

UN ESTUDIO DE LA APLICACIÓN DE LAS NUEVAS TÉCNICAS DE ESCULPIDO DIGITAL AL DISEÑO CONCEPTUAL DE PRODUCTOS ASISTIDO POR ORDENADOR.

Alcaide-Marzal, J.^(p)

Diego-Más, J.A.

Asensio-Cuesta, S.

González-Cruz, M.C.

Departamento de Proyectos de Ingeniería – Universidad Politécnica de Valencia

Abstract

Digital 3D modeling based on “sculpting” has been intensively developed during the last years. Digital sculpting starts with basic geometric shapes that are subsequently deformed using operations similar to those employed when modeling with clay. This technology has been mainly focused on graphic designers who design digital environments, such as computer games, digital effects for movies, illustration...)

This paper analyses the possible applications of this way of modeling to product conceptual design, in both the generation of realistic product concepts to be used in customer analysis as well as the production of initial 3D sketches for studies about proportions, volumes and styling of the future product.

Keywords: Digital Sculpting, Computer Aided Design, Conceptual Design

Resumen

En los últimos años se ha desarrollado enormemente el campo del modelado digital tridimensional basado en el concepto de “esculpido”. Se trata de modelar formas complejas partiendo de geometría básica que se deforma mediante operaciones de manipulación similares a las que se utilizan al modelar con arcilla. Se trata de una tecnología dirigida principalmente a los diseñadores gráficos o de entornos de realidad virtual (juegos de ordenador, efectos especiales cinematográficos, ilustradores...)

En este trabajo se analizan las posibilidades de aplicación de este concepto de modelado al diseño conceptual de productos, tanto en la fase de generación de conceptos realistas para emplearse en el análisis de preferencias del usuario como en el desarrollo de bocetos tridimensionales iniciales para estudios de formas y volúmenes.

Palabras clave: Modelado Digital, Diseño Asistido por Ordenador, Diseño Conceptual

1. Introducción.

La aportación que la aplicación de la informática ha supuesto en el diseño en la ingeniería es innegable, y uno de los principales estandartes de esta aportación la constituyen los

sistemas de diseño asistido por ordenador (CAD). De ahora en adelante nos referiremos con estas siglas a los programas que permiten un diseño geométrico detallado y exacto de piezas y sistemas, así como la generación de los planos asociados a las mismas, aunque no siempre han dispuesto de estas funciones. Desde que en 1963 apareciera SKETCHPAD, considerado el precursor del CAD y catalizador de los gráficos por ordenador interactivos, la evolución de este tipo de software ha sido enorme. En la actualidad su empleo está tan extendido que es prácticamente impensable abordar el diseño de un producto sin contar con la ayuda de alguno de ellos.

Los planteamientos del diseño asistido por ordenador eran fruto de la evolución del software destinado a mecanizado de piezas (Automated Programming Tool, o ATP, Coons (1963)). De hecho, el considerado primer programa CAM comercial (PRONTO, desarrollado por el Dr. P.J. Hanratty) se comercializaba desde 1957. Las empresas tecnológicamente punteras, automoción y aeronáutica, eran las únicas que podían asumir los costes de investigación y uso de este tipo de software, y rápidamente desarrollaron aplicaciones y máquinas destinadas a implementar sistemas CAD más avanzados. Estas aplicaciones incipientes trabajaban en 2D y sistematizaban tareas de planimetría, fundamentalmente.

En los 70 creció la vertiente comercial de este tipo de programas, todavía en 2D y destinados al dibujo de planos. La tesis de K. Vesprille (1975) sobre curvas Spline sienta las bases del modelado de superficies tridimensionales. El primer programa que modelaba en 3D, Synthavision, no era en realidad un sistema CAD, sino un software para analizar la exposición a radiaciones nucleares. En esta época, además, se empiezan a emplear gráficos generados por ordenador para producir escenarios y efectos especiales en películas (Catmull, 1972; Parke, 1972). Las aplicaciones de estas tecnologías en cine y anuncios de televisión potencian su desarrollo (representaciones de superficies curvas (Catmull, 1975) proyección de sombras curvas (Williams, 1978), mapas de relieve (Blinn, 1978). Se programan nuevos procedimientos de sombreado (Phong, Blinn, Gouraud, Cook) y aparece el trazado de rayos (Whitted, 1980) o la "radiosidad" (Goral et al, 1984).

Los avances en el campo del hardware propician la aparición a principios de los 80 del ordenador personal. Las potentes estaciones de trabajo UNIX permiten el desarrollo de motores de representación (render) y favorecen el desarrollo de sistemas de modelado sólido en 3D. En 1987, PTC revoluciona el sector con su producto Pro/ENGINEER, que hacía uso de las ventanas X-Windows de UNIX para proporcionar un interfaz mucho más intuitivo para el usuario y presentaba una incomparable velocidad de modelado sólido. Las empresas, espoleadas por disminuir los tiempos de desarrollo y lanzamiento de sus productos, incrementan el mercado de los programas CAD notablemente. Pero la revolución definitiva se iba a dar con la aparición en 1994 del primer sistema operativo de Windows con arquitectura de 32 bits, Windows NT, y el lanzamiento del primer procesador de 32 bits de Intel, el Pentium Pro. Estos dos sucesos permitieron acelerar el desarrollo del software CAD y popularizar su precio. Solidworks fue la primera empresa en conseguirlo.

En los 90 aparece la primera versión de 3D Studio. Los programas de imágenes generadas por ordenador (CGI) o infografía se popularizan, siendo destinados sobre todo a animación digital para cine y televisión y a la generación de videojuegos y simuladores. A finales de los 90 se comercializan los primeros PDM (Product Data Management), que permiten gestionar el proceso de diseño y los documentos asociados de forma global y cooperativa. Se implanta el uso de Internet para visualizar y examinar modelos remotamente.

En la actualidad, los programas de modelado sólido paramétrico (Pro/ENGINEER, Catia, Unigraphics, SolidWorks, SolidEdge, Inventor, etc.) son la referencia en el sector industrial, presentan una conectividad total con sistemas CAM/CIM y tienden a buscar terreno en el campo del diseño de productos de consumo, con la incorporación progresiva de herramientas más próximas al modelado propio de los programas de animación digital. Su filosofía de modelado esencial se basa en la construcción de geometría por adición o sustracción de formas geométricas construidas por operaciones de extrusión, revolución, barrido o recubrimiento. Son programas claramente orientados a la fase de diseño de detalle, aunque su creciente flexibilidad de modelado pretende acercarlos a etapas más tempranas.

El software de animación 3D (3D Studio, Maya, Lightwave 3D, Cinema 4D, Softimage XSI, Rhino, Blender, Wings3D), por su parte, ha continuado desarrollando herramientas específicas (simuladores de partículas, campos de fuerza, dinámica de la vestimenta, captura de movimiento y de gestos, materiales avanzados...) y mejorando las capacidades de representación. Utiliza una filosofía de modelado basada en el empleo de primitivas y operaciones sobre figuras planas para generar una geometría 3D que posteriormente puede deformarse mediante el control de sus entidades básicas (vértices, aristas o caras). En el campo del diseño de productos, ha sido empleado para modelar con facilidad propuestas conceptuales para luego generar imágenes realistas de las mismas. También en general para representar productos finales con una calidad o versatilidad mayor que la que ofrecen los módulos de render de los sistemas CAD.

En los últimos años se han desarrollado programas muy cercanos a los modeladores de animación 3D pero que plantean una filosofía de modelado completamente diferente. Son aplicaciones de escultura digital. Basan su trabajo en la deformación intuitiva de formas básicas como si se modelase con arcilla. Su principal mercado son los estudios de animación y los diseñadores de videojuegos, además de artistas digitales. En este trabajo se explora la posibilidad de que este tipo de programas se incorpore al proceso de diseño como una herramienta de bocetado 3D en la etapa de diseño conceptual. El concepto de boceto 3D no es nuevo, existen propuestas en este sentido que apuntan entre otras opciones al uso de modelado mediante forma libre para la generación de estos bocetos puramente formales (ver sobre todo Cheutet et al (2005) y también Vosniakos (1999), Fontana et al (2000), Masry et al (2005), Tian et al, (2009) . Aquí se presentará el modo de trabajo de este tipo de programas y se expondrán algunas aplicaciones que ponen en práctica el bocetado tridimensional.

2. Los programas de escultura digital. Un breve estado del arte.

Como se ha comentado, los programas orientados al modelado mediante escultura digital son muy diferentes de los sistemas CAD, aunque comparten el trabajo en un entorno 3D y lógicamente todos los beneficios del trabajo digital. Pensados sobre todo para el diseño de formas orgánicas, estos programas carecen de herramientas que serían esperables en una plataforma de diseño industrial. Sin embargo, son muy potentes a la hora de modelar.

La situación de estos programas en el amplio espectro de los gráficos 3D por ordenador se encuentra junto al software de animación. No en vano son complementarios, y en muchos casos vienen presentados dentro del mismo sistema de producción. Es precisamente esta característica la que hace a los autores plantearse las posibilidades que esta forma de modelar puede tener en las primeras etapas del diseño de productos. Los programas de animación han sido asimilados dentro del proceso de diseño de productos industriales como herramientas de representación virtual de productos. Permiten mostrar con un elevado nivel

de realismo propuestas de producto desde las fases de diseño conceptual, haciendo posible evaluarlas desde el punto de vista estético, así como analizar formas y volúmenes antes de pasar a un diseño más detallado.

Esencialmente, el trabajo con un programa de escultura digital se basa en el empleo de herramientas que “deforman” una geometría base. Dicha geometría puede ser creada en el propio programa o importada de otro modelador (que bien puede tratarse de un software CAD). Estas herramientas replican las acciones que se realizarían en un esculpido físico: añaden o restan material, aplanan, desplazan, suavizan, rascan, etc. Esta forma de trabajar permite generar formas complejas de manera muy rápida e intuitiva, aunque evidentemente muy poco exacta.

De hecho, el trabajo con este tipo de programas se facilita sobremanera si se emplea una tableta y un lápiz digitales. Así, este tipo de modelado se asemeja mucho en realidad a un bocetado 3D, puesto que al modelar, el diseñador “dibuja” en tres dimensiones. No se preocupa de las medidas o las restricciones geométricas, sólo proporciones y volúmenes.

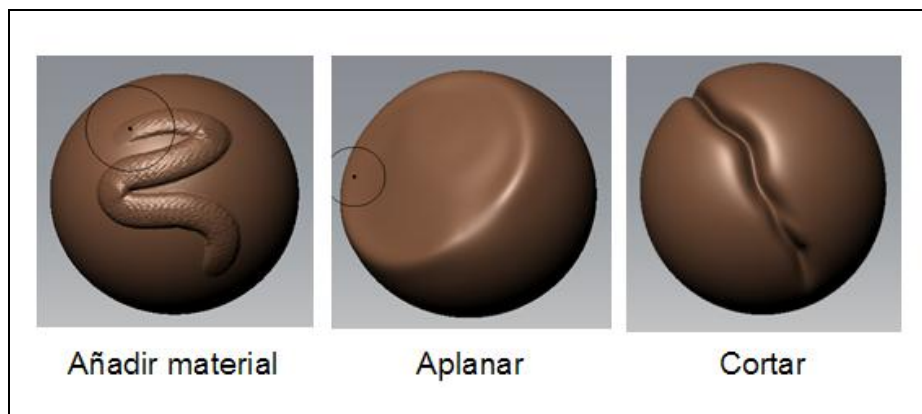


Figura 1. Ejemplos de operaciones de esculpido sobre una esfera en Autodesk Mudbox.

Es posible seleccionar el “cincel” con el que se producen dichas deformaciones, así como controlar sus parámetros (dimensiones, fuerza que se aplica, forma, continuidad del trazo, etc.) lo que permite esculpir diferentes texturas y acabados.

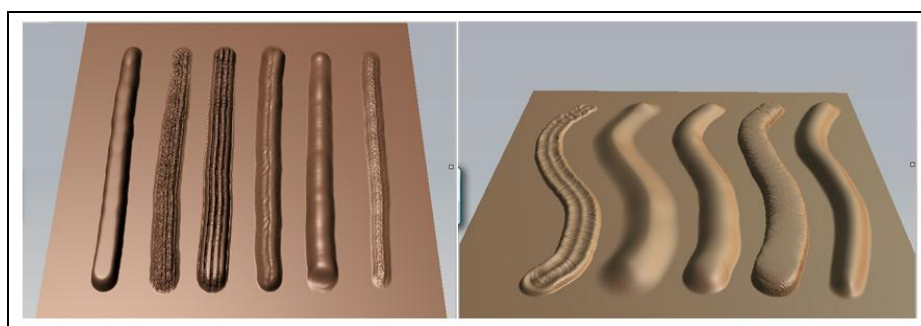


Figura 2. Ejemplos de operaciones variando los parámetros de pincel en Autodesk Mudbox.

A estas herramientas hay que sumar las ventajas del trabajo en un medio digital: es posible modelar cómodamente de forma simétrica, se pueden utilizar máscaras y otro tipo de

estrategias para definir el área que va a recibir el efecto de la herramienta, es posible deshacer acciones, trabajar por capas, etc...

Además, este tipo de programas incorpora, al igual que los programas de animación digital 3D, herramientas que permiten aplicar materiales, controlar la iluminación, aplicar texturas, etc. con la ventaja añadida de que muchas de estas funciones se realizan también de forma intuitiva pintando directamente sobre la geometría tridimensional. Esto acelera mucho el trabajo de acabado del modelo, permitiendo aportarle un aspecto de producto final en muy poco tiempo.

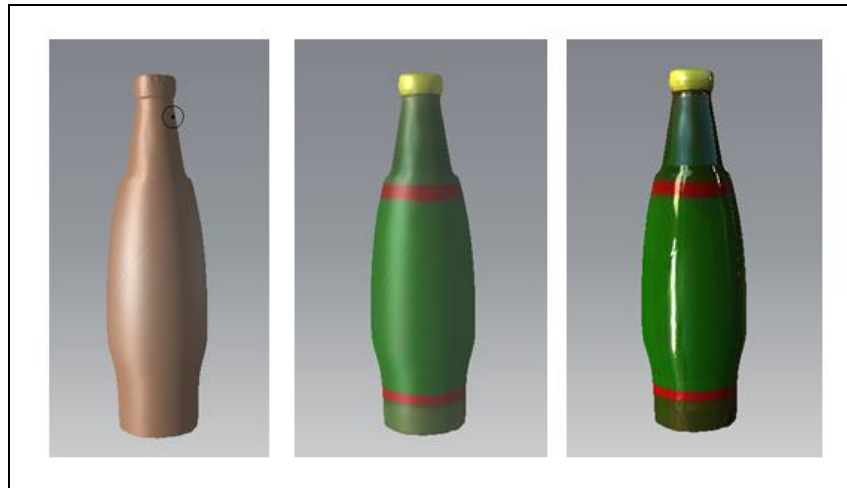


Figura 3. Modelo con varios niveles de acabado.

Aunque las posibilidades de estos programas van mucho más allá de lo aquí expuesto, tampoco se pretende recoger una descripción exhaustiva de los mismos. Las funciones varían de una firma a otra, hay programas que fusionan el modelado mediante esculpido con técnicas propias de los sistemas de animación 3D y la combinación del uso de varios programas según sus puntos fuertes permite obtener modelos de un realismo impactante. Pero lo que aquí se pretende analizar es hasta qué punto esta tecnología puede servir para acelerar el proceso de diseño en las etapas iniciales proporcionando la posibilidad de trabajar con bocetos tridimensionales. Éste será el objeto del siguiente punto.

3. Aplicación de la escultura digital al diseño de productos.

El objetivo de este trabajo es investigar las posibles aplicaciones de los programas de escultura digital en el proceso de diseño de productos. Debido a las características de estos programas, la principal utilidad reside en el hecho de poder modelar muy rápidamente todo tipo de formas complejas. Al igual que el software de animación permite modelar de forma conceptual, estos programas pueden servir para “bocetar” en 3D las ideas de producto antes de desarrollarlas completamente. Así se dispondría de un boceto tridimensional del producto, cuyo nivel de detalle puede ser básico, pero también muy desarrollado gracias al uso de materiales y texturas.

Ahora bien, es preciso analizar hasta qué punto es ventajoso generar un diseño tridimensional en etapas tan tempranas del proceso de diseño. La elevada incertidumbre que caracteriza los primeros pasos del proceso de diseño es uno de los factores responsables de que las aplicaciones CAD hayan sido enfocadas inicialmente (y con una inercia considerable) hacia etapas de definición detallada del producto. El tiempo necesario para modelar hacia ineficiente utilizar el ordenador para generar conceptos que

posteriormente iban a ser desechados, resultando más rápido y efectivo preparar bocetos y dibujos en papel. Las mejoras en la potencia de cálculo de los ordenadores y los algoritmos de representación cada vez más eficientes, así como un flujo de trabajo más interactivo y dinámico, han hecho posible que modelar objetos tridimensionales sea una tarea relativamente rápida y han posibilitado el uso de la infografía en el proceso de diseño de productos. Sin embargo, para llevar este uso hasta las etapas iniciales del proceso, donde la información que se tiene del producto es muy escasa, el software de modelado debería mostrar las siguientes propiedades:

- 1.- Eficiencia de modelado. Debe resultar más sencillo producir un modelo 3D que bocetar el producto. Generalmente, si se compara la producción de un modelo frente a la de una imagen esto nunca es así, pero hay que considerar que una vez se dispone de un modelo 3D es posible obtener imágenes del producto desde cualquier punto de vista, con lo que se multiplica el número de dibujos que habría que producir para igualar rendimientos.
- 2.- Reutilización de los modelos. La edición de los modelos ya creados debe ser suficientemente flexible como para permitir el aprovechamiento de modelos previos para generar nuevos conceptos. Esto multiplica la eficiencia del trabajo en 3D, pues no siempre es necesario partir de cero para bocetar.
- 3.- Continuidad en fases posteriores. Idealmente, el modelo producido debería poder aprovecharse en las fases siguientes del proceso. Esto ocurre con los modelos CAD en la fase de diseño de detalle, donde dicho modelo puede emplearse para análisis mecánicos (CAE), simulaciones, generación de planos y documentos, preparación de ficheros de fabricación (CAM) o incluso presentaciones virtuales del producto definitivo. El fichero CAD con el diseño detallado del producto es por tanto enormemente provechoso. Esto, lógicamente, no se debe exclusivamente a las propiedades de los sistemas CAD, también al hecho de que la información sobre el producto es cada vez más definida (se fijan dimensiones, materiales, componentes...). Sin embargo, el tipo de geometría que se trabaja es muy importante. Los programas de animación y los de escultura digital emplean mallas poligonales en lugar de sólidos, y esto limita el paso de ficheros de una plataforma a otra..

En el presente trabajo se probaron dos aplicaciones de escultura digital con objeto de verificar hasta qué punto cumplían los requisitos descritos. Se prepararon modelos de productos de consumo midiendo tiempos de producción y se probó la posibilidad de exportar los archivos generados hacia un sistema CAD para su utilización posterior. Los programas seleccionados fueron Pixologic ZBrush 3.1 y Autodesk Mudbox 2009, en sus versiones de prueba. Se utilizó 3D Studio MAX para generar las formas base en algún caso. Los modelos exportados se trabajaron posteriormente en SolidWorks 2008, con objeto de probar la compatibilidad y la posibilidad de uso posterior de los bocetos.

Inicialmente se estableció un período de aprendizaje del software, con objeto de poder modelar de acuerdo con las posibilidades que éste ofrecía. El proceso de aprendizaje para llegar a modelar objetos en un nivel básico es relativamente rápido, si se tienen nociones de infografía 3D. Una vez superada la fase de entrenamiento, se procedió a seleccionar y modelar productos de consumo.

Dado que los productos de geometría sencilla ya son fácilmente modelables en programas CAD, se eligieron productos de geometrías medianamente complejas, pero que no tuvieran demasiados componentes. Una bota de montaña, un zapato de tacón, una mochila, unas gafas de nieve, un broche y un envase fueron los productos bocetados.

Todos ellos fueron modelados de forma completa en menos de dos horas. Los modelos de ZBrush hicieron uso de herramientas específicas de generación de geometría base, mientras que Mudbox empleó primitivas propias o bien geometría importada de 3D Studio MAX. El modelado por deformación libre combinado con el uso de la simetría facilita la obtención de formas complejas que exigirían horas de modelado en CAD.

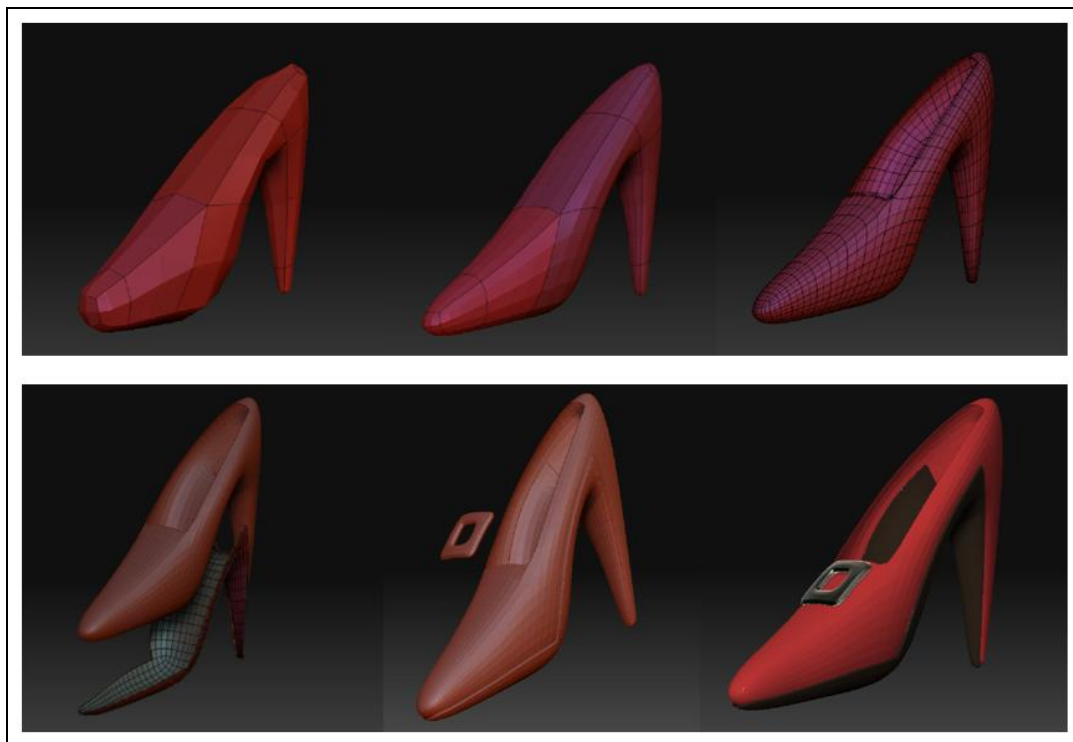


Figura 4. Proceso de modelado de un zapato de tacón.

El zapato de tacón fue modelado completamente en ZBrush en menos de diez minutos. Las herramientas de generación de geometría base permitieron producir la forma inicial prácticamente al instante, procediéndose después a refinar la malla mediante deformación libre. La suela se obtuvo mediante una extracción de la forma principal y posteriormente se añadió la forniture. Evidentemente, no es un modelo exacto, tiene imperfecciones y requerirá modificaciones posteriores para ser industrializado, pero precisamente eso es propio de esta fase del proceso de diseño. Los bocetos en papel comparten estas características.

El modelo fue exportado como OBJ, ya que el software no permite otra opción, y a través de 3D Studio MAX convertido a IGES y a STL para su importación a SolidWorks. Ésta se produjo sin ningún problema, pero evidentemente el trabajo en CAD de este tipo de objetos gráficos es muy limitado por cuanto, como se ha mencionado, están integrados por mallas poligonales y no por sólidos. Sin un proceso de conversión, es posible emplearlos como elementos de referencia al modelar y sobre todo exportar la geometría hacia sistemas de prototipado rápido, lo que permite obtener modelos físicos de los bocetos tridimensionales.

Para explorar esta posibilidad, se modeló una horma aprovechando la forma del zapato previamente descrito. Dicha horma se preparó en ZBrush y fue exportada en formato OBJ. Para su importación a SolidWorks se empleó un complemento de Sycode que permite convertir objetos de malla en superficies o sólidos, en su versión de prueba. La conversión no consiguió generar un sólido, pero las superficies obtenidas pudieron ser cosidas y finalmente se hizo posible operar en forma sólida con la horma. En la figura se aprecian tres operaciones sólidas efectuadas sobre la misma: un corte para dejar una superficie plana a la

altura del tobillo y dos agujeros pasantes. De esta forma, se ha conseguido generar en muy poco tiempo un modelo con formas complejas que ya es sólido y editable en cualquier sistema CAD. Como última aplicación, se generó un fichero de intercambio IGES que fue exportado al programa de fabricación asistida GibbsCAM, donde se obtuvo un fichero para el mecanizado de la horma en una máquina de control numérico.

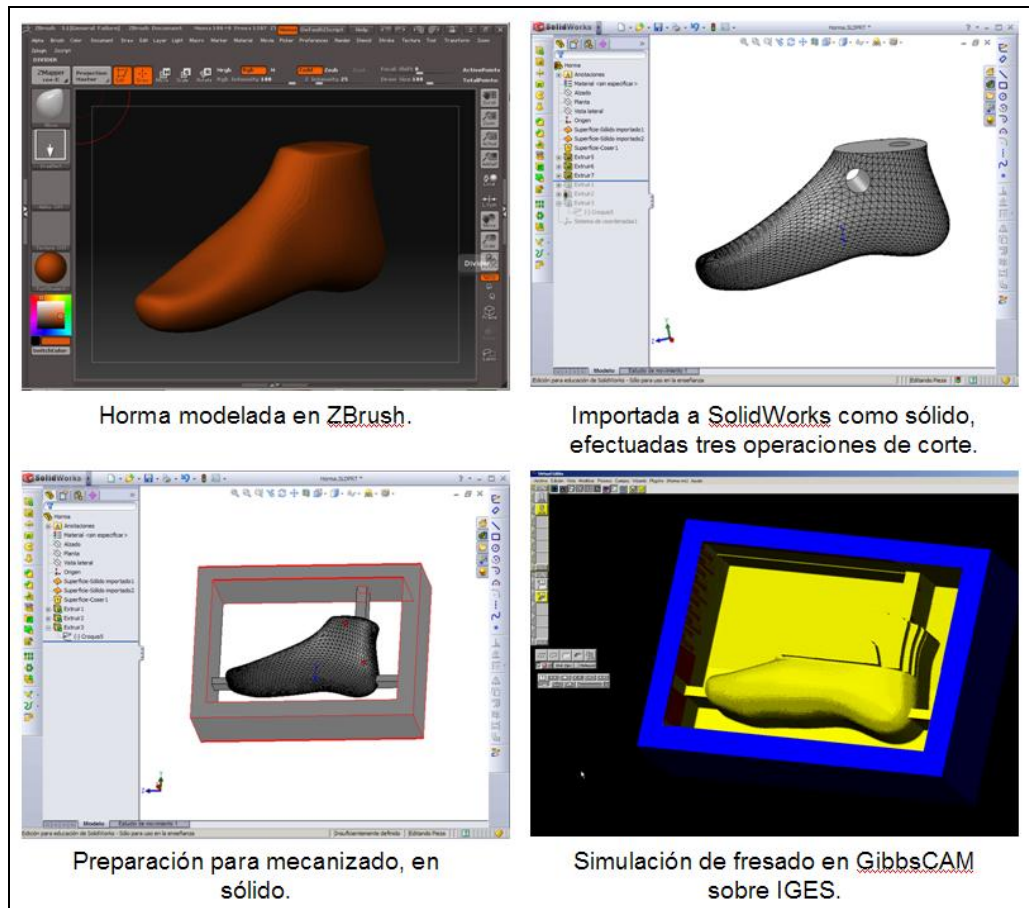


Figura 5. Horma esculpida en 3D y convertida en sólido.

La facilidad de edición para aprovechar modelos existentes era otra de las cuestiones a comprobar, y ya durante el proceso de modelado fue patente la flexibilidad de este tipo de trabajo. El hecho de que se construya la geometría mediante deformaciones libres permite una capacidad de variación muy efectiva sobre los volúmenes y proporciones de objetos ya creados. Además, resulta muy sencillo partir de geometrías base existentes o de modelos a medio desarrollar para generar variantes de un mismo concepto raíz. En la figura se muestran dos variantes del zapato de tacón expuesto anteriormente. El modelo de tacón más bajo se obtuvo simplemente deformando el original. La bota se obtuvo mediante adición de geometría y modelado posterior.



Figura 6. Zapato. Modelo original y dos variantes.

La bota era uno de los productos más complejos en cuanto a cantidad de componentes. El cuerpo básico fue modelado en apenas 20 minutos, mientras que el proceso completo llevó 78 minutos, involucrando el modelado de 16 elementos distintos. Tras aplicar materiales, se pudieron añadir tonos diferentes y adornos sobre el color principal gracias a las herramientas de pintura en 3D.



Figura 7. Proceso de modelado de una bota de montaña.

La aplicación de materiales sobre los objetos modelados permite, como en el caso de los programas de animación, obtener de forma eficiente distintas combinaciones de colores y texturas para el mismo objeto. Esto en realidad también es posible en el bocetado 2D, trabajando con programas de edición de imagen y con formatos vectoriales. La ventaja en este caso es, nuevamente, el disponer de un modelo 3D que permita visualizar esos cambios desde cualquier perspectiva y con el detalle que se desee.



Figura 8. Bota de montaña. Pruebas de color.

4. Conclusiones.

En este trabajo se ha expuesto brevemente la forma de trabajo de los modeladores de escultura digital, y se han detallado sus características principales. Se ha discutido la posible aplicación al proceso de diseño de productos industriales, considerando su incorporación en etapas tempranas como herramienta de bocetado 3D.

Como primera aproximación a estas tecnologías, el resultado es satisfactorio. El modelado de productos es rápido y muy efectivo, y permite producir en poco tiempo conceptos de producto básicos sobre los que trabajar. Es igualmente sencillo efectuar modificaciones, de forma que se puede pulir el diseño inicial, o combinar ideas de varios diseños en uno, o aprovechar un diseño base para generar variaciones. La aplicación de materiales, colores y texturas facilita el acabado del producto con un aspecto realista, así como estudiar diferentes paletas de color y otras opciones.

Sin embargo, la principal ventaja frente al trabajo conceptual en programas de animación 3D es a juicio de los autores la filosofía de modelado, mucho más intuitiva y en realidad mucho más cercana a la tarea de bocetar que a la de modelar en un sistema CAD. Esta ventaja se hace todavía más evidente cuando lo que se pretende modelar presenta formas orgánicas y poco geométricas, pues se obtienen con mucha facilidad respecto a otro tipo de programas.

Algo que puede resultar inconveniente es la necesidad de adquirir un programa específico para generar los bocetos 3D, algo que en principio sólo resultaría atractivo para sectores que hicieran un uso más amplio de este tipo de modelado y que exportasen directamente los modelos a sistemas de fabricación rápida (el calzado y otros sectores tradicionales como joyería o cerámica son buenos ejemplos).

Por otra parte, un problema propio de esta filosofía de trabajo es la dificultad de trabajar con formas muy geométricas, frente a la sencillez con que se consiguen en un sistema CAD o un software de animación 3D. Una vía que combine el modelado geométrico y el orgánico se

encuentra en ya en algunas aplicaciones, y podría ayudar a salvar no sólo este obstáculo, sino también el de depender de un software ex profeso para generar los bocetos 3D.

En definitiva, se puede concluir que los programas de escultura digital se encuentran en un grado de madurez que posibilita su utilización como herramientas de bocetado 3D. Sin embargo, existen todavía ciertas limitaciones que impiden su popularización. La principal de ellas es la falta de conexión entre estos programas y los que ya se utilizan. Esto dificulta el aprovechamiento posterior de los modelos, algo que resultaría sumamente útil. Aunque es posible producir la información necesaria para trasladar la geometría 3D desde el fichero hasta una máquina de prototipado rápido (impresión 3D, estereolitografía, FDM o centros CNC), sigue siendo necesario algún tipo de relación más directa con los sistemas CAD para facilitar la integración de todos los elementos del proceso de diseño mediante ordenador. Por el momento esto puede solucionarse mediante complementos que traducen las geometrías de malla poligonal en sólidos, pero esto supone nuevamente una adquisición de software a propósito que sólo se justifica en caso de hacerse un uso habitual del mismo.

En estudios posteriores se analizarán posibles vías para alcanzar dicha integración, así como el grado de aceptación de este tipo de herramientas por parte de los profesionales del diseño.

Referencias

Blinn, J.F. "Simulation of wrinkled surfaces", Proceedings of the 5th annual conference on Computer graphics and interactive techniques August 1978, V12, #3, pp 286-292.

Catmull, E. "A System for Computer Generated Movies". Proceedings of the ACM National Conference August 1972, p. 422-431.

Catmull, E. "Computer Display of Curved Surfaces". Proceedings of the IEEE Conference on Computer Graphics, Pattern Recognition and Data Structures (IEEE Cat. No. 75CH0981-1C) 1975, p. 11-17.

Cheutet, V, Catalano, C.E., Giannini, F., Falcidieno, B., Pernot, J.P., Leon, J.C. "3D sketching for aesthetic design using fully free-form deformation features", Computers and Graphics, December 2005, Vol 6, p. 916-930 29

Coons, Steven, "An Outline of the Requirements of a Computer-Aided Design System", *AFIPS, SJCC* 23 (1963), pp 299-304.

Fontana, M., Giannini F. and Meirana,F., "Free form features for aesthetic design", *International Journal of Shape Modelling* 6 (2000) (2), pp. 273–302.

Goral, C. M., Torrence, K.E., Greenberg, D.P. and Battaile, B. "Modeling the Interaction of Light Between Diffuse Surfaces". *Computer Graphics (SIGGRAPH 84 Proceedings)* 18(3) July 1984, p. 213-222.

Masry, M., Kang, D. y Lipson, H. "A freehand sketching interface for progressive construction of 3D objects", *Computers & Graphics*, 29 (4), p.563-575, Aug 2005

Parke, F. I. "Computer Generated Animation of Faces". Proceedings of the ACM National Conference 1972, p. 451-457

Tian, C., Masry, M. y Lipson, H., "Physical sketching: Reconstruction and analysis of 3D objects from freehand sketches", *Computer-Aided Design*, 41 (3), p.147-158, Mar 2009

Vesprille, K "Computer Aided Design Applications of the Rational B-Spline Approximation Form" Ph. D. Thesis, 1975

Vosniakos, G. "Investigation on feature-based shape modelling for mechanical parts with free-form surfaces", International Journal of Advanced Manufacturing and Technology 15 (1999), pp. 188–199

Whitted, T. "An improved illumination model for shaded display", Communications of the ACM, v.23 n.6, p.343-349, June 1980

Williams, L. "Casting curved shadows on curved surfaces", Proceedings of the 5th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, p.270-274, August 23-25, 1978

Agradecimientos

Los autores desean agradecer a David Dvorak su colaboración en la elaboración del material para este trabajo.

Correspondencia (Para más información contacte con):

D. Jorge Alcaide Marzal.

Departamento de Proyectos de Ingeniería. E.T.S. Ingenieros Industriales. Universidad Politécnica de Valencia - Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, Spain

Phone. +34 96 387 70 07 Ext. 5687 Fax. 96 387 98 69

E-mail: jalcaide@dpi.upv.es