa Autodesk Maya 2012.

escalar el modelo posteriormente, es conveniente hacerlo al tamaño definitivo para poder visualizar los errores que se podrán apreciar en la pieza definitiva.

Los mapas de desplazamiento se pueden aplicar en todo tipo de figuras y formas geométricas. En este caso, para la creación de la pieza que nos ocupa, tenemos la opción de aplicarla sobre un cubo de las proporciones la pieza final (60 mm. x 70 mm. x 4 mm.) o sobre un plano. Aplicar el mapa de desplazamiento sobre un cubo tiene la ventaja de que no necesitaremos cerrar la pieza ni trabajar sobre ella una vez aplicado el mapa, simplemente tendremos que exportarla a formato de archivo .stl y mandarla a prototipar. Sin embargo, este sistema tiene sus desventajas. La primera es que al aplicar sobre un poliedro el desplazamiento se aplica sobre las caras opuestas, es decir tendremos el reverso y el anverso de la pieza con un desplazamiento aplicado. Esto puede resultar muy interesante para según que piezas pero lo que generará será un modelo mucho más complejo y pesado y, probablemente, el número de polígonos generados dificulte su producción en determinadas máquinas de prototipado.

Si lo aplicamos sobre un plano hay que trabajar

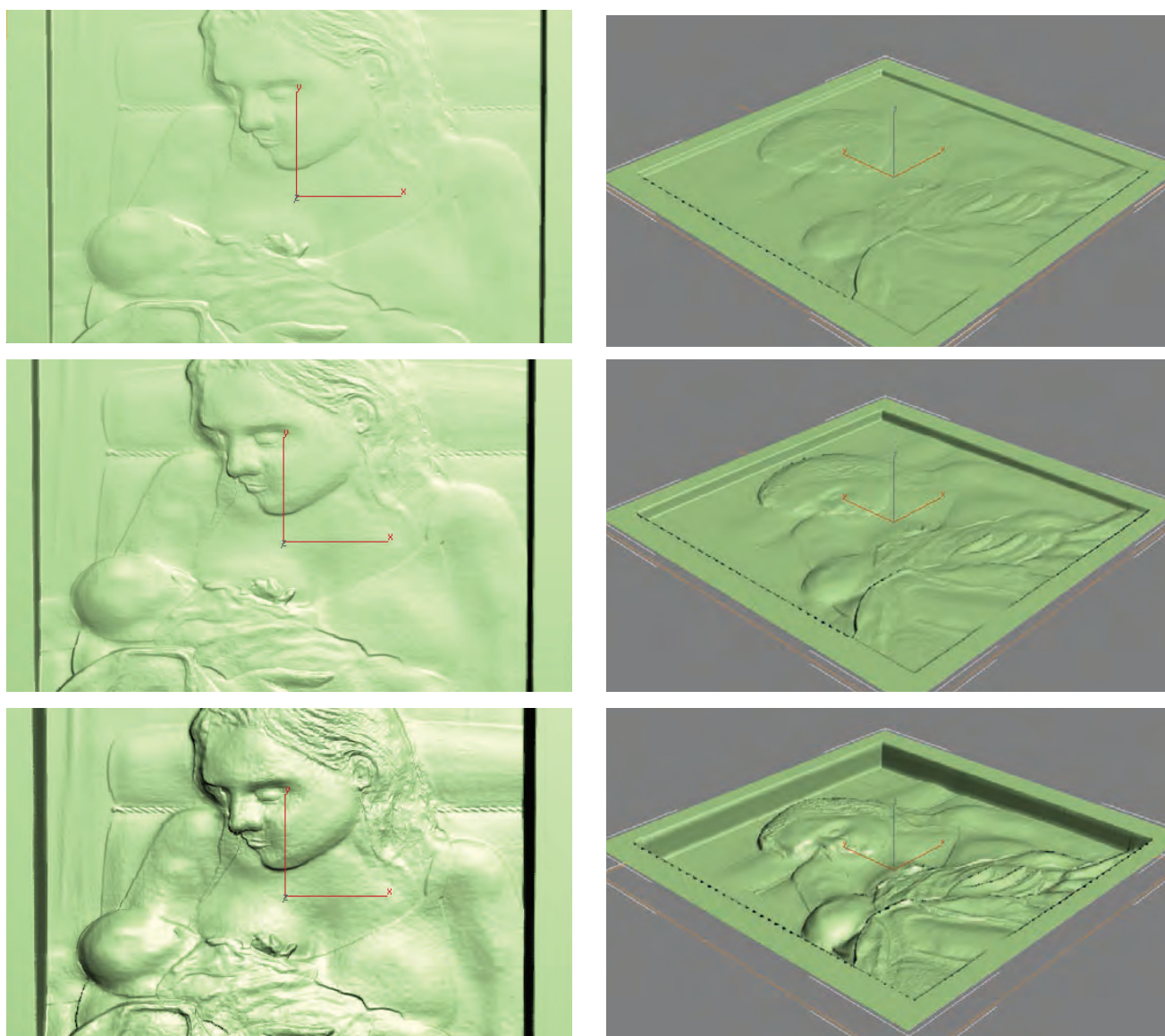


FIGURA 28

Mapa de desplazamiento aplicado con diferentes alturas. En la imagen superior se ha aplicado con una altura máxima de 1 mm. (+1) . En la imagen ubicada en el centro, se ha aplicado con una altura de 2 mm. (+2), y en la inferior de 4mm. (+4).

más sobre el modelo, ya que tendremos que darle el grosor posteriormente y cerrar la geometría de la pieza, pero esto nos permitirá jugar con más libertad al ser un modelo con la mitad de polígonos que si hubiéramos aplicado el mapa de desplazamiento sobre un poliedro.

Si aplicamos este desplazamiento sobre un cubo en Autodesk Maya el nivel de calidad no debe preocuparnos, ya que no limita en absoluto el número de polígonos, pero aplicarlo en 3DStudio Max tiene sus limitaciones, ya que no permite generar más de 200 divisiones por eje, por lo que la calidad del archivo final estará limitada a una resolución de unos 200 x 200 píxeles, suficiente para una pieza de pequeño formato (medallas de 2 cm. x 2 cm.), pero insuficiente para piezas de tamaño medio como la que queremos producir (6 cm. x 7 cm.).

Hay algunas variables con las que podemos jugar a la hora de aplicar el mapa a la imagen sobre el modelo como, por ejemplo, la resolución (que ya hemos visto anteriormente) pero también se puede aplicar ruido o desenfoco entre otras variables. Entre ellas la más interesante es la variable de altura o profundidad, que nos permite aplicar la imagen y generar relieves de distintas alturas o profundidades (Figura 28).

Existe la posibilidad incluso de aplicarlo de una

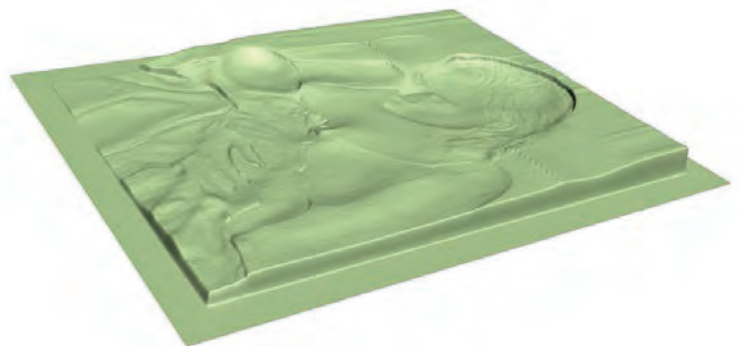


FIGURA 29

Displacement map aplicado de forma negativa, lo que da como resultado un relieve que podría ser utilizado como si de un molde se tratara.

forma inversa, si la variable de altura es negativa, por lo que podríamos conseguir producir el molde para posteriormente obtener los positivos en cera u otro material.

Un elemento a tener en cuenta a la hora de cerrar nuestra malla es el grosor final que vamos a darle. Aunque se trata en principio de una elección estética y que irá en relación al tipo de relieve que queramos crear, es necesario tener en cuenta que hay un grosor mínimo que viene determinado por el procedimiento y material a utilizar en el momento de prototipar la pieza. Esto es clave para determinar la resistencia de la pieza y el éxito a la hora de producirla, aunque a nivel visual parezca que el grosor es el adecuado es necesario hacer un buen control del área en la que el grosor será menor para asegurarnos de que será de, al menos, el mínimo grosor permitido por cada procedimiento.

Los diferentes programas de preprocesamiento hacen revisiones y chequean la pieza en busca de posibles errores durante el proceso de impresión, como muestra la Figura 30. Nos pueden indicar incluso las áreas que sean susceptibles de error durante la impresión, en este caso marcan el área de relieve más bajo advirtiéndole que esa zona es demasiado delgada para el proceso en el que queremos producir la pieza.

En el caso de una medalla o relieve lo único que



FIGURA 30

Imagen extraída del programa de preprocesamiento donde el programa indica el área susceptible de error.



FIGURA 31

RELIEVE MUESTRA 1 . Producida mediante Sinterizado láser Selectivo en Nylon 11.



FIGURA 32

RELIEVE MUESTRA 2 . Producida mediante sistema Multijet Printing en resina transparente.

tenemos que hacer es aumentar la distancia entre la cara trasera del objeto y la delantera hasta que el grosor mínimo sea el adecuado.

Una vez que hemos terminado de aplicar el mapa de desplazamiento y hemos cerrado nuestra malla, exportaremos nuestro modelo a formato .stl. Es importante que al exportar el archivo tenga las medidas deseadas y que recordemos las unidades en que se ha diseñado el modelo (mm., cm., pulgadas...) ya que los programas de preprocesamiento, aquellos que preparan el modelo para la impresión, nos pedirán las unidades en que se ha diseñado el modelo para producirlos en la escala adecuada.

La pieza final que se ha generado es un relieve de 5,97 cm x 0,47 cm x 6,97 cm, con un volumen de 11,75 cm<sup>3</sup> y compuesta por un total de 2.517.984 polígonos, lo que demuestra que las máquinas pueden trabajar y producir con piezas de más de un millón de polígonos.

### 7.7. PRODUCCIÓN DE LAS MUESTRAS

Partiendo de las premisas ya marcadas y tras realizar la investigación y numerosas pruebas con diferentes procedimientos y materiales se realizó la primera muestra de la medalla mediante el proceso de Sinterizado Láser Selectivo en una poliamida blanca: RELIEVE MUESTRA 1

(Figura 31). El resultado no fue el deseado, a pesar de haberse hecho muestras anteriores como las que se pueden ver en capítulo 6 de este trabajo, y a que todo indicara que el resultado sería bueno. Se puede apreciar, a simple vista que se ha perdido todo el detalle del modelo y solo se aprecian volúmenes generales.

Se realizó entonces una segunda impresión (RELIEVE MUESTRA 2) mediante la tecnología Multijet en una resina transparente Visijet Cristal.

Estas dos primeras muestras producidas corresponden a un mismo modelo tridimensional modelado con Autodesk Maya, que nombraremos como RELIEVE A. Si bien el resultado en poliamida no dio un buen resultado, la muestra impresa con sistema Multijet dio un resultado bastante bueno. La revisión y el análisis del resultado determinó la necesidad de realizar un segundo modelo con otro programa de modelado, en este caso 3DStudio Max, para intentar minimizar el efecto de curvas de nivel y conseguir una mejor resolución, realizando el modelo RELIEVE B.

Tras analizar los dos modelos tridimensionales y las diferencia entre ellos (Figura 27) se produjo el segundo modelo mediante el mismo procedimiento, obteniendo la muestra RELIEVE MUESTRA 3.

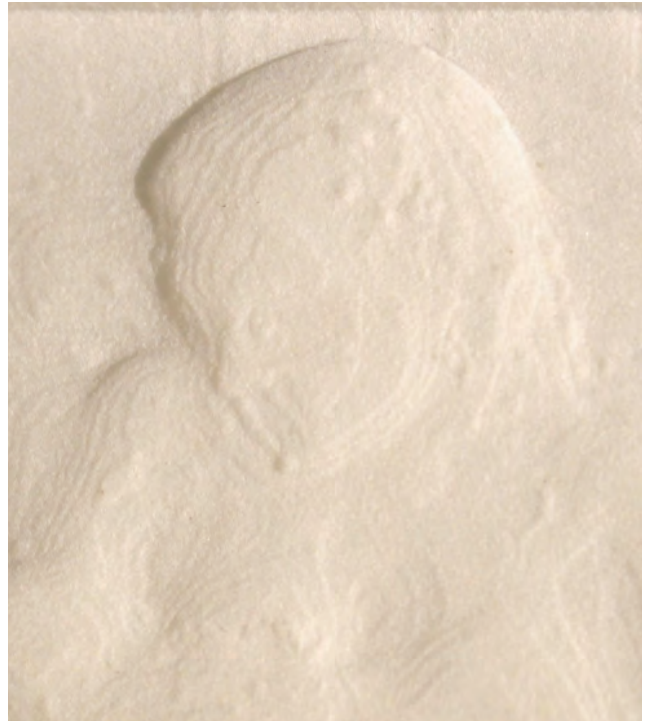


FIGURA 33

Detalle de la pieza RELIEVE MUESTRA 1 donde se aprecia la poca resolución de la pieza.

Tras analizar los diversos resultados obtenidos después de imprimir las 3 primeras muestras del relieve, se puede determinar que a la hora de preparar cualquier pieza para imprimir, su colocación y orientación en la mesa de trabajo es fundamental para conseguir un producto con un acabado adecuado. Si bien en modelos volumétricos (de bulto redondo) la colocación de la pieza en la impresora suele venir dada por el área de soporte de la misma, su base, en el caso de los modelos de relieve o medallas es fundamental que esto no sea así.

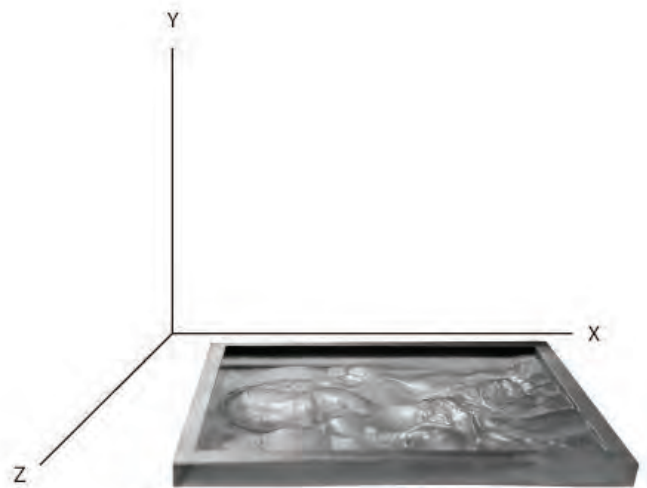


FIGURA 34

Posicionamiento de la pieza RELIEVE MUESTRA 1 en la cubeta de impresión sobre el plano ZX.

La resolución de las diferentes impresoras tridimensionales resulta menor en el eje Y que en los ejes X ó Z. Esto se debe a que esta resolución viene dada por el grosor de las capas del material y aunque en un modelo de bulto redondo este factor tenga poca relevancia, en el desarrollo de un relieve la importancia de la resolución es sensiblemente más importante, por lo que la colocación y orientación de la pieza en la mesa de trabajo es un elemento crítico a tener en cuenta.

Así, por ejemplo, no es recomendable colocar los relieves apoyados sobre su base o parte trasera. Dependiendo del procedimiento y el material, el resultado puede ser muy pobre como se puede ver en la FIGURA 33, donde se aprecia la falta de detalle, y se ve únicamente unos volúmenes muy



FIGURA 35

Posicionamiento de las piezas RELIEVE MUESTRA 2 y RELIEVE MESTRA 3 en la cubeta de impresión, sobre el plano XY, situada en posición vertical.



FIGURA 36

Posicionamiento de la pieza RELIEVE MUESTRA 4 en la cubeta de impresión sobre el plano XY, situada en posición horizontal.

generales del desarrollo del modelo.

En este caso la falta de nitidez se debe a dos factores. Por un lado, a la colocación de la pieza en posición horizontal en el plano XZ y, por otro al procedimiento y material. En este caso se ha producido la pieza mediante Sinterizado Láser Selectivo con una poliamida Nylon11. Si la pieza se hubiera impreso en posición vertical con el área más amplia en el plano XY ó ZY, el resultado habría sido mucho más satisfactorio, si bien, ni el procedimiento ni el material son los adecuados para un trabajo de detalle como este.

Sabiendo que la mejor resolución es la que se obtiene en los planos ZY y XY, se ha realizado la producción de la pieza sobre ambos planos para determinar si alguna colocación otorga mejor resolución o determinar si hay diferencias sustanciales.

Interpretando la textura que deja el proceso de impresión en la parte trasera de la pieza, se aprecia a la perfección cual ha sido la colocación de la pieza en el área de trabajo y, por lo tanto, la orientación en que ha sido impresa en la cubeta de procesamiento. Así podemos determinar que las piezas RELIEVE MUESTRA 2 y RELIEVE MUESTRA 3 (Figura 37) han sido producidas en posición vertical, mientras que la pieza nombrada como RELIEVE MUESTRA 4 (Figura 38) ha sido



FIGURA 37

RELIEVE MUESTRA 3: En la imagen superior la pieza final. En la inferior un detalle de la parte trasera donde la textura rayada en forma de líneas, en este caso horizontales, indican que esta pieza ha sido impresa en posición vertical.

FIGURA 38

RELIEVE MUESTRA 4: En la imagen superior se puede observar la pieza final. En la inferior un detalle de la parte trasera donde la textura rayada en forma de líneas verticales indican que esta pieza ha sido impresa apoyada sobre un lateral.

impresa en posición lateral, apoyada sobre un lado de la medalla.

Posicionando de esta forma la pieza, en ambos casos se confirma que la impresión del relieve en los planos XY y ZY da un nivel de detalle muy alto. No obstante hay una variable a tener en cuenta a la hora de elegir entre las dos opciones de colocación para imprimir nuestra pieza, y esta es la deformación.

Los fabricantes de maquinaria de producción tridimensional, así como los proveedores del servicio, recomiendan que no se trabaje con modelos que contengan grande planos o superficies planas, pues las superficies grandes suelen deformarse como causa del comportamiento de los diferentes materiales al enfriarse, curarse o solidificarse. Este es el caso de la resina que hemos utilizado. En el modelo RELIEVE MUESTRA 3, el que se ha impreso de forma vertical, esta deformación es prácticamente imperceptible, aunque sí está presente. Sin embargo, la pieza RELIEVE MUESTRA 4, impresa en el sobre el plano XY, pero apoyada sobre un lateral, presenta una deformación mucho mayor, apreciable simplemente al tacto (Figura 38).

En ambos casos la deformación sucede en el



FIGURA 38

Imagen en la que se aprecia perfectamente la deformación de la pieza RELIEVE MUESTRA 4.

plano XY sobre el eje X, donde los extremos laterales del plano XY estarán en una posición en Z y el centro en otra diferente. Esta deformación no se debe a que el cabezal de impresión haya procedido de una forma errónea, esta deformación tiene lugar durante el proceso de curado. Durante el proceso de impresión las capas impresas se van curando de forma instantánea, lo que va generando tensiones entre la capa curada inmediatamente antes de la que se acaba de imprimir.

Es importante tener esto en cuenta porque, al darse esta deformación en el eje X, intentaremos siempre posicionar nuestra pieza de tal forma que la orientación en la mesa de trabajo sea la adecuada para que el mayor procesamiento se tenga que hacer sobre el eje Y (verticalmente) y no sobre los ejes X ó Z (horizontalmente). De una forma más clara, diremos que a diferencia de medidas, la medida más larga se procesará mejor sobre el eje Y.

Una vez hecha una comparación en cuanto a los resultados que da la orientación de la pieza en la cubeta de impresión, nos centramos en las diferencias que se aprecian a nivel de producción entre el modelo generado en Autodesk Maya (RELIEVE A) y el modelo generado con 3DStudio Max (RELIEVE B), comparando las muestras impresas en el mismo material, sistema y

orientación: MUESTRA RELIEVE 2 (Autodesk Maya) y MUESTRA RELIEVE 3 (3DStudio MAX).

Como ya se apreciaba en la Figura 27, donde se podía ver la previsualización de los dos modelos en un programa de modelado tridimensional, el modelo ejecutado en Autodesk Maya se podía apreciar una menor resolución, con un efecto de curvas de nivel más marcado. Tras producir las dos muestras se puede apreciar en la Figura 39, correspondiente al modelo ejecutado en Autodesk Maya, una menor resolución con las curvas de nivel mucho más marcadas que en la Figura 40, correspondiente al modelo ejecutado en 3DStudio Max. Habría que hacer un estudio más profundo sobre las diferencias entre los programas en la forma en que aplican el mapa de desplazamiento para poder entender el origen de esas diferencias.

## 7.8. CONCLUSIONES

El resultado final obtenido tanto del procedimiento o protocolo creado para la generación de imágenes bidimensionales como de su aplicación y posterior producción de la pieza, ha sido, sin lugar a dudas, satisfactorio. Aunque hay diferencias entre la aplicación de los mapas de desplazamiento en diferentes programas, el resultado es bueno en cualquiera de las dos opciones, pero lo que definitivamente marca la

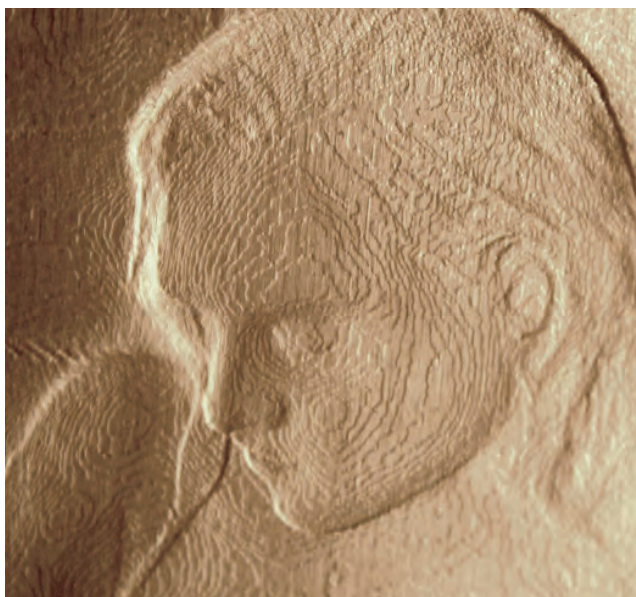


FIGURA 39

Imágenes detalle de la pieza RELIEVE MUESTRA 2 donde se puede apreciar un menor número de curvas de nivel que en la Figura 40 pero muy marcadas, lo que genera un volumen menos suave.



FIGURA 40

Imágenes detalle de la pieza RELIEVE MUESTRA 3 donde se aprecia un relieve más suave y con mejor resolución y mayor nivel de detalle.

calidad del trabajo es el proceso de producción. Al ser modelos que cuentan con tanto detalle, y con volúmenes tan bajos, es necesario contar con materiales y procesos que sean capaces de respetar y reproducir fielmente cada uno de los elementos que componen esos relieves.

Es fundamental generar una imagen con un tamaño adaptado al tamaño final de producción de la pieza, marcando como referencia una resolución de 500 píxeles por pulgada. El formato de la imagen deberá ser sin compresión (TIFF, IFF), y a ser posible con más de 8 bits para evitar excesivas curvas de nivel ni efectos indeseados tipo banding o posterizado.

Por último, es importante elegir una buena orientación de la pieza sobre la bandeja de impresión a la hora de ser producida, evitando siempre colocarla sobre el plano ZX, e intentando que la mayor longitud se desarrolle de forma vertical sobre el eje Y para evitar posibles deformaciones.

El procedimiento que se ha presentado no pretende ser, en ningún momento, un procedimiento sustitutivo de los procesos tradicionales de modelado y tallado de relieves. Se presenta como una herramienta más para la creación artística con virtudes y defectos desde el punto de vista plástico, del proceso creativo y conceptual que tendrán que ser valorados por el artista que decida trabajar con ellos.



## 8. CONCLUSIONES

El mundo del 3D lleva en evolución ya más de 50 años, remontándose los primeros pasos a los desarrollos de Ivan Sutherland allá por 1962.

En todo este tiempo la utilidad principal que se le ha dado al modelado virtual tridimensional ha sido su aplicación audiovisual. Hemos vivido una clara revolución en lo que al medio audiovisual se refiere en los últimos 25 años, desde el lanzamiento de *Toy Story* en el año 1994, el mundo de los gráficos tridimensionales ha evolucionado de una forma exponencial hasta hacernos dudar de si lo que estamos viendo es real o virtual.

Los artistas, en sus procesos creativos, llevan ya años apoyándose en las tecnologías digitales para desarrollar su discurso y ofrecer creaciones novedosas. El arte siempre se ha dejado llevar por la innovación y no ha tenido miedo a investigar con los nuevos métodos de creación que han ido surgiendo. No iba a ser distinto con los procesos de prototipado tridimensional y muchos artistas y creadores se han lanzado a desarrollar su obra con estos métodos. El objetivo inicial de este trabajo era el de estudiar los diferentes procesos existentes y las posibilidades que ofrecen para el campo de la creación escultórica.

Si bien estos procesos de prototipado se idearon como sustitutos de los procesos tradicionales de fabricación industrial, buscando en ellos rapidez y economía, lo cierto es que el mercado del prototipado está cada vez más enfocado al usuario privado individual más que a las grandes industrias y sistemas de fabricación en masa.

El colaboracionismo es otro de los ejes fundamentales de esta revolución, donde la gente no tiene miedo a compartir experiencias, diseños, desarrollos e, incluso, mejoras de estas tecnologías, como hemos podido ver con el proyecto RepRap el mundo virtual y la conectividad a la que estamos sometidos en el s. XXI han hecho que la forma de trabajar y pensar haya evolucionado, y ha conseguido popularizar una serie de herramientas que en otro momento se habrían quedado olvidadas y su uso habría quedado reducido al de un grupo de ingenieros interesados, de nuevo, por las posibilidades industriales.

Sin embargo, las redes sociales y foros que se vienen desarrollando desde finales del s. XX han conseguido que el público se interese por el mundo del modelado 3D y por estos procesos de prototipado rápido. La colaboración ha impulsado su crecimiento hasta el punto de conseguir redes dedicadas en exclusiva a estos procesos donde el público participa de una forma activa haciendo

suyo el proyecto para después compartirlo con el resto del mundo.

En lo que a procedimientos se refiere no se puede decir que este trabajo refleje el 100 % de los procesos existentes, pero sí que muestra los procedimientos fundamentales.

Puede haber, y habrá, evoluciones de los mismos, mejoras, y quizás surja otro completamente nuevo sin relación alguna con los aquí expuestos, pero lo que actualmente hay en el mercado se puede clasificar dentro del esquema principal de procedimientos que se ha presentado en este trabajo y que sería el siguiente:

1. Sinterizado Láser Selectivo (SLS).
2. Estereolitografía (SLA).
3. Modelado por deposición fundida (MDF).  
(FDM: *Fused Deposition Modelling*).
4. Impresión 3D por inyección de tinta.  
(3D *inkjet printing*).
5. Inyección de fotopolímero:  
Multijet/Polyjet printing.

Se ha realizado un estudio de materiales y procesos donde se han documentado las características fundamentales de cada uno de ellos. Por supuesto no se ha podido realizar una muestra de cada proceso y cada material disponible en el mercado, pero sí se ha presentado una muestra de los sistemas y materiales más representativos.

La investigación y desarrollo de nuevos materiales para sistemas de prototipado rápido está en constante evolución y es un campo muy interesante para los artistas. Quizá los sistemas menos desarrollados sean los que trabajan directamente con metal como el Sinterizado Directo de Metal, del cual no se ha realizado muestra por su elevado precio y escasez de proveedores. Sin embargo, hay una amplia gama de materiales como diferentes tipos de resinas y plásticos que se pueden trabajar mediante distintos sistemas.

Los artistas que trabajan con estas tecnologías tienen una amplia gama de procesos y materiales a su disposición, que no solo pueden otorgar al elemento de una estética, sino que además pueden dotar a nuestra obra de contenido conceptual. Si, por poner un ejemplo, defendemos una posición o teoría de fuerte ética medioambiental, podremos utilizar para ello materiales reciclados y biodegradables que nos ayudarán a consolidar el mensaje que con nuestra pieza queremos transmitir.

En conjunto, el trabajo pretende reflejar que el desarrollo tecnológico que está acaeciendo está abriendo posibilidades infinitas para el gremio de los artistas, liberándonos (por decirlo de alguna manera) de las ataduras materiales a las que siempre hemos estado atados. Hasta ahora quien quisiera desarrollar una carrera profesional en el mundo del arte necesitaba de un estudio donde tener sus pinceles y pinturas, en el caso de los pintores, o sus piedras y herramientas en caso de tratarse de un escultor. Ahora no es imprescindible tener esas herramientas para crear y hacer una obra técnicamente impecable, como veíamos en el capítulo 3 de este trabajo, el taller del artista ha evolucionado así como sus herramientas e incluso sus posibilidades.

El mundo del modelado tridimensional digital siempre ha estado muy enfocado al diseño de bulto redondo y con este trabajo mi intención ha sido estudiar las posibilidades que estas tecnologías ofrecen también para la creación de relieves, tan fundamentales para la evolución y el registro de nuestra historia (recordemos los relieves romanos que recogen los triunfos del Imperio como la Columna Trajana o el Ara Pacis) . El resultado, como puede verse en el capítulo 8 ha sido muy satisfactorio. Se ha conseguido desarrollar un protocolo, establecer un procedimiento para crear un modelo de relieve a partir de una imagen bidimensional en escala de grises que, al ser

aplicada como mapa de desplazamiento, convierte la malla tridimensional en un relieve.

En un mundo en el que la movilidad es necesaria, y en donde para aprender lo mejor es viajar y conocer mundo, los artistas no deben estar atados para poder crear y transformar sus ideas en piezas que transmitan sensaciones y emociones.

Con las nuevas tecnologías la creación se abre camino, el arte está sufriendo un proceso de democratización al que no debemos temer y al que debemos abrazarnos para que nuestra obra impacte en el mayor número de espectadores posible sin que sea completamente necesario estar delante de ella de una forma material, incluso si nuestro proceso creativo sigue siendo tradicional, estas tecnologías nos pueden ayudar a difundir nuestras creaciones sin temer por su integridad, sin tener que desplazarlas de un punto de la Tierra a otro para exhibirlas y sin tener que estar atados a los distintos elementos materiales y económicos que hoy en día rigen el mundo.

Tanto para el arte más tradicional como para los movimientos más conceptuales y actuales las nuevas tecnologías abren nuevos caminos para la investigación y la producción artística.



# 9. BIBLIOGRAFÍA

## 1. LIBROS Y OTROS RECURSOS MONOGRÁFICOS

Bartolo P.J., Gibson I.(2011).  
*Stereolithography: Materials, Processes and Applications*. Springer Science+Business Media.

Bellini A., (2002).  
*Fused deposition of ceramics: A comprehensive experimental, analytical and computational study of material behavior, fabrication process and equipment design*. Drexel University. Philadelphia, Estados Unidos de América.

Blinn J., Newell M. (1976).  
*Texture and Reflection in Computer Generted Images*. University of Utah, Estados Unidos de América.

Brock J.m., Montero M., Odell D., Roundy S. (2010, mayo).  
*Fused Deposition Modeling (FDM) Material Properties Characterization*. University of California, Berkeley. California.

Gubern, R. (1996).  
*Del bisonte a la realidad virtual: La escena y el laberinto*. Barcelona: Anagrama.

Lowe A., Ahmon J. (2003).  
*La Dama de Elche*. Madrid: Factum Arte.

Manriquez-Frayre I.A., Bourell D.I. (1991).  
*Selective Laser Sintering of Binary Metallic Powder*. Texas: The University of Texas, Austin. Estados Unidos de América.

Mireles J., Espalin D., Robersond., Zinniel B., Medina F., Wicker R.(2012, agosto). *Fused Deposition Modeling of Metals*. The University of Texas (Estados Unidos de América).

Tang Y., (2005, agosto).  
*Stereolithography cure process modeling*. Georgia: Georgia Institute of Technology.

Wittkower R. (1984).  
*La escultura: procesos y principios*. Barcelona: Alianza forma.

## 2. REVISTAS Y ARTÍCULOS DE REVISTAS

- Beal V.E., Ahrens C. H. (2004, enero).  
The Use of Stereolithography Rapid Tools in the Manufacturing of Metal Powder Injection Molding Parts. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Science & Engineering*. Vol. XXVI, No. 1, pp.40-46.
- Deutsch S. D. (2014, febrero).  
Plastics for 3D printing. *Make: 3d Printers Buyer's Guide*. Special Issue. pp.36-38.
- Dougherty D. (2014, febrero).  
A Brief history of 3D printers. *Make: 3d Printers Buyer's Guide*. Special Issue. p.8
- Holbrook S. (2014, febrero).  
Printing without a 3D printer. *Make: 3d Printers Buyer's Guide*. Special Issue. pp.40-43.
- Juanes J.A., Espinel J.L., Zoreda J.L., Riesco J.M., Carmena J.J., Velasco M.J., Blanco E., Marcos J., Vázquez R. (1996).  
A Three-dimensional virtual model of the head generated from digitalized CT and MR images for anatomical-radiological and neurosurgical evaluations. *Journal of Neuroradiology*,
- Krauss R. (1979, mayo)  
Sculpture in the Expanded Field. *October*, Vol. 8, pp. 30-44.
- Lopes, A.j., Macdonald, E., Wicker, R. (2012).  
Integrating stereolithography and direct print technologies for 3D structural electronics fabrication. *Rapid Prototyping Journal*, 18, pp.129-143.
- Muralia K, Chatterjee A.N., Saha P., Palaia R., Kumara S., Roy S.K., Mishra P.K., Roychoudhury A. (2003, enero).  
Direct selective laser sintering of iron-graphite powder mixture. *Journal of Materials Processing Technology*, 136, pp.179–185
- Parks N., Chu E. (2014, febrero). Filament Extruders. *Make: 3d Printers Buyer's Guide*. Special Issue. p.99
- Schultz J.w., Ullett J. S., Chartoff R. P., Pogue R.T. (1999, mayo).  
Novel Liquid Crystal Resins for Stereolithography: Mechanical and Physical Properties. *Rapid Prototyping Journal*, Volumen 6, 1. pp.325-332

### 3. TESIS DOCTORALES

Catmull, E. (1974).  
A Subdivision Algorithm for Computer Display of Curved Surfaces. University of Utah, Salt Lake City, Utah.

Martinez Fuentes W.R. (2010, octubre).  
*Propuesta de aplicación de los softwares PowerSHAPE y PowerMILL como herramientas de apoyo para el maquinado CNC.* Universidad de El Salvador. El Salvador.

McMillan, L. (1997).  
*An Image-Based Approach to Three-Dimensional Computer Graphics.* University of North Carolina. North Carolina. Estados Unidos de América.

Sutherland, I. (1963).  
*Sketchpad: A man-machine graphical communication system.* Massachusetts Institute of Technology. Cambridge, Massachusetts.

### 4. PONENCIAS Y CONGRESOS

Agarwala, M. K., Weeren, R. V., Bandyopadhyay, A., Whalen, P. J., Safari, A., Danforth, S. C., (1996),  
Fused Deposition of ceramics and metals: an overview. *Procedimientos en el Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin, Texas* (Estados Unidos de América).

Blinn, J. F. (1978).  
Simulation of wrinkled surfaces. *Procedimientos en el 5th Annual Conference on Computer graphics and interactive techniques*, ACM Press, 286–292. Atlanta, Philadelphia (Estados Unidos de América).

Heidrich, W., Daubert, K., Kautz, J., Seidel, H. (2000, julio).  
Illuminating micro geometry based on precomputed visibility. *Procedimientos del Siggraph 2000, Computer Graphics.* Nueva Orleans.

Kaneko, T., Takahei, T., Inami, M., Kawakami, N., Yanagida, Y., Maeda, T., And Tachi, S. (Diciembre 2001).  
Detailed shape representation with parallax mapping. En *procedimientos ICAT 2001.* Tokyo.

Malzbender, T., Gelb, D., Wolters, H. (Agosto 2001). Polynomial texture maps. *Procedimientos del Siggraph 2001, Computer Graphics*, pp 519–528. Los Angeles, California (Estados Unidos de América).

Oliveira, M. M., Bishop, G., Mcallister, D. (2000, julio). Relief texture mapping. *Procedimientos en Siggraph 2000, Computer Graphics*. pp. 359–368. Nueva Orlenas.

Peercy, M., Airey, J., And Cabral, B. (1997). Efficient bump mapping hardware. *Procedimientos del SIGGRAPH '97*, 303–306. Los Angeles, California (Estados Unidos de América).

Policarpo F., Oliveira M.M., Joao L., Comba J.L.D. (2005, abril). Real-time relief mapping on arbitrary polygonal surfaces. *Procedimientos de The 2005 symposium on Interactive 3D graphics and games, I3D '05*. Washington.

Shade, J. W., Gortler, S. J., He, L.-W., Szeliski, R. (julio 1998). Layered depth images. In *Siggraph 1998, Computer Graphics Proceedings*, 231–242. Orlando, Florida (Estados Unidos de América).

Wang, X., Tong, X., Lin, S., Hu, S., Guo, B., Shum, H.-Y. (2004). Generalized displacement maps. In *Eurographics Symposium on Rendering 2004, EUROGRAPHICS*, 227–233. Suecia.

## 5. SITIOS WEB Y RECURSOS EN LÍNEA

Burón, David. *Impresión 3D: qué materiales usar y dónde comprarlos* [en línea]. [Madrid, España] Diciembre de 2013 [ref. de 8 de agosto 2014].

Disponible en: <http://www.siliconweek.es/workspace/impresion-3d-que-materiales-usar-y-donde-comprarlos-50135>

Vila, Cristobal. *Mapas de Relieve: Mucho más que bumps*. [en línea]. [Zaragoza, España] Noviembre de 2008 [ref. de 11 de julio 2010].

Disponible en: [http://www.eteraestudios.com/training\\_img/relief\\_maps/relief\\_maps\\_2.htm](http://www.eteraestudios.com/training_img/relief_maps/relief_maps_2.htm)

3D Systems. *Making rapid prototyping easy*. [en línea]. [Atlanta, Estados Unidos de América] Marzo de 2010 [ref. de 5 de Octubre 2014].

Disponible en: <http://www.stereolithography.com/sla-resins.php>

Sculpteo's 3D printing materials [consulta 12 agosto 2014]. Disponible en: <http://www.sculpteo.com/en/materials>

Startasys polyjet materials [consulta 22 junio 2014]. Disponible en: <http://www.stratasys.com/materials/polyjet/compare-polyjet-materials>

3D Printing Materials: i.materialise [consulta 2 febrero 2014]. Disponible en: <http://i.materialise.com/materials>



# ANEXO:

## Fichas técnicas de los materiales

NOMBRE DEL MATERIAL	Nº DE MUESTRA	PÁGINA
PA2200	1	206
ALUMIDE	2	210
ACCURA EXTREME	5	212
ABS-M30	6	214
VISIJET PXL Core	7,8,9	216
ACERO INOX + BRONCE	10	220
VISIJET M3 PROPLAST	11	221
VISIJET CRYSTAL	12	226
VEROWHITE	13	231
VEROCLEAR RGD810	14	232

No están disponibles las fichas de los materiales 3, 4 y 15.

## Material data sheet

### PA 2200

#### 1 General

Typical applications of the material are fully functional parts with high end finish right from the process, which easily withstand high mechanical and thermal load.

PA 2200 is suitable for processing on the following systems:

- EOSINT P 730, P 700
- EOSINT P 390, P 385, P 380i, P 380, with or without powder conveying system  
EOSINT P 360 with upgrade S&P, P 350/2 with upgrade 99 and upgrade S&P
- FORMIGA P 100

#### 2 Technical data

##### General material properties

Average grain size	ISO 13320-11	56	μm
	Laser diffraction	2.20	mil
Bulk density	EN ISO 60	0.45	g/cm <sup>3</sup>
Density of laser-sintered part	EOS method	0.93	g/cm <sup>3</sup>
		58	lb/ft <sup>3</sup>

##### Mechanical properties

Tensile modulus	EN ISO 527	1700	MPa
	ASTM D638	247	ksi
Tensile strength	EN ISO 527	48	MPa
	ASTM D638	6962	psi

## Material data sheet

Elongation at break	EN ISO 527	24	%
Elongation at break	ASTM D638	24	%
Flexural modulus	EN ISO 178	1500	MPa
	ASTM D790	217	ksi
Flexural strength	EN ISO 178	58	MPa
	ASTM D790	8412	psi
Charpy - Impact strength	EN ISO 179	53	kJ/m <sup>2</sup>
Charpy - Notched impact strength	EN ISO 179	4.8	kJ/m <sup>2</sup>
Izod - Impact strength	EN ISO 180	32.8	kJ/m <sup>2</sup>
Izod - Notched impact strength	EN ISO 180	4.4	kJ/m <sup>2</sup>
Ball indentation hardness	EN ISO 2039	78	N/mm <sup>2</sup>
Shore D - hardness	ISO 868	75	-
	ASTM D2240	75	-

The mechanical properties depend on the x-, y-, z-position and on the exposure parameters used.

### Thermal properties

Melting point	EN ISO 11357-1	172 - 180	°C
Vicat softening temperature B/50	EN ISO 306	163	°C
	ASTM D1525	325	°F
Vicat softening temperature A/50	EN ISO 306	181	°C
	ASTM D1525	358	°F

The data are based on our latest knowledge and are subject to changes without notice. They do not guarantee properties for a particular part and in a particular application.

© 2008 EOS GmbH – Electro Optical Systems. All rights reserved.

## Material data sheet

### Alumide®

#### 1 General

A typical application for Alumide® is the manufacture of stiff parts of metallic appearance for applications in automotive manufacture (e.g. wind tunnel tests or parts that are not safety-relevant), for tool inserts for injecting and moulding small production runs, for illustrative models (metallic appearance), for education and jig manufacture, among other aspects.

Surfaces of parts made of Alumide® can be finished by grinding, polishing or coating. An additional advantage is that low tool-wear machining is possible, e.g., milling, drilling or turning.

Alumide® is suitable for processing on the following systems:

- EOSINT P 730, P 700
- EOSINT P 390, P 385, P 380i, P 380, with or without powder conveying system  
EOSINT P 360 with upgrade S&P, P 350/2 + upgrade 99 + upgrade S&P
- FORMIGA P 100

#### 2 Technical data

##### General material properties

Average grain size	ISO 13320-1	60	µm
	Laser diffraction	2.36	mil
Bulk density	EN ISO 61	0.67	g/cm <sup>3</sup>
Density of laser-sintered part	EOS-method	1.36	g/cm <sup>3</sup>
		85	lb/ft <sup>3</sup>

## Material data sheet

### Mechanical properties

Tensile modulus	EN ISO 527	3800	MPa
	ASTM D638	551	ksi
Tensile strength	EN ISO 527	48	MPa
	ASTM D638	6962	psi
Elongation at break	EN ISO 527	4	%
	ASTM D638	4	%
Flexural modulus	EN ISO 178	3600	MPa
	ASTM D790	522	ksi
Flexural strength	EN ISO 178	72	MPa
	ASTM D790	10443	psi
Charpy - Impact strength	EN ISO 179	29	kJ/m <sup>2</sup>
Charpy - Notched impact strength	EN ISO 179	4.6	kJ/m <sup>2</sup>
Shore D - hardness	ISO 868	76	-
	ASTM D2240	76	-

### Thermal properties

Melting point	EN ISO 11357-1	172 – 180	°C
Heat deflection temperatur	ASTM D648 (0.45 MPa)	351	°F
Vicat softening temperature B/50	EN ISO 306	169	°C
	ASTM D1525	336	°F
Heat conductivity (170 ° C)	Hot wire method	0.5 – 0.8	W(mK) <sup>-1</sup>

# Accura® Xtreme Plastic



Functional prototype helmet used for durability testing

Get extreme performance and durability with Accura® Xtreme Plastic.

## Applications

- Form, fit and function prototypes
- Durable Assemblies
  - Snap fit assemblies
  - Tough enclosures
  - Consumer electronic components
- Master patterns for RTV/Silicone molding
- Replace CNC machining of Polypropylene and ABS

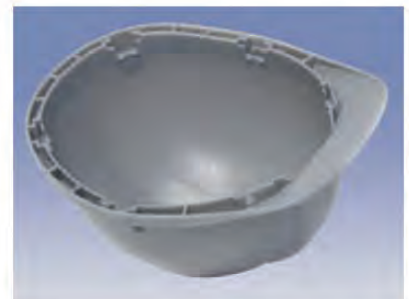
## Features

- Look and feel of a durable molded plastic
- Outstanding durability and impact resistance
- Thermal Resistance over 60° C
- Easy to use low viscosity formulation
- Fully developed and tested build styles



## Benefits

- Increased application opportunities
- Suitable for assemblies and functional testing
- Prototypes withstand modest temperatures without distortion
- Faster recoating and build times
- Maximize reliability with no user R&D



# Accura<sup>®</sup> Xtreme Plastic

For use with solid-state stereolithography (SLA<sup>®</sup>) systems

"Since we introduced Accura Xtreme stereolithography material to our clients they have told us they are able to use this material in more applications than any other material we have supplied in the past. The material has physical properties that are close enough to a durable end use plastics like ABS and Polypropylene, that our customers are not only using it for functioning prototypes, but also for short run production projects. Accura Xtreme is a grey plastic with the appearance of a final production part. Durability, accuracy and aesthetics have made Accura Xtreme our go-to material. In order to keep up with demand, we have it installed in several systems including one of our Viper Pros!"

**Scott Turner- President**  
**Scicon Technologies**



## Technical Data

### Liquid Material

Measurement	Condition	Value
Appearance		Grey
Liquid Density	@ 25 °C (77 °F)	1.13 g/cm <sup>3</sup>
Solid Density	@ 25 °C (77 °F)	1.19 g/cm <sup>3</sup>
Viscosity	@ 30 °C (86 °F)	250 - 300 cps
Penetration Depth (Dp) *		4.1 mils
Critical Exposure (Ec) *		11.7 mJ/cm <sup>2</sup>
Tested Build Styles		EXACT™

### Post-Cured Material

Measurement	Condition	Metric	U.S.
Tensile Strength	ASTM D 638	38 - 44 MPa	5510 - 6380 PSI
Tensile Modulus	ASTM D 638	1790 - 1980 MPa	260 - 287 KSI
Elongation at Break (%)	ASTM D 638	14 - 22 %	14 - 22 %
Flexural Strength	ASTM D 790	52-71 MPa	7540 - 10300 PSI
Flexural Modulus	ASTM D 790	1520 - 2070 MPa	220 - 300 KSI
Impact Strength (Notched Izod)	ASTM D 256	35 - 52 J/m	0.66 - 0.98 ft-lb/in
Heat Deflection Temperature	ASTM D 648		
	@ 66 PSI	62 °C	144 °F
	@ 264 PSI	54 °C	129 °F

\* Dp/Ec values are the same on all solid-state laser SLA<sup>®</sup> systems.



3D Systems Corporation  
333 Three D Systems Circle  
Rock Hill, SC 29730 U.S.A.

Tel: 803.326.4080  
Toll-free: 800.889.2964  
Fax: 803.324.8810

moreinfo@3dsystems.com  
www.3dsystems.com  
NASDAQ: TDSC

Warranty/Disclaimer: The performance characteristics of these products may vary according to product application, operating conditions, material combined with, or with end use. 3D Systems makes no warranties of any type, express or implied, including, but not limited to, the warranties of merchantability or fitness for a particular use.

© 2008 by 3D Systems, Inc. All rights reserved. Specifications subject to change without notice. The 3D logo, Accura and SLA are registered trademarks of 3D Systems, Inc.

PN 70718 Issue Date - April 08

# ABS-M30

Production-Grade Thermoplastic for  
Fortus 3D Production Systems



ABS-M30 is up to 25-70 percent stronger than standard Stratasys ABS and is an ideal material for conceptual modeling, functional prototyping, manufacturing tools, and end-use-parts. ABS-M30 has greater tensile, impact, and flexural strength than standard ABS. Layer bonding is significantly stronger than that of standard ABS, for a more durable part. This results in more realistic functional tests and higher quality parts for end use. When combined with a Fortus® 3D Production System, ABS-M30 gives you Real Parts™ that are stronger, smoother, and with better feature detail.

Mechanical Properties <sup>1</sup>	Test Method	English	Metric
Tensile Strength (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	5,200 psi	36 MPa
Tensile Modulus (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	350,000 psi	2,400 MPa
Tensile Elongation (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	4%	4%
Flexural Strength (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D790	8,800 psi	61 MPa
Flexural Modulus (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D790	336,000 psi	2,300 MPa
IZOD Impact, notched (Method A, 23°C)	ASTM D256	2.6 ft-lb/in	139 J/m
IZOD Impact, un-notched (Method A, 23°C)	ASTM D256	5.3 ft-lb/in	283 J/m

Thermal Properties <sup>2</sup>	Test Method	English	Metric
Heat Deflection (HDT) @ 66 psi, 0.125" unannealed	ASTM D648	204°F	96°C
Heat Deflection (HDT) @ 264 psi, 0.125" unannealed	ASTM D648	180°F	82°C
Vicat Softening Temperature (Rate B/50)	ASTM D1525	210°F	99°C
Glass Transition (T <sub>g</sub> )	DSC (SSYS)	226°F	108°C
Coefficient of Thermal Expansion (flow)	ASTM E831	4.9E-05 in/in/°F	8.82E-05 mm/mm/°C
Coefficient of Thermal Expansion (xflow)	ASTM E831	4.7E-05 in/in/°F	8.46E-05 mm/mm/°C
Melt Point	-----	Not Applicable <sup>3</sup>	Not Applicable <sup>3</sup>

Electrical Properties <sup>4</sup>	Test Method	Value Range
Volume Resistivity	ASTM D257	4.0x10e14 - 5.0x10e13 ohms
Dielectric Constant	ASTM D150-98	2.9 - 2.7
Dissipation Factor	ASTM D150-98	.0052 - .0049
Dielectric Strength	ASTM D149-09, Method A	370 - 71 V/mil

Other <sup>2</sup>	Test Method	Value
Specific Gravity	ASTM D792	1.04
Flame Classification	UL94	HB (0.09", 2.50 mm)
Rockwell Hardness	ASTM D785	109.5
UL File Number	-----	E345258

System Availability	Layer Thickness Capability	Support Structure	Available Colors
Fortus 360mc	0.013 inch (0.330 mm)	Soluble Supports	<input type="checkbox"/> Ivory
Fortus 400mc	0.010 inch (0.254 mm)		<input type="checkbox"/> White
Fortus 900mc	0.007 inch (0.178 mm)		<input checked="" type="checkbox"/> Black
	0.005 inch (0.127 mm) <sup>5</sup>		<input checked="" type="checkbox"/> Dark Grey
			<input checked="" type="checkbox"/> Red
			<input checked="" type="checkbox"/> Blue

The information presented are typical values intended for reference and comparison purposes only. They should not be used for design specifications or quality control purposes. End-use material performance can be impacted (+/-) by, but not limited to, part design, end-use conditions, test conditions, etc. Actual values will vary with build conditions. Tested parts were built on Fortus 400mc @ 0.010" (0.254 mm) slice. Product specifications are subject to change without notice.

The performance characteristics of these materials may vary according to application, operating conditions, or end use. Each user is responsible for determining that the Stratasys material is safe, lawful, and technically suitable for the intended application, as well as for identifying the proper disposal (or recycling) method consistent with applicable environmental laws and regulations. Stratasys makes no warranties of any kind, express or implied, including, but not limited to, the warranties of merchantability, fitness for a particular use, or warranty against patent infringement.

<sup>1</sup>Build orientation is on side long edge.

<sup>2</sup>Literature value unless otherwise noted.

<sup>3</sup>Due to amorphous nature, material does not display a melting point.

<sup>4</sup>All Electrical Property values were generated from the average of test plaques built with default part density (solid). Test plaques were 4.0 x 4.0 x 0.1 inches (102 x 102 x 2.5 mm) and were built both in the flat and vertical orientation. The range of values is mostly the result of the difference in properties of test plaques built in the flat vs. vertical orientation.

<sup>5</sup>0.005 inch (0.127 mm) layer thickness not available for Fortus 900mc.

**Stratasys | [www.stratasys.com](http://www.stratasys.com) | [info@stratasys.com](mailto:info@stratasys.com)**

7665 Commerce Way  
Eden Prairie, MN 55344  
+1 888 480-3548 (US Toll Free)  
+1 952 937-3000 (Intl)  
+1 952 937-0070 (Fax)

2 Holtzman St.,  
Science Park, PO Box 2496  
Rehovot 76124, Israel  
+972 74 745-4000  
+972 74 745-5000 (Fax)

Local Street Address  
City, State, Zip  
Phone #  
Fax #

©2013 Stratasys Inc. All rights reserved. Stratasys, FDM, Fortus and Finishing Touch are registered trademarks of Stratasys Inc. FDM Technology, Fused Deposition Modeling, Fortus 200mc, Fortus 250mc, Fortus 360mc, Fortus 400mc, Fortus 900mc, Insight, Control Center, FDM Team, Smart Supports, SR-30, SR-100, ABSplus, ABS-ESD7, and TouchWorks are trademarks of Stratasys, Inc. \*ULTEM is a trademark of SABIC Innovative Plastics IP BV. All other trademarks are the property of their respective owners, and Stratasys assumes no responsibility with regard to the selection, performance, or use of these non-Stratasys products. Product specifications subject to change without notice. Printed in the USA. FortusABSM30MaterialSpecSheet-US-1013



## Safety Data Sheet

according to Regulation (EC) No 1907/2006 (REACH),  
GHS Rev 04 (2011): US, OSHA, CMA, ANSI

### VisiJet® PXL Core

Revision Date: 22 March, 2013

#### 1. IDENTIFICATION OF THE SUBSTANCE/PREPARATION AND OF THE COMPANY/UNDERTAKING

**1.1 Identification of the substance or preparation:** VisiJet® PXL Core

**1.2 Use of the substance / preparation:** For use with ZPrinter® 3D inkjet printers

**1.3 Company/undertaking identification:**

3D Systems, Inc.  
333 Three D Systems Circle  
Rock Hill, South Carolina U.S.A.  
Phone: 803.326.3900 or  
Toll-free Phone: 800.793.3669  
800.424.9300 - Chemtrec

3D Systems Europe Ltd.  
Mark House, Mark Road  
Hemel Hempstead  
Herts HP2 7  
United Kingdom  
Phone: +44 144-2282600  
703.527.3887 - Chemtrec (U.S.)

#### 2. HAZARDS IDENTIFICATION

**2.1 Classification:**

Not classified according to GHS, Regulation (EC) No. 1272/2008, HazCom 2012.

**2.2 Label Elements**

Regulation (EC) No, 1272/2008:

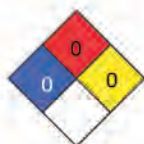
Hazard pictograms and signal word: None

Hazard statements: None

**Precautionary statements:**

When mixed with water, this material hardens. **DO NOT** attempt to make a cast enclosing any part of the body using this material.

P232: Protect from moisture  
P402: Store in a dry place



NFPA Ratings  
0 = Minimal  
1 = Slight  
2 = Moderate  
3 = Serious  
4 = Severe

#### Hazardous Materials Identification System

(HMIS):

(Degree of hazard: 0 = low,  
4 = extreme);

Health 0  
Flammability 0  
Physical Hazards 0

#### 3. COMPOSITION/INFORMATION ON INGREDIENTS

**3.1 Preparation related information**

**Description:** Mixture

**3.2 Hazard ingredients:**

Chemical name	CAS-No	EC-No	%	Classification	
				Regulation (EC) 1272/2008	Regulation 67/548/EEC, 1999/45/EC
Calcium sulfate hemihydrate	10034-76-1	231-900-3	80-90		



## Safety Data Sheet

according to Regulation (EC) No 1907/2006 (REACH),  
GHS Rev 04 (2011): US, OSHA, CMA, ANSI

### VisiJet® PXL Core

Revision Date: 22 March, 2013

#### 4. FIRST AID MEASURES

**4.1 In case of inhalation:** Move affected person to fresh air. If respiratory irritation occurs, seek medical attention immediately.

**4.2 In case of skin contact:** Flush skin with plenty of soap and water.

**4.3 In case of eye contact:** Flush eyes with plenty of water.

**4.4 In case of ingestion:** If ingested, drink plenty of water. Do not induce vomiting.

#### 5. FIRE-FIGHTING MEASURES

**5.1. Suitable extinguishing media:** Water mist, dry chemical, carbon dioxide, or appropriate foam.

**5.2. Special exposure hazards arising from the substance or preparation itself, combustion products, resulting gases:** Thermal decomposition products can include sulphur oxides, calcium oxide, CO<sub>2</sub> and CO.

#### 6. ACCIDENTAL RELEASE MEASURES

**6.1. Personal precautions:** Avoid dust formation. Do not breathe vapors/mist/gas.

**6.2. Environmental precautions:** Avoid discharge to sewer system.

**6.3. Methods for cleaning up:** Sweep up. Place all waste in an appropriate container for disposal.

#### 7. HANDLING AND STORAGE

**7.1 Handling:** Provide adequate ventilation during dust formation.

**7.2 Storage:** Store sealed in the original container at room temperature. Keep this material in a cool, dry, well-ventilated place.

#### 8. EXPOSURE CONTROLS / PERSONAL PROTECTION

##### 8.1 Exposure limit values:

General Product Information: No occupational exposure limits (PEL/TWA) have been established for this product.  
Component Analysis:

Component	Component Manufacturer IEL (Internal Exposure Limit)
Calcium sulphate hemihydrate	6mg/m <sup>3</sup>

##### 8.2 Exposure controls

**Technical measures to prevent exposure:** Use local exhaust ventilation.

**Instructual measures to prevent exposure:** When using, do not eat, drink or smoke. Wash hands after handling and before eating, smoking and using the lavatory and at the end of the day.

##### Personal protection equipment:

**Hand protection:** Use impervious nitrile gloves.

**Eye protection:** Wear safety glasses or chemical goggles.

**Body protection:** Use apron and closed shoes.



# Safety Data Sheet

according to Regulation (EC) No 1907/2006 (REACH),  
GHS Rev 04 (2011): US, OSHA, CMA, ANSI

## VisiJet® PXL Core

Revision Date: 22 March, 2013

### 9. PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES

#### 9.1 Appearance:

**Physical state:** Powder

**Color:** white

**Odor:** mild

#### 9.2 Important health, safety and environmental information

<b>pH (20 °C):</b>	NA
<b>Melting point/range (°C):</b>	1450°C
<b>Boiling point/range (°C):</b>	NA
<b>Flash point (°C):</b>	NA
<b>Ignition temperature (°C):</b>	NA
<b>Vapour pressure (°C):</b>	NA
<b>Density (g/cm<sup>3</sup>):</b>	2.6-2.7
<b>Bulk density (kg/m<sup>3</sup>):</b>	NA
<b>Water solubility (20°C in g/l):</b>	0.83% (3°C)
<b>Viscosity, dynamic (mPa s):</b>	NA
<b>Dust explosion hazard:</b>	NA
<b>Explosion limits:</b>	NA

### 10. STABILITY AND REACTIVITY

**10.1 Conditions to avoid:** Avoid wet/humid environment. Avoid dust formation.

**10.2 Materials to avoid:** Oxidizing materials, acids, strong bases, water, high humidity.

**10.3 Hazardous decomposition products:** Sulphur oxides, calcium oxide, carbon dioxide and carbon monoxide can be released at high temperatures or upon burning.

### 11. TOXICOLOGICAL INFORMATION

**11.1 Toxicokinetics, metabolism and distribution:** NA

**11.2 Acute effects (toxicity tests)**

Component	LD <sub>50</sub> Oral	LD <sub>50</sub> Dermal
Calcium sulphate hemihydrate	> 5000mg/kg (rats)	NA

#### 11.3 General remarks:

Carcinogenicity: None of this product's components are listed by ACGIH, IARC, OSHA, NIOSH, or NTP.

### 12. Ecological information

**12.1 Ecotoxicity:** The aquatic toxicity of the product is unknown. No data are available for the components of this product.

**12.2 Mobility:** No information available for product.

**12.3 Persistence and degradability:** No information available for product.

**12.4 Results of PBT assessment:** No information available for product

**12.5 Other adverse effects:** No information available for product



# Safety Data Sheet

according to Regulation (EC) No 1907/2006 (REACH),  
GHS Rev 04 (2011): US, OSHA, CMA, ANSI

## VisiJet® PXL Core

Revision Date: 22 March, 2013

### 13. DISPOSAL CONSIDERATIONS

**Appropriate disposal / Product:** Reduce waste by attempting to utilize product completely. Dispose of this container and its contents in accordance with all local, state, and federal regulations.

### 14. TRANSPORT INFORMATION

**14.1 Land transport (ADR/RID/GGVSE):** Not regulated

**14.2 Sea transport (IMDG-Code/GGVSee):** Not regulated

**14.3 Air transport (ICAO-IATA/DGR):** Not regulated

### 15. REGULATORY INFORMATION

#### 15.1 EU regulations

EINEC/ELINCS/NLP: All materials are listed

REACH Annex XVII: None listed

#### 15.2. US FEDERAL

TSCA: All materials are listed on the TSCA Inventory or are not subject to TSCA requirements:

California Proposition 65: This product does not contain chemicals which are known to the state of California to cause cancer, birth, or any other reproductive defects.

### 16. OTHER INFORMATION

SDS Creation Date: ..... March 22, 2013

SDS Revision #: ..... A

SDS Revision Date: ..... NA

Reason for Revision: ..... Release

[www.3dsystems.com](http://www.3dsystems.com)

800.793.3669 (Toll-free in the US GMT-07:00; N. America, Mon – Fri, 6:00 a.m. to 6 p.m.)

803.326.3900 (Outside the U.S. GMT-07:00; N. America, Mon – Fri, 6:00 a.m. to 6 p.m.)

+44 144-2282600 (Europe GMT+01:00; Mon – Fri, 08:00 a.m. - 17:00 p.m. MEZ)

**DISCLAIMER OF LIABILITY:** The following supersedes any related provision in your company's forms, letters, and agreements from, by or with 3D Systems Corporation. 3D Systems, Inc. makes no warranty whether expressed or implied, including warranties of merchantability or of fitness for a particular purpose for this product. No statements or recommendations contained in the product literature are to be construed as inducements to infringe any relevant patent now or hereafter in existence. Under no circumstances shall 3D Systems, Inc. be liable for incidental, consequential, or other damages from alleged negligence, breach of warranty, strict liability or any other theory, arising out of the use or handling of this product. The sole liability of 3D Systems, Inc. for any claims arising out of the manufacture, use or sale of its products shall be for the buyer's purchase price.

The contents of this safety data sheet are subject to change without notice. 3D Systems, Inc. recommends that you periodically check [www.3dsystems.com](http://www.3dsystems.com) to make sure you are using the most current safety data sheet.

© Copyright 2013 by 3D Systems, Inc. All rights reserved. The 3D logo, VisiJet and ZPrinter are registered trademarks of 3D Systems, Inc.

The logo for Shapeways, featuring the word "shapeways" in a lowercase, sans-serif font. The letter "y" is stylized with a blue starburst or asterisk shape at its top right.

## Stainless Steel Specifications

Alloy Family:	420 SS+ Bronze (40% bronze)
UTS:	99 KSI (682 MPa)
Yield:	66 KSI (455 MPa)
Modulus:	21.4 MPSI (147 GPa)
Elongation:	2.30%
Hardness:	20-25 HRc

You can machine it, drill and tap it, weld it, and even RAM or wire EDM it. A machinist evaluated the material as tough enough to need a carbide bits to mill or drill it. There are customers who printed turbine impellers and run them at 3500 rpms for testing purposes.

## Material Safety Data Sheet

Page 1 of 5

Material Name: VisiJet SR 200, ProPlast, Navy, TechPlast Plastic Material

**I. CHEMICAL PRODUCT AND COMPANY IDENTIFICATION**

**Product/Trade Name:** VisiJet® SR 200 Plastic Material  
**Chemical Family:** Organic mixture  
**Product Use:** For use in the 3D SD, HD and HD+ Production Modeling Systems

Manufacturer:



Manufacturer Contact	3D Systems, Inc. 333 3D Systems Circle Rock Hill, South Carolina 29730 U.S.A.
For Information	Toll-free Phone: 800.793.3669
Emergency	800.424.9300 - Chemtrec

**Hazardous Materials Identification System (HMIS):**

(Degree of hazard: 0 = low, 4 = extreme):

Health 2  
 Flammability 1  
 Physical Hazards 1

**Personal Protection:**

Skin, eye protection

**II. COMPOSITION INFORMATION**

CAS #	Component	Percent
109-16-0	Triethylene glycol dimethacrylate ester	45% – 55%
--	Urethane acrylate polymer	35% – 45%
39420-45-6	Polypropylene Glycol Monomethacrylate	1% – 5%

**Product Information**

This product is considered to be hazardous (irritant, sensitizer) according to 29CFR 1910.1200 (Hazard Communication Standard).

**III. HAZARDS IDENTIFICATION****Emergency Overview**

This product is irritating to the eyes, respiratory tract and skin. Avoid contact with eyes and skin. Do not breathe fumes or spray. Inhibitor depletion caused by exposure to heat, radiation or oxidizers can cause spontaneous polymerization generating heat and pressure.

**Potential Health Effects:**

**Eyes:** Can cause irritation consisting of redness, swelling and pain.  
**Skin:** Can cause irritation or other allergic reactions, including redness and/or swelling.  
**Inhalation:** Inhalation causes respiratory irritation.  
**Ingestion:** Ingestion can cause nausea, diarrhea and/or stomach pain.  
**Chronic:** Can cause an allergic skin reaction with repeated or prolonged exposure consisting of redness, swelling and/or rash (urticaria).

**Medical Conditions Aggravated by Exposure**

Could irritate an existing dermatitis or respiratory condition.

**IV. FIRST AID MEASURES**

**Skin contact:** Immediately flush skin with plenty of soap and water. Remove contaminated clothing and shoes. Get medical attention if symptoms occur. Wash clothing before reuse.  
**Eye contact:** Immediately flush eyes with plenty of water for at least 15 minutes. Get medical attention if irritation persists. Avoid exposure to UV and other light sources.  
**Inhalation:** Move affected person to fresh air. In case of asphyxia, initiate artificial respiration immediately. If breathing is difficult, give oxygen. Get medical attention immediately.  
**Ingestion:** Ingestion is unlikely. However, if large quantities are swallowed, get medical attention and, if directed by medical personnel, induce vomiting immediately. Never give anything by mouth to an unconscious person.

**Notes to Physician**

# Material Safety Data Sheet

**Material Name: VisiJet SR 200, ProPlast, Navy, TechPlast Plastic Material**

Allergic dermatitis in susceptible individuals may be delayed. It may appear after weeks or even months of frequent and prolonged contact.

## V. FIRE FIGHTING MEASURES

Flash Point: NA  
Upper Flammable Limit (UFL): NA  
Auto Ignition: NA  
Method Used: NA  
Lower Flammable Limit (LFL): NA  
Rate of Burning: NA



NFPA Ratings  
0 = Minimal  
1 = Slight  
2 = Moderate  
3 = Serious  
4 = Severe

General Fire Hazards: Inhibitor depletion caused by exposure to heat, radiation or oxidizers can cause spontaneous polymerization generating heat and pressure.  
Hazardous Combustion Products: Thermal decomposition products can include CO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub> and smoke.  
Extinguishing Media: Use water mist, dry chemical, carbon dioxide, or chemical foam. Avoid the use of a stream of water to control fire since frothing can occur.  
Fire Fighting Equipment/Instructions: Wear full protective clothing, including helmet, self-contained positive-pressure or pressure-demand breathing apparatus, protective clothing and facemask. Move container from area if it can be done without risk. Cool containers with water spray. Do not use high-volume water jet. Avoid inhalation of material or combustion by-products.

## VI. ACCIDENTAL RELEASE MEASURES

Containment Procedures: Stop the flow of material, if this is without risk. Ventilate contaminated area. Eliminate sources of ignition. Do not release material or contaminated water into drains, soil or surface waters.  
Clean-Up Procedures: Wear appropriate protective equipment and clothing. Absorb spillage with non-combustible absorbent materials. Place all waste in an appropriate container for disposal.  
Evacuation Procedures: Keep unnecessary personnel away.  
Special Procedures: NA

## VII. HANDLING AND STORAGE

Handling Procedures: Provide adequate ventilation. Avoid contact with skin and eyes. Do not breathe vapors or mist.  
Storage Procedures: Store sealed in the original container at room temperature. Keep this material indoors in a cool, dry, well-ventilated place. Store out of direct sunlight or UV light sources.  
Storage Temperature: 0 °C – 35 °C / 32 °F – 95 °F

## VIII. EXPOSURE CONTROLS/PERSONAL PROTECTION

### Exposure Guidelines

No occupational exposure limits have been established.

### Engineering Controls

Ventilation must effectively remove any vapors.

### PERSONAL PROTECTIVE EQUIPMENT

Eyes/Face: Wear chemical goggles or face shield.  
Skin: Use impervious gloves and apron.  
Respiratory: If ventilation cannot effectively keep vapor concentrations below established limits, appropriate certified respiratory protection must be provided.  
General: An eye wash fountain and safety shower are recommended.

# Material Safety Data Sheet

Material Name: **VisiJet SR 200, ProPlast, Navy, TechPlast Plastic Material**

## IX. PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES

Appearance .....	Colorless soft solid (Natural) Blue colored soft solid Grey colored soft solid	Odor .....	Acrylate
Physical State .....	Soft solid to paste	PH .....	NA
Vapor Pressure .....	NA	Vapor Density .....	NA
Boiling Point .....	NA	Melting/Freezing Point .....	55 °C – 65 °C (131 °F – 149 °F)
Solubility (H <sub>2</sub> O) .....	Insoluble @ 20°C (68 °F)	Specific Gravity .....	1 – 1.05
Percent Volatile .....	NA	Molecular Weight .....	NA

## X. CHEMICAL STABILITY AND REACTIVITY

Chemical Stability:	Stable under normal conditions of handling, use and transportation.
Conditions to Avoid:	Avoid exposure to heat, sunlight and UV light.
Incompatibility:	Oxidizing materials, strong acids and strong bases.
Hazardous Decomposition:	Thermal decomposition products can include CO <sub>2</sub> , CO, NO <sub>x</sub> , and smoke.
Hazardous Polymerization:	Can occur, see sections III and V.

## XI. TOXICOLOGICAL INFORMATION

### Acute and Chronic Toxicity

A: General Product Information: No data available.

B: Component Analysis - LD50/LC50: No data available.

Component	Oral LD <sub>50</sub>	Dermal LD <sub>50</sub>	Inhalation LC <sub>50</sub>	Irritation	Sensitization
Triethylene glycol dimethacrylate ester	4.49 mg/Kg (rats)	>2.0 mL/Kg (rabbits)	2 mg/L (rats)	Minimally irritating to eyes and skin (rabbits)	Sensitizer (guinea pigs)
Polypropylene Glycol Monomethacrylate	29.1 mg/Kg (rat)	20 mL/Kg (rabbit)	>5000 mg/m <sup>3</sup> (rats)	Irritating to eyes (rabbits)	No data
Urethane acrylate resin	No data				

### Carcinogenicity

A: General Product Information: None.

B: Component Carcinogenicity: None of this product's components are listed by ACGIH, IARC, OSHA, NIOSH, or NTP

## XII. ECOLOGICAL INFORMATION

### Ecotoxicity

A: General Product Information: The ecological assessment of this material is based on an evaluation of its components. This product is toxic to aquatic organisms and could cause long-term adverse effects in the aquatic environment.

B: Component Analysis - Ecotoxicity - Aquatic Toxicity: The urethane acrylate in this product is toxic to aquatic organisms and could cause long-term adverse effects in the aquatic environment.

Environmental Fate: No information available for product.

## XIII. DISPOSAL CONSIDERATIONS

### Waste Disposal Instructions

Do not contaminate drains, soil or surface waters with the material or its container. Avoid disposal. Attempt to utilize product completely. Dispose of in compliance with all applicable regulations. Prior to disposal of unused material, consult an approved waste disposal operative to ensure regulatory compliance.

# Material Safety Data Sheet

Material Name: VisiJet SR 200, ProPlast, Navy, TechPlast Plastic Material

## XIV. TRANSPORT INFORMATION

	US DOT	RID/ADR	IMDG	IATA	IMO	Canada TDG
Shipping Name	Not Regulated					
Hazard Class:						
UN Number:						
Packing Group:						

## XV. REGULATORY INFORMATION

### US FEDERAL

TSCA:..... All materials are listed on the TSCA Inventory or are not subject to TSCA requirements

SARA 302 EHS List (40 CFR 355 Appendix A):.....None listed

SARA 313 (40 CFR 372.65):.....None listed

CERCLA (40 CFR 302.4):.....None listed

### Component Analysis - Inventory

Component/CAS	EC #	EEC	CAN	TSCA	NLP
Triethylene glycol dimethacrylate ester (CAS# 109-16-0)	203-652-6	EINECS	DSL	Yes	No
Polypropylene glycol monomethacrylate (CAS# 1310-58-3)	Polymer	EINECS	DSL	Yes	No
Urethane acrylate resin	Polymer	EINECS	DSL	Yes	No

## XVI. ADDITIONAL INFORMATION

MSDS Creation Date:.... May 26, 2005

MSDS Revision #: ..... D

MSDS Revision Date:.... June 2012

Reason for Revision:..... Change logo and add bottles: ProPlast, Navy, TechPlast

For more information:.... [www.3dsystems.com](http://www.3dsystems.com)

800.793.3669 (Toll-free in the US GMT-07:00; N. America, Mon – Fri, 6:00 a.m. to 6 p.m.)

970.257.4700 (Outside the U.S. GMT-07:00; N. America, Mon – Fri, 6:00 a.m. to 6 p.m.)

+49 (0) 6151 357-357 (Europe GMT+01:00; Mon – Fri, 08:00 a.m. - 17:00 p.m. MEZ)

DISCLAIMER OF LIABILITY: The following supersedes any provision in your company's forms, letters, and papers. 3D Systems, Inc. makes no warranty whether expressed or implied, including warranties of merchantability or of fitness for a particular purpose for this product. No statements or recommendations contained in the product literature are to be construed as inducements to infringe any relevant patent now or hereafter in existence. Under no circumstances shall 3D Systems, Inc. be liable for incidental, consequential, or other damages from alleged negligence, breach of warranty, strict liability or any other theory, arising out of the use or handling of this product. The sole liability of 3D Systems, Inc. for any claims arising out of the manufacture, use or sale of its products shall be for the buyer's purchase price.

© Copyright 2012 by 3D Systems, Inc. All rights reserved. Subject to change without notice. VisiJet is a registered trademark of 3D Systems, Inc. 3D Systems, InVision, and the 3D Systems logo are trademarks of 3D Systems, Inc.

# Material Safety Data Sheet

**Material Name: VisiJet SR 200, ProPlast, Navy, TechPlast Plastic Material**

---

## Key/Legend

ACGIH = American Conference of Governmental Industrial Hygienists

CAS = Chemical Abstracts Service

CERCLA = Comprehensive Environmental Response, Compensation, and Liability Act

CFR = Code of Federal Regulations

CPR = Controlled Products Regulations

DOT = Department of Transportation

DSL = Domestic Substances List

EINECS = European Inventory of Existing Commercial Chemical Substances

EPA = Environmental Protection Agency

IARC = International Agency for Research on Cancer

IATA = International Air Transport Association

IDL = Ingredients Disclosure List

mg/Kg = milligrams per Kilogram

mg/L = milligrams per Liter

mg/m<sup>3</sup> = milligrams per Cubic Meter

MSHA = Mine Safety and Health Administration

NA = Not Applicable or Not Available

NIOSH = National Institute for Occupational Safety and Health

NJTSP = New Jersey Trade Secret Registry

NTP = National Toxicology Program

OSHA = Occupational Safety and Health Administration

SARA = Superfund Amendments and Reauthorization Act

STEL = Short Term Exposure Limit

TDG = Transport Dangerous Goods

TSCA = Toxic Substances Control Act

WHMIS = Workplace Hazardous Materials Information System.

## Material Safety Data Sheet

Page 1 of 5

Material Name: VisiJet® Crystal, EX 200 Plastic Material

**I. CHEMICAL PRODUCT AND COMPANY IDENTIFICATION**Product/Trade Name: **VisiJet® Crystal, EX 200 Plastic Material**

Chemical Family: Organic mixture

Product Use: For use in:  
ProJet® HD, HD+, SD Production Modeling Systems**Hazardous Materials Identification System (HMIS):**

(Degree of hazard: 0 = low, 4 = extreme):

Health **2**Flammability **0**Physical Hazards **0****Personal Protection:**

Skin, eye protection

Manufacturer:

**Product Information**

This product is considered to be an irritant according to 29CFR 1910.1200 (Hazard Communication Standard).

Manufacturer Contact	3D Systems, Inc. 333 3D Systems Circle Rock Hill, SC 29730 U.S.A.
For Information	Phone: 803.326.3900 or Toll-free Phone: 800.793.3669
Emergency	800.424.9300 - Chemtrec

**II. COMPOSITION INFORMATION**

CAS #	Component	Percent
proprietary	Urethane acrylate oligomers	20-40%
64401-02-1	Ethoxylated bisphenol A diacrylate	15-35%
42978-66-5	Tripropyleneglycol diacrylate	1.5-3

**III. HAZARDS IDENTIFICATION****Emergency Overview**

This product is irritating to the eyes, respiratory tract and skin. Avoid contact with eyes and skin. Do not breathe fumes or spray. Inhibitor depletion caused by exposure to heat, radiation or oxidizers can cause spontaneous polymerization generating heat and pressure.

**Potential Health Effects:**

Eyes: Can cause irritation consisting of redness, swelling and pain.

Skin: Can cause irritation or other allergic reactions, including redness and/or swelling.

Inhalation: Inhalation can cause respiratory irritation.

Ingestion: Ingestion can cause nausea, diarrhea and/or stomach pain.

Chronic: Can cause an allergic skin reaction with repeated or prolonged exposure consisting of redness, swelling and/or rash (urticaria).

**Medical Conditions Aggravated by Exposure**

Could irritate an existing dermatitis or respiratory condition.

**IV. FIRST AID MEASURES**

Skin contact: Immediately flush skin with plenty of soap and water. Remove contaminated clothing and shoes. Get medical attention if symptoms occur. Wash clothing before reuse.





# Material Safety Data Sheet

Material Name: VisiJet® Crystal, EX 200 Plastic Material

## IX. PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES

Appearance.....	Natural	Odor.....	Mild
Physical State.....	Soft solid to paste	PH.....	6-7 at 1:1 in Water
Vapor Pressure.....	<2Pa at 20°C	Vapor Density.....	NA
Boiling Point.....	>200°C	Melting/Freezing Point.....	55 °C – 65 °C (131 °F – 149 °F)
Solubility (H <sub>2</sub> O).....	Insoluble @ 20°C (68 °F)	Specific Gravity.....	1.1g/cm <sup>3</sup> at 25°C
Percent Volatile.....	NA	Molecular Weight.....	NA

## X. CHEMICAL STABILITY AND REACTIVITY

- Chemical Stability: Stable under normal conditions of handling, use and transportation.
- Conditions to Avoid: Avoid exposure to heat, sunlight and UV light.
- Incompatibility: Oxidizing materials, strong acids and strong bases.
- Hazardous Decomposition: Thermal decomposition products can include CO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub>, and smoke.
- Hazardous Polymerization: Can occur, see sections III and V.

## XI. TOXICOLOGICAL INFORMATION

### Acute and Chronic Toxicity

- A: General Product Information: No data available.
- B: Component Analysis

Component	Oral LD <sub>50</sub>	Dermal LD <sub>50</sub>	Inhalation LC <sub>50</sub>	Irritation	Sensitization
Urethane acrylate oligomers	>2000 mg/Kg	NA	NA	Irritating to eyes and skin	NA
Ethoxylated bisphenol A diacrylate	NA	NA	NA	Irritating to eyes and skin	NA
Tripropyleneglycol diacrylate	> 2000 mg/kg	NA	NA	Irritating to eyes and skin	Sensitizer

### Carcinogenicity

- A: General Product Information: None.
- B: Component Carcinogenicity: None of this product's components are listed by ACGIH, IARC, OSHA, NIOSH, or NTP

## XII. ECOLOGICAL INFORMATION

### Ecotoxicity

- A: General Product Information: The ecological assessment of this material is based on an evaluation of its components.
- B: Component Analysis - Ecotoxicity - Aquatic Toxicity: No information available.
- Environmental Fate: No information available for product.

## XIII. DISPOSAL CONSIDERATIONS

### Waste Disposal Instructions

Do not contaminate drains, soil or surface waters with the material or its container. Avoid disposal. Attempt to utilize product completely. Dispose of in compliance with all applicable regulations. Prior to disposal of unused material, 3D Systems Inc., recommends consulting and using an approved waste disposal operative to ensure regulatory compliance.



# Material Safety Data Sheet

Material Name: VisiJet® Crystal, EX 200 Plastic Material

## XIV. TRANSPORT INFORMATION

	US DOT	RID/ADR	IMDG	IATA	IMO	Canada TDG
Shipping Name	Not Regulated					
Hazard Class:						
UN Number:						
Packing Group:						

## XV. REGULATORY INFORMATION

### US FEDERAL

TSCA:.....All materials are listed on the TSCA Inventory or are not subject to TSCA requirements

SARA 302 EHS List (40 CFR 355 Appendix A):...1,4-Benzenediol, CAS: 123-31-9, < 0.2%

SARA 313 (40 CFR 372.65):.....None listed

CERCLA (40 CFR 302.4):.....1,4-Benzenediol, CAS: 123-31-9, < 0.2%

.....2-Propenoic acid, CAS 79-10-7, < 0.004%

### Component Analysis - Inventory

Component/CAS	EEC	CAN	TSCA
Urethane acrylate oligomers	NLP	DSL	Yes
Ethoxylated bisphenol A diacrylate	NLP	DSL	Yes
Tripropyleneglycol diacrylate	256-032-2	DSL	Yes

## XVI. ADDITIONAL INFORMATION

MSDS Creation Date:.... May 1, 2009

MSDS Revision #: ..... B

MSDS Revision Date:.... May 29, 2012

Reason for Revision:..... Change Logo, Update with Crystal

VisiJet Crystal, EX200 is USP Class VI certified for approved medical applications.

**DISCLAIMER:** It is the responsibility of each customer to determine that its use of any Class VI certified VisiJet® material is safe, lawful and technically suitable to the customer's intended applications. Customers should conduct their own testing to ensure that this is the case.

800.793.3669 (Toll-free in the US GMT-07:00; N. America, Mon – Fri, 6:00 a.m. to 6 p.m.)

803.326.3900 (Outside the U.S. GMT-07:00; N. America, Mon – Fri, 6:00 a.m. to 6 p.m.)

+44 144-2282600 (Europe GMT+01:00; Mon – Fri, 08:00 a.m. - 17:00 p.m. MEZ)

**DISCLAIMER OF LIABILITY:** The following supersedes any related provision in your company's forms, letters, and agreements from, by or with 3D Systems Corporation. 3D Systems Corporation makes no warranty, whether expressed or implied, including warranties of merchantability or of fitness for a particular purpose for this product. No statements or recommendations contained in the product literature are to be construed as inducements to infringe any relevant patent now or hereafter in existence. Under no circumstances shall 3D Systems Corporation be liable for incidental, consequential, special, or other damages from alleged negligence, breach of warranty, strict liability or any other theory, arising out of the manufacture, use, sale, or handling of this product. In no event shall the liability of 3D Systems Corporation for any claims arising out of the manufacture, use, handling, or sale of its products exceed an amount equal to the buyer's purchase price.

© Copyright 2012 by 3D Systems, Inc. All rights reserved. Subject to change without notice. The 3D logo, VisiJet and ProJet are registered trademarks of 3D Systems, Inc.



# Material Safety Data Sheet

Material Name: VisiJet<sup>®</sup> Crystal, EX 200 Plastic Material

---

## Key/Legend

ACGIH = American Conference of Governmental Industrial Hygienists

CAS = Chemical Abstracts Service

CERCLA = Comprehensive Environmental Response, Compensation, and Liability Act

CFR = Code of Federal Regulations

CPR = Controlled Products Regulations

DOT = Department of Transportation

DSL = Domestic Substances List

EINECS = European Inventory of Existing Commercial Chemical Substances

EPA = Environmental Protection Agency

IARC = International Agency for Research on Cancer

IATA = International Air Transport Association

IDL = Ingredients Disclosure List

mg/Kg = milligrams per Kilogram

mg/L = milligrams per Liter

mg/m<sup>3</sup> = milligrams per Cubic Meter

MSHA = Mine Safety and Health Administration

NA = Not Applicable or Not Available

NIOSH = National Institute for Occupational Safety and Health

NJTSR = New Jersey Trade Secret Registry

NTP = National Toxicology Program

OSHA = Occupational Safety and Health Administration

SARA = Superfund Amendments and Reauthorization Act

STEL = Short Term Exposure Limit

TDG = Transport Dangerous Goods

TSCA = Toxic Substances Control Act

WHMIS = Workplace Hazardous Materials Information System.





# POLYJET MATERIAL SPECIFICATIONS

## VeroWhitePlus

### Highlights

- Opaque white
- Rigid and durable
- Produces excellent fine feature detail
- Quickly and economically produces parts
- Available in two Z resolutions
  - PolyJet: 30µm (0.00118")
  - PolyJet HD: 16µm (0.00063")
- Also known as "PolyJet White" and "SC White"

### Applications

- Highly accurate presentation models
- Smaller parts with complex features
- Medical devices and components
- Electronic housings
- Suitable for a wide range of industries

## TYPICAL PHYSICAL PROPERTIES

Property	Test Method	English	Metric
Color/Appearance	Visual	White	White
Tensile Strength	ASTM D638	8,350 psi	58 MPa
Elongation at Break	ASTM D638	10% - 25%	10% - 25%
Modulus of Elasticity	ASTM D638	362,500 psi	2,500 MPa
Flexural Strength	ASTM D790	13,500 psi	93 MPa
Flexural Modulus	ASTM D790	392,500 psi	2,700 MPa
Izod Notched Impact	ASTM D256	0.47 ft-lb/in	25 J/m
Shore D Hardness	-	85 D	85 D
Heat Deflection Temperature	ASTM D648 @ 264 psi	118°F	48°C
	@ 66 psi	118°F	48°C



The material properties provided herein are for reference purposes only. Actual values may vary significantly as they are dramatically affected by part geometry, process parameters and material properties changing over time. Material specifications are subject to change without notice.

Copyright © 2015 Stratasys Direct, Inc.  
PolyJet Material Datasheet VeroWhitePlus 201502-1

## Material Data Sheet VeroClear RGD810

	ASTM	Units	Metric	Units	Imperial
Tensile Strength	D-638-03	MPa	50-65	psi	7250-9450
Elongation of break	D-638-05	%	10-25	%	10-25
Modulus of Elasticity	D-638-04	MPa	2000-3000	psi	290,000-435,000
Flexural Strength	D-790-03	MPa	75-110	psi	11000-16000
Flexural Modulus	D-790-04	MPa	2200-3200	psi	320,000-465,000
HDT, °C @ 0.45MPa	D-648-06	°C	45-50	°F	113-122
HDT, °C @ 1.82MPa	D-648-07	°C	45-50	°F	113-122
Izod Notched Impact	D-256-06	J/m	20-30	ft lb/inch	0.375-0.562
Water Absorption	D-570-98 24hr	%	1.1-1.5	%	1.1-1.5
Tg	DMA, E>>	°C	52-54	°F	126-129
Shore Hardness (D)	Scale D	Scale D	83-86	Scale D	83-86
Rockwell Hardness	Scale M	Scale M	73-76	Scale M	73-76
Polymerized Density	ASTM D792	g/cm <sup>3</sup>	1.18-1.19		
Ash content	USP281	%	0.02-0.06	%	0.02-0.06

