

## **ESTUDIO COMPARATIVO DE TECNOLOGÍAS DE MODELADO BASADO EN TRAZOS Y DE DEFORMACIÓN LIBRE EN LA GENERACIÓN DE CONCEPTOS DE PRODUCTO**

Jorge Alcaide-Marzal  
José Antonio Diego-Más  
Sabina Asensio-Cuesta  
Betina Piqueras-Fizman

*Departamento de Proyectos de Ingeniería. Universidad Politécnica de Valencia.*

### **Abstract**

Product design is a graphic media intensive activity. The implementation of CAD systems and computer graphics software represented a significant advance in embodiment and detail design stages. But no software has been developed yet to efficiently support conceptual design stage. CAD and graphic programs are still too rigid and restrictive to be used with creativity and freshness. Till now, studies have shown that the use of traditional sketching prove to be more efficient in this stage. Current research focuses on several issues related to freehand drawing: reconstruction of 3D shapes from 2D sketches interpretation, production of 3D geometry via Sketch Based Modeling Interfaces (SMBI) and use of free deformation (digital sculpting). This work presents a comparative experiment analyzing SMBI and free deformation software in terms of similarity with traditional sketching techniques, connectivity with subsequent process design stages via interchange file formats and easiness of implementation into the conceptual design phase.

**Keywords:** *Digital Sculpting; Computer Aided Design; Conceptual Design*

### **Resumen**

El diseño de productos es una actividad que hace un uso intensivo de medios de comunicación gráfica. La introducción de los sistemas CAD y otras herramientas de representación digital supuso un avance esencial en la fase de diseño de detalle. Sin embargo, el ordenador sigue sin aportar una herramienta eficiente en las primeras etapas del proceso de diseño, en las que resulta ser demasiado rígido. Los estudios hasta la fecha siguen dando prevalencia al empleo del boceto tradicional en esta etapa. Los trabajos de investigación que buscan aportar soluciones en esta fase se centran en varios frentes relacionados con el uso de papel y lápiz: la interpretación de bocetos a mano para construir formas 3D, la generación de geometría 3D mediante trazo (Sketch Based Modeling Interfaces, SMBI) y la deformación libre (digital sculpting, DS). En este trabajo se realiza un análisis de las propuestas existentes en la actualidad mediante un experimento comparativo entre herramientas tipo SBMI y DS, en términos de posibilidad de uso en la fase conceptual, similitud con técnicas de bocetado tradicional y facilidad de conexión con etapas posteriores del proceso de diseño, mediante el posible uso de formatos de intercambio.

**Palabras clave:** *Modelado Digital; Diseño Asistido por Ordenador; Diseño Conceptual*

## 1. Introducción

El proceso de diseño de productos es una actividad que emplea gran cantidad de información visual, desde los primeros bocetos hasta los ficheros digitales de fabricación. El aspecto formal de un producto forma parte intrínseca de su naturaleza y constituye en muchas ocasiones un elemento decisivo del juicio del potencial usuario. La información gráfica también permite recoger y comunicar características geométricas del producto

Esta circunstancia ha propiciado el desarrollo de herramientas cada vez más potentes que permiten generar y gestionar esa información, desde las fases de fabricación (CAM), en las que el ordenador encontró primeramente aplicación, hacia la fase de diseño de detalle y validación (CAD/CAE) (Tovey, 1989) (Ullman, Wood, & Craig, 1990), (Séquin, 2005), (Cross, 2008) (Prats, Lim, Jowers, Garner, & Chase, 2009).

Sin embargo, esta progresión desde las etapas finales del producto hacia las más tempranas ha encontrado siempre una barrera al acercarse al diseño puramente conceptual (Tovey, 1989), (Goel, 1995), (Lawson & Loke, 1997), (Séquin, 2005), (Robertson & Radcliffe, 2009). El trabajo del diseñador en esta etapa consiste en generar ideas. Las restricciones son mínimas porque todavía no hay nada decidido, y los medios empleados para trabajar deben responder a esta circunstancia. El boceto tradicional ha sido siempre la herramienta por excelencia en esta fase.

La causa de que hasta la fecha no exista una herramienta informática que dé apoyo efectivo al diseño conceptual reside en que el boceto como medio expresivo es mucho más flexible, libre e inmediato que el modelado por ordenador. Las aproximaciones al problema se han basado siempre en tratar de replicar el bocetado 2D de forma digital o en modificaciones de los sistemas CAD existentes para flexibilizar el modelado paramétrico. Numerosos estudios han comparado el trabajo de bocetado tradicional con el que se desarrolla con herramientas electrónicas. La mayoría de estos estudios se centran en el uso de programas orientados al diseño gráfico, mientras que otros emplean software de diseño asistido por ordenador (CAD), y en todos ellos se analiza el desempeño del diseñador a la hora de generar conceptos novedosos. En general, estos experimentos concluyen que el trabajo con papel y lápiz incentiva más la creatividad del diseñador que el empleo de software (Goel, 1995), (Warburton, 1996), (Bilda & Demirkan, 2003). Otros trabajos, sin embargo, apoyan el uso del ordenador en la fase conceptual del diseño y sostienen que puede potenciar la creatividad (Won, 2001), (Jonson, 2005). (Séquin, 2005).

Esta cuestión no es reciente. En (Van Dijk, 1995) es posible encontrar un conjunto de requerimientos que serían deseables en un sistema informático de apoyo al diseño conceptual, sintetizado a partir de diversas fuentes de la literatura sobre diseño en ingeniería. Algunas recomendaciones adicionales se pueden encontrar en (Verstijnen, Van Leeuwen, Goldschmidt, Hamel, & Hennessey, 1998).

Actualmente hay en marcha diversas líneas de trabajo que tratan de dar respuesta a este vacío existente en el conjunto de herramientas digitales de apoyo al diseño. Es posible consultar un estudio sobre algunas de las alternativas en (Cook & Agah, 2009) y también en (Olsen, Samavati, Sousa, & Jorge, 2009), en los que se describe el estado de la técnica de algunas tecnologías de modelado basado en trazos.

Algunas de estas líneas se centran en la interpretación de dibujos a mano para su posterior conversión a un formato 3D (Tovey, 1997), (Eggl, Hsu, Brüderlin, & Elber, 1997), (Tian, Masry, & Lipson, 2009), (Company, Contero, Conesa, & Piquer, 2004). En (Company, Piquer, Contero, & Naya, 2005) se realiza una revisión de la evolución de esta tecnología.

Siguiendo una filosofía parecida se han desarrollado propuestas que generan directamente geometría 3D a partir de trazos, en los que el volumen se va aportando trazo a trazo. (Van

Dijk, 1995), (Nealen, Igarashi, Sorkine, & Alexa, 2007)). Existen ya algunos programas disponibles, tales como Smooth Teddy, Fibermesh, Shape Shop, Easy Toy (Livesforce) o Archipelis. Un estudio sobre el uso de este tipo de software frente al de modelado tradicional (tipo 3D Studio o Maya) se puede consultar en (Machado, Gomes, & Walter, 2009).

Por último existe otra tendencia que propone la generación de volumen mediante deformación directa de un volumen inicial. (Cheutet et al., 2005) (J Pernot, Falcidieno, Giannini, & Leon, 2008). En este caso, los trazos ejercen una acción (generalmente de adición o sustracción de volumen) que permite ir conformando la geometría como si se estuviera esculpiendo. No existe por tanto un trazo bidimensional sobre el que se basa la construcción del volumen. En ocasiones la acción se ejerce por medio de un brazo articulado (Bordegoni & Cugini, 2005), (Gao & Gibson, 2006), aunque es posible emplear una simple tableta gráfica. Este software tiene ya desarrollo comercial y aplicación en el campo de la producción audiovisual digital (animación, cine, videojuegos). Entre otros, se puede citar ZBrush (Pixologic), Mudbox (Autodesk), 3D-Coat (Pilgway) o Modo (Luxology). En el terreno del diseño de productos, su uso es muy incipiente. Los estudios realizados hasta la fecha muestran resultados optimistas (Israel, Wiese, Mateescu, Zöllner, & Stark, 2009), (Kara, Shimada, & Marmalefsky, 2007), (Rahimian & Ibrahim, 2011).

Tanto los sistemas de modelado basados en trazos (Sketch Based Modeling Interfaces o SBMI) como los programas de escultura digital (DS) presentan flujos de trabajo con características muy cercanas a las del bocetado tradicional: la construcción de geometría se basa en gestos de tipo trazo, el uso de parámetros es mínimo o nulo, el diseñador tiene libertad creativa (puede proponer formas complejas sin restricciones impuestas por el software) y es muy sencillo variar los modelos para obtener alternativas diferentes. Por ello resulta interesante su consideración como herramientas de ayuda al diseño conceptual, cuestión que se explora en este trabajo.

## **2. Objetivos**

En este trabajo se compara el uso de programas de deformación libre frente a programas de modelado basado en trazo con el objetivo de establecer las fortalezas y debilidades de cada uno de ellos como potenciales herramientas de ayuda al diseño conceptual. El objetivo es determinar qué tipo de tecnología resulta más adecuada en el nivel de desarrollo actual de cara a su implantación como herramienta de bocetado tridimensional, así como identificar las ventajas y desventajas de cada enfoque.

## **3. Material y Métodos.**

El análisis se lleva a cabo en dos fases. En la primera de ellas se evalúan tres programas de cada clase, con objeto de contrastar el funcionamiento general de los mismos respecto al siguiente conjunto de requerimientos, extraído de (Van Dijk, 1995). El cumplimiento de dichos requerimientos por parte de los programas se evalúa mediante la medida de distintos parámetros, que se citan al lado de cada uno:

- 1) Sencilla y rápida introducción y modificación de información geométrica: Se mide mediante el tiempo de modelado y por comprobación directa durante el experimento..
- 2) Mantener una relación directa entre los gestos manuales y la generación de geometría: Se comprueba el número de accesos a comandos distintos de los gestos naturales de dibujo, principalmente acceso a menús y variación de la vista 3D.
- 3) Manejo de información imprecisa: no debe requerir datos numéricos para representar la geometría: Se mide el número de veces que se introducen datos numéricos.
- 4) Fácil cambio de nivel de detalle, para poder trabajar en ocasiones sobre el modelo completo y en otras sobre aspectos concretos de su diseño: Se establece una prueba en la que se debe modificar un detalle del diseño.
- 5) Facilidad de evaluar y comparar alternativas: Igual que (4) más una prueba de color.
- 6) Debe permitir la deformación libre de la geometría: Igual que (1).
- 7) Capacidad de emplear el modelo en fases posteriores del proceso de diseño: Se evalúa el resultado de exportar el modelo a un sistema CAD.

Las pruebas se llevan a cabo sobre los siguientes programas: ZBrush 4R3 (Pixologic), 3D-Coat 3.7 (Pilgway) y Autodesk Mudbox 2012 por la parte del esculpido digital; y Shape Shop B5, Easy Toy V2.0 (Livesforce) y Fibermesh por la parte del modelado basado en trazos. Se pretende barrer un espectro suficientemente amplio de programas para que el estudio comparativo resulte sustancioso. En este punto hay que hacer notar que la tecnología DS se puede considerar madura frente a la SBMI. Todos los programas mencionados en el primer grupo son comerciales y llevan años de desarrollo, mientras que el software del segundo grupo es más bien experimental y presenta cierta inestabilidad, salvo Easy Toy. No es objeto de este estudio comparar ambas tecnologías en cuanto a su desempeño como modeladores, sino en cuanto a su uso como herramienta de diseño conceptual.

**Figura 1: Modelos empleado como referencia para la prueba.**



Para evaluar cada programa en estos ítems se plantea una prueba a un grupo reducido de tres diseñadores industriales, cada uno de los cuales utilizará un software de cada tipo. La prueba consiste en el diseño conceptual de un secador de pelo, a nivel formal. En un tiempo máximo de 10 minutos se debe elaborar una propuesta que presente un mango ergonómico, un botón en la parte delantera de dicho mango y un motivo aerodinámico en el lateral. Para acotar el trabajo de los participantes, se muestra un modelo objetivo. Fuera ya del tiempo, se debe modificar la posición del botón y moverlo a la parte de atrás del mango y realizar pruebas en dos combinaciones de colores. Finalmente, el modelo se exporta y se analiza en

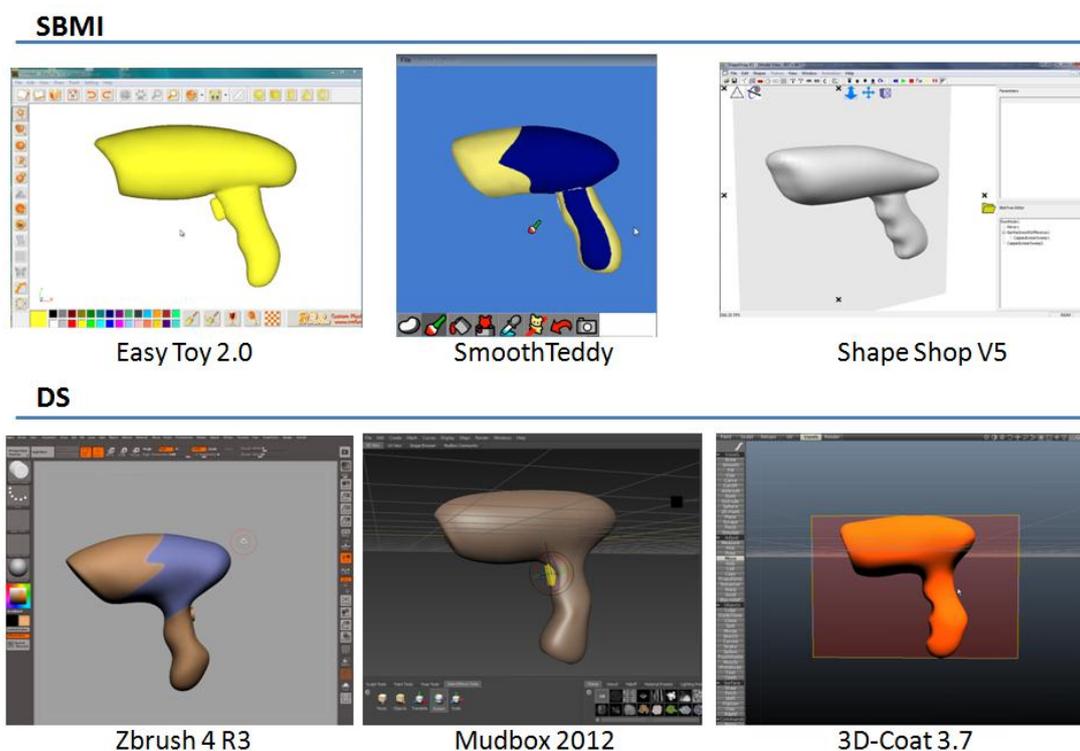
el software Meshlab, realizándose una importación a sólido desde SolidWorks 2011. Durante estas pruebas se anota el flujo de trabajo y se mide el tiempo de modelado y el tiempo de acceso a menús, así como las características de los ficheros generados.

Posteriormente se lleva a cabo una prueba de uso en la que participa un grupo de 11 alumnos del Máster en Ingeniería del Diseño de la UPV. Se emplea un software de cada tipo (ZBrush y SmoothTeddy). La mayor parte de los participantes conoce ZBrush, y recibe una sesión formativa del manejo de SmoothTeddy. En esta prueba se realizan tareas sencillas. Se pide elaborar un modelo orgánico (figura decorativa) en cada uno de los programas, tras lo cual se contesta una sencilla entrevista para conocer las impresiones de los participantes.

#### 4. Resultados

Siguiendo el patrón ofrecido, se generaron seis modelos, uno en cada programa, y se midieron las variables anteriormente descritas. A continuación se recogen los modelos (Figura 2) y los resultados obtenidos para cada uno de ellos.

Figura 2: Modelos generados en los distintos programas

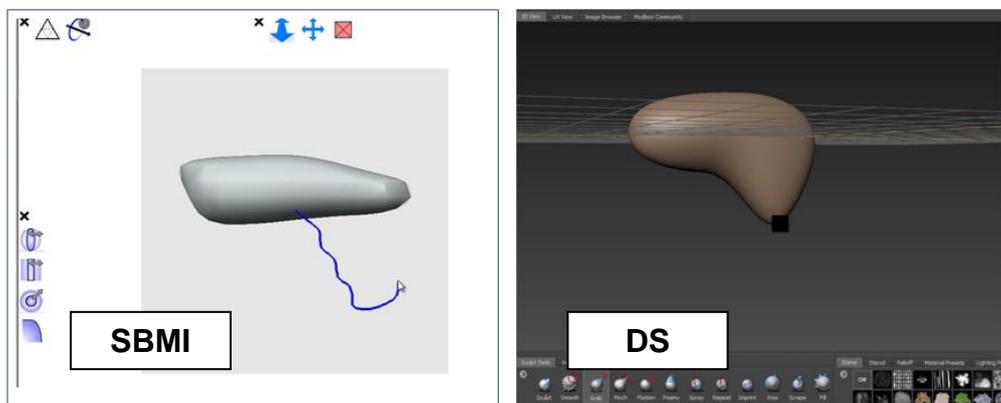


##### 4.1. Tiempo de modelado.

Los resultados de la primera prueba destacan principalmente una gran diferencia en cuanto al tiempo de elaboración de los modelos en un tipo y otro de software (Figura 4). El SBMI resulta mucho más rápido a la hora de generar las formas básicas, con una media de 2.77 minutos frente a los 6.45 de los programas DS. Dos trazos sencillos completados con una indicación de espesor permiten dar forma global al objeto. En el caso de los programas de deformación libre, en todos ellos se ha partido de una esfera que ha habido que conformar para obtener la forma básica, consumiendo mucho más tiempo. En este tipo de software existen otras estrategias propias de cada programa que permitirían acelerar este proceso en

algún caso, pero se acercaría a otro tipo de modelado y en este trabajo se han excluido para centrar el estudio en el esculpido puro.

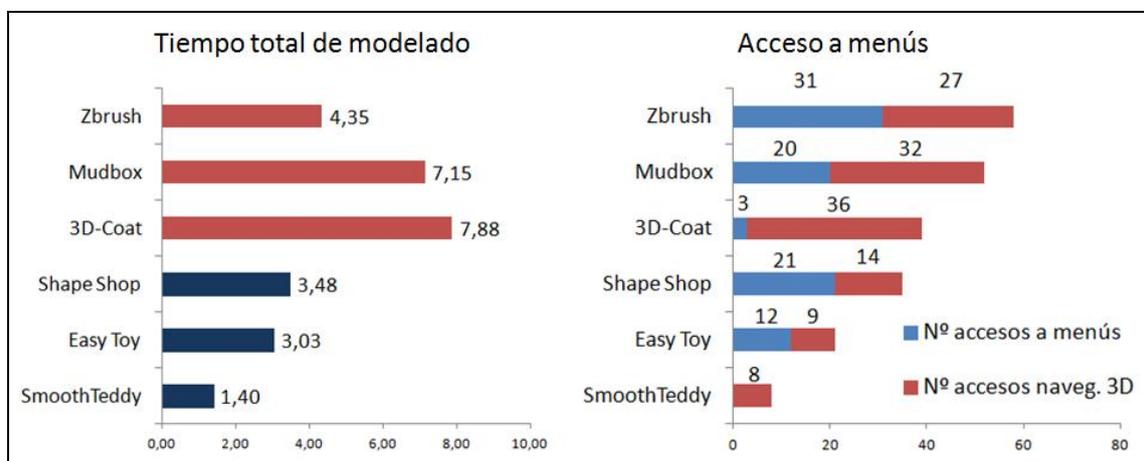
**Figura 3: Modelo SBMI frente a DS.**



#### 4.2. Predominancia de la acción “trazo”.

Los programas SBMI también han resultado más eficientes en este aspecto. El número de veces que es necesario reorientar el modelo para trabajar es sensiblemente menor, así como el acceso a menús para realizar operaciones. En algún caso, el gesto de trazar se extiende incluso a la aplicación de comandos como “Refinar la malla” o “unir dos mallas”. En este sentido, presentan una mayor relación entre los gestos manuales y la generación de geometría que los programas DS.

**Figura 4: Tiempo de modelado y accesos a menús.**



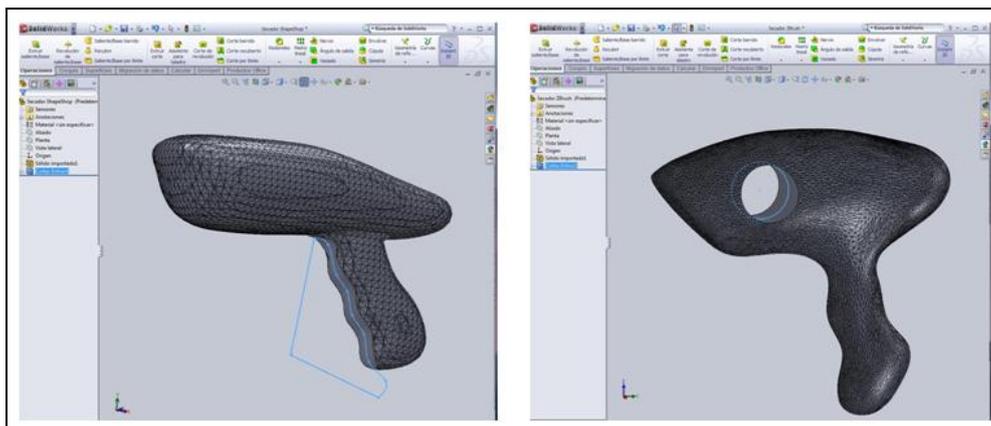
#### 4.3. Facilidad de generación de alternativas.

Casi todos los programas han pasado satisfactoriamente la prueba de variación de color y de modificación de la posición del botón. Shape Shop no permite colorear. Su herramienta para modificar la posición de las mallas también ha resultado algo imprecisa. En general, en este punto la precisión al modelar ha sido un problema para los programas SBMI. La baja densidad de las mallas que generan impide crear detalles, y sólo en el caso de Easy Toy era posible deformar la malla creada, por lo que modificar una alternativa para obtener otra es complicado. Además, los programas DS permiten disponer de varias alternativas a la vez en pantalla, lo que facilita la comparación de propuestas.

#### 4.4. Exportación del modelo.

Todos los programas salvo SmoothTeddy permiten exportar el modelo a OBJ. SmoothTeddy permite exportar a VRML, pero el fichero producido en la prueba resultó defectuoso. Todos los OBJ fueron convertidos a STL en Meshlab e importados a SolidWorks como sólidos, tras lo cual se les efectuó una operación de perforado. La Tabla 1 recoge los resultados obtenidos.

Figura 5. Exportación a SolidWorks y operación de prueba.



Como ya se ha comentado, los programas SBMI generan mallas muy ligeras, con bajo número de polígonos. Al modelar por trazos, colocan los polígonos donde se requieren, por lo que para conseguir la misma forma básica emplean menos caras. Los programas DS necesitan una densidad más elevada para transformar la malla inicial (una esfera en todos los casos) en la forma requerida sin que haya una fuerte distorsión de los polígonos. Por supuesto esto es evitable mediante el empleo de otras herramientas que permitan preparar una malla base específica para la forma a modelar, pero como se ha mencionado quedan excluidas de este estudio.

Tabla 1: Resultados de la prueba de exportación.

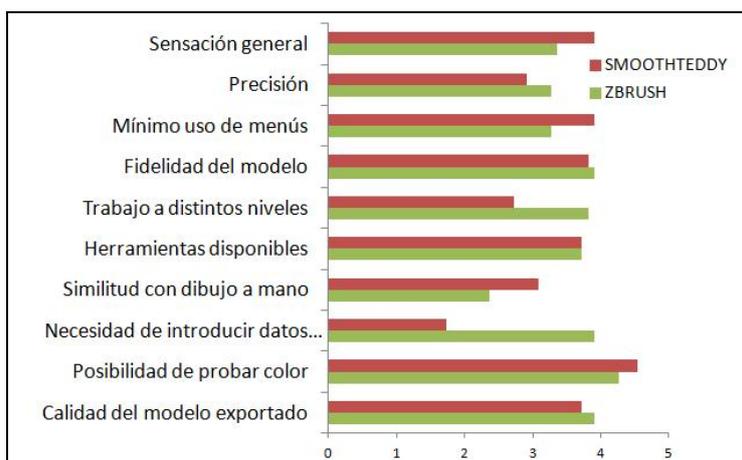
	DS			DS	SBMI			
	ZBrush	Mudbox	3D-Coat	MEDIA	Shape Shop	Easy Toy	SmoothTeddy	MEDIA
Tamaño de archivo (Mb)	2.9	33.8	0.7	12.4	0.1	0.1	2.8	1
Polígonos modelo	97.3k	394.7k	133.2k	208.4k	7.7k	3.7k	140k	50.4k
Tamaño de OBJ (Mb)	6.6	9.9	2.1	6.2	0.5	0.5	ERROR	0.5
Polígonos OBJ	193.4k	104.4k	118.4k	138.8k	7.7k	3.7k	-	5.7k
Importación a sólido	Correcta tras reducción	Correcta tras reducción	Correcta	100%	Correcta	Correcta	-	66%
Operación sólido	Correcta	Correcta	Correcta	100%	Correcta	Correcta	-	66%

A menor densidad más fácil es transformar la malla a sólido, por lo que los ficheros procedentes de Easy Toy y Shape Shop han causado menos problemas en esta prueba. De todas formas, los sólidos obtenidos presentan un facetado muy elevado en todos los casos, lo que exige un remodelado para utilizarse adecuadamente en fases de diseño de detalle.

#### 4.5. Prueba de uso.

Los resultados del análisis comparativo se complementaron con la prueba de uso realizada al grupo de estudiantes. El siguiente gráfico resume las respuestas obtenidas.

**Figura 6. Resultados de la prueba de uso.**



Los dos tipos de programa han recibido una valoración general similar. SmoothTeddy ha sido percibido como más intuitivo a primera vista y más sencillo de utilizar, aunque tras su uso los participantes manifestaron haberse desenvuelto mejor con ZBrush, consiguiendo con esta herramienta resultados más cercanos a los buscados. Así, ha sido puntuado como algo más preciso y capaz de generar modelos más fieles. En otros aspectos el modelado mediante trazos de SmoothTeddy ha resultado más amigable: Mucha menor interacción con menús, más parecido al dibujo a mano y una muy baja necesidad de recurrir al teclado para introducir datos.

El principal problema experimentado en el software SBMI es nuevamente la falta de control sobre la forma final. Los modelos se producen rápidamente, pero resulta complicado controlar la forma final o ajustarlos después. En general, se ve como positivo el uso de ambas tecnologías en el proceso de diseño, aunque la mayor parte de los participantes se inclina por la tecnología DS como herramienta habitual.

### 5. Conclusiones

A la vista de los resultados de la prueba, se ofrece una comparativa del desempeño de cada tipo de programa en los diferentes requerimientos planteados inicialmente:

- 1) *Sencilla y rápida introducción y modificación de información geométrica:* Los programas SBMI resultan más sencillos de manejar, más intuitivos y más rápidos, pero son peores a la hora de modificar y manipular las mallas creadas.
- 2) *Relación directa entre los gestos manuales y la generación de geometría:* Los programas SBMI requieren menos operaciones fuera de las gestuales, y la relación entre el trazo y la geometría generada es más directa.

3) *Manejo de información imprecisa*: no debe requerir datos numéricos para representar la geometría: Ambas tecnologías aparecen igualadas en este aspecto. Se percibe como más amigable el software SBMI.

4) *Fácil cambio de nivel de detalle*: En este punto es el software DS el que mejor trabaja. Los programas SBMI no permiten un alto nivel de detalle en el modelo.

5) *Facilidad de evaluar y comparar alternativas*: Ambos tipos de programa permiten realizar pruebas básicas de color con facilidad. Sin embargo, el software DS permite además realizar variaciones de la forma para generar diferentes alternativas desde una base común, así como presentar en pantalla varias alternativas a la vez. Además, el sistema de coloreado de los programas DS es en general más sofisticado.

6) *Debe permitir la deformación libre de la geometría*: Los programas DS son más eficientes en este aspecto. De los programas SBMI probados, únicamente Easy Toy presenta herramientas de deformación de la malla creada.

7) *Capacidad de emplear el modelo en fases posteriores del proceso de diseño*: Todos los programas probados permiten una exportación correcta y su uso como sólidos de referencia.

La comparativa presenta una evaluación muy igualada, con cierta ventaja de los programas DS. La principal baza del software SBMI es su relación directa con el dibujo manual y su rapidez de modelado de la forma general, mientras que queda muy atrás a la hora de trabajar con detalles y de deformar las mallas creadas, cuestiones mejor resueltas en los programas DS.

En el nivel de desarrollo actual, los programas SBMI existentes no parecen utilizables en el diseño de productos más que a nivel muy básico. Parece más probable que dentro de los programas DS se implemente alguna herramienta complementaria a las ya existentes que permita crear formas mediante trazos y posteriormente modificarlas con las herramientas de esculpido disponibles. Idealmente, esta herramienta permitiría realizar trazos sobre un plano seleccionado previamente, limpiar los trazos para dejar una forma 2D definitiva, modificar el trazo mediante puntos de control (al estilo Easy Toy) y decidir finalmente cómo dar volumen a dicho trazo. De hecho, una de las últimas actualizaciones de ZBrush incluye algo similar con líneas tipo spline en lugar de trazos. En todo caso, una herramienta así sería una evidente mejora a la vista de las ventajas que aporta el modelado basado en trazos.

En definitiva, aunque los programas SBMI presentan características muy adecuadas para el trabajo conceptual en 3D, los programas DS son en conjunto más completos a la hora de producir un modelo conceptual tridimensional. Es de esperar que ambas tecnologías converjan finalmente en un sistema que permita al diseñador generar conceptos en un entorno 3D de forma tan rápida y libre como si estuviera dibujando en papel.

Los autores son conscientes del reducido número de participantes en ambas pruebas. Esto, no obstante, es habitual en este tipo de estudios, encontrándose trabajos con 10 participantes (Stones & Cassidy, 2010) o incluso 2 (Won, 2001). Sin embargo, sería recomendable ampliar el estudio para trabajar con una variedad de tipologías de producto que permitiera determinar las características específicas deseables en un potencial sistema informático de ayuda al diseño conceptual. En este sentido, se pretende explorar en la aplicación de estas tecnologías (principalmente programas DS) en diversos sectores productivos y la conexión efectiva con los sistemas CAD actuales.

## 6. Referencias

- Bilda, Z., & Demirkan, H. (2003). An insight on designers' sketching activities in traditional versus digital media. *Design Studies*, 24(1), 27-50.
- Bordegoni, M., & Cugini, U. (2005). Haptic modeling in the conceptual phases of product design. *Virtual Reality*, 9(2-3), 192-202. Springer-Verlag.
- Cheutet, V., Catalano, C., Pernot, J., Falcidieno, B., Giannini, F., & Leon, J. (2005). 3D sketching for aesthetic design using fully free-form deformation features. *Computers & Graphics*, 29(6), 916-930. Elsevier.
- Company, P, Piquer, A., Contero, M., & Naya, F. (2005). A survey on geometrical reconstruction as a core technology to sketch-based modeling. *Computers & Graphics*, 29(6), 892-904.
- Company, Pedro, Contero, M., Conesa, J., & Piquer, A. (2004). An optimisation-based reconstruction engine for 3D modelling by sketching. *Computers & Graphics*, 28(6), 955-979.
- Cook, M. T., & Agah, A. (2009). A survey of sketch-based 3-D modeling techniques. *Interacting with Computers*, 21(3), 201-211.
- Cross, N. (2008). *Engineering Design Methods: Strategies for Product Design*. *Design* (Vol. 58, p. 217). Wiley.
- Eggl, L., Hsu, C. yao, Brüderlin, B. D., & Elber, G. (1997). Inferring 3D models from freehand sketches and constraints. *Computer-Aided Design*, 29(2), 101-112.
- Gao, Z., & Gibson, I. (2006). Haptic sculpting of multi-resolution B-spline surfaces with shaped tools. *Computer-Aided Design*, 38(6), 661-676. doi:10.1016/j.cad.2006.02.004
- Goel, V. (1995). *Sketches of Thought* (p. 279). MIT Press.
- Israel, J. H., Wiese, E., Mateescu, M., Zöllner, C., & Stark, R. (2009). Investigating three-dimensional sketching for early conceptual design—Results from expert discussions and user studies. (C. Alvarado & P. Cani, Eds.) *Computers & Graphics*, 33(4), 462-473.
- Jonson, B. (2005). Design ideation: the conceptual sketch in the digital age. *Design Studies*, 26(6), 613-624.
- Kara, L. B., Shimada, K., & Marmalefsky, S. D. (2007). An evaluation of user experience with a sketch-based 3D modeling system. *Computers & Graphics*, 31(4), 580-597.
- Lawson, B., & Loke, S. M. (1997). Computers, words and pictures. *Design Studies*, 18(2), 171-183. Elsevier.
- Machado, T. L. D. A., Gomes, A. S., & Walter, M. (2009). A Comparison Study: Sketch-Based Interfaces versus WIMP Interfaces in Three Dimensional Modeling Tasks. *2009 Latin American Web Congress*, 29-35.

- McGown, A., Green, G., & Rodgers, P. A. (1998). Visible ideas: information patterns of conceptual sketch activity. *Design Studies*, 19(4), 431-453.
- Nealen, A., Igarashi, T., Sorkine, O., & Alexa, M. (2007). FiberMesh : Designing Freeform Surfaces with 3D Curves. *ACM Transactions on Graphics TOG*, 26(3), 41. ACM.
- Olsen, L., Samavati, F. F., Sousa, M. C., & Jorge, J. A. (2009). Sketch-based modeling: A survey. *Computers & Graphics*, 33(1), 85-103.
- Pernot, J, Falcidieno, B., Giannini, F., & Leon, J. (2008). Incorporating free-form features in aesthetic and engineering product design: State-of-the-art report. *Computers in Industry*, 59(6), 626-637.
- Prats, M., Lim, S., Jowers, I., Garner, S. W., & Chase, S. (2009). Transforming shape in design: observations from studies of sketching. *Design Studies*, 30(5), 503-520.
- Rahimian, F. P., & Ibrahim, R. (2011). Impacts of VR 3D sketching on novice designers' spatial cognition in collaborative conceptual architectural design. *Design Studies*, 32(3), 255-291. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V2K-51N0SKF-1/2/1ed4b1ff995355f3852c1dee920bbd29>
- Robertson, B. F., & Radcliffe, D. F. (2009). Impact of CAD tools on creative problem solving in engineering design. *Computer-Aided Design*, 41(3), 136-146. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6TYR-4T7XGTV-1/2/3039d9fc1fa6cdc0f07849d504f1bed2>
- Stones, C., & Cassidy, T. (2010). Seeing and discovering: how do student designers reinterpret sketches and digital marks during graphic design ideation? *Design Studies*, 31(5), 439-460.
- Séquin, C. H. (2005). CAD tools for aesthetic engineering. *Computer-Aided Design*, 37(7), 737-750.
- Tian, C., Masry, M., & Lipson, H. (2009). Physical sketching: Reconstruction and analysis of 3D objects from freehand sketches. *Computer-Aided Design*, 41(3), 147-158.
- Tovey, M. (1989). Drawing and CAD in industrial design. *Design Studies*, 10(1), 24-39.
- Tovey, M. (1997). Styling and design: intuition and analysis in industrial design. *Design Studies*, 18(1), 5-31. Elsevier.
- Ullman, D. G., Wood, S., & Craig, D. (1990). The importance of drawing in the mechanical design process. *Computers & Graphics*, 14(2), 263-274.
- Verstijnen, I. M., Van Leeuwen, C., Goldschmidt, G., Hamel, R., & Hennessey, J. M. (1998). Sketching and creative discovery. *Design Studies*, 19(4), 519-546.
- Warburton, N. (1996). A heuristic model for Digitally Integrated Design. *Co-Design*, (Double issue Nos. 7 & 8), 22-27.

Won, P.-H. (2001). The comparison between visual thinking using computer and conventional media in the concept generation stages of design. *Automation in Construction*, 10(3), 319-325.

van Dijk, C. G. C. (1995). New insights in computer-aided conceptual design. *Design Studies*, 16(1), 62-80.

**Correspondencia** (Para más información contacte con):

Jorge Alcaide-Marzal  
Phone: + 34 96 387 70 00    Ext. 75687  
Fax: + + 34 96 387 98 69  
E-mail: jalcaide@dpi.upv.es