

This paper explains the three-dimensional representation procedure of one fragment of Milá house elevation designed by the architect Antoni Gaudí. The generation process of an architectonic *virtual model* constituted by free form surfaces like this, represents a paradigm of high level difficulty in CAD modeling. The main objective of our research has been not only construct a model that shows the complex form of its architecture, but also verify the performance of the different tools supported by computer aided design programs in the management of surface modeling. We obtained an accurate information of the real surface elevation with a photogrammetric survey using contour lines. The transformation of this kind of data in a three-dimensional model was not immediately. Thus, we have had study different ways to generate the three-dimensional model solution. The process began with the construction of different surface models supported by *analytic functions*, but the obtained surfaces made with this system were deficient and not too much satisfactory. That's why, we use a *polyhedron mesh surface* method in order to improve these results. In spite of this methodology reductive performance, (compared with analytic function systems), the obtained surface demonstrated that this technique was the best way to satisfy the requirement of a free form surface previously established as we want to construct. From this point the principal problem was generate a surface defined by two-dimensional data, (contour lines), applying an automatic process sufficiently fast to compete with the analytic function systems. To satisfy the demand was necessary make complementary software to improve the process and allow more fluidity to resolve this typology of surfaces. We achieved this phase thanks to Joan Miquel Quilez collaboration and the constant dedication in the elaboration of complementary software to computer aided design. Finally, the introduction of render systems with lights, shadows, textures and reflected images, allowed show the studied elevation area of Milá house with more accuracy. Thus, the limits and contours of the finally surface were more evident and help us to know the properties of a non-materialized free form surface successfully.

Esta comunicação trata do processo de realização de uma representação tridimensional de uma parte da fachada da Casa Milá, de Antoni Gaudí, como um exemplo da dificuldade existente na elaboração de uma *maquete virtual* de um objeto arquitetônico composto por superfícies de formas livres. O objetivo deste trabalho não é apenas a construção de um modelo que permita reconhecer as complexas características formais do edifício original, como também avaliar as diferentes possibilidades obtidas pelos distintos sistemas de projeção tridimensional utilizadas por programas de CAD em condições semelhantes. A obtenção de dados mediante procedimentos fotogramétricos possibilitou uma informação básica bastante precisa da superfície real da fachada, em formas de curvas de nível. Contudo, para transformar esta informação em um modelo tridimensional que se adaptasse a este tipo de linhas, foi necessário estudar diferentes estratégias de geração de formas. Como consequência deste processo foram elaborados previamente diversos modelos, baseados em sistemas de geração de superfícies controladas por meio de *equações analíticas*. No entanto, os resultados pouco satisfatórios obtidos mediante tais sistemas nos obrigou a optar por sistemas de geração de superfícies mediante *malhas espaciais poliédricas*. Ainda que esta segunda modalidade é menos versátil que a anterior, a criação de uma superfície através de uma *malha espacial*, como resultado, demonstrou ser o sistema que melhor se adapta aos requerimentos de uma superfície de forma livre, como neste caso específico. Deste modo, o principal problema foi gerar a forma de uma superfície já construída a partir do reconhecimento dos dados bidimensionais que a definem - isto é, as curvas de nível - aplicando um processo automático que seja suficientemente ágil para otimizar os sistemas de geração de superfícies baseado em equações analíticas. Para resolver este problema foi necessário elaborar diversos programas auxiliares complementários aos existentes nos sistemas CAD, com a finalidade de agilizar os procedimentos que permitiam uma fluidez na resolução deste tipo de superfícies. Para a realização desta etapa contamos com a colaboração decisiva de Joan Miquel Quilez. Finalmente, a partir do resultado obtido foram introduzidos parâmetros de luz, sombra, textura e reflexos, para apresentar com maior precisão a zona da fachada estudada, de tal modo que seus limites e contornos sejam mais evidentes e ajudem a compreender a forma final de uma superfície de geração livre que não está materializada.

Modelado de superficies complejas. La casa Milá de Antonio Gaudí.

Arq. Andres de Mesa G.

Departamento de Expresión Gráfica Arquitectónica I.
Universidad Politécnica de Cataluña. España.
andres.mesa@ega1.upc.es

Arq. Joaquín Regot M.

Departamento de Expresión Gráfica Arquitectónica I.
Universidad Politécnica de Cataluña. España.
joaquin.regot@ega1.upc.es

Esta comunicación expone el proceso de realización de la representación tridimensional de una zona de la fachada de la casa Milá construida por el arquitecto Antoni Gaudí, como claro exponente de la dificultad que entraña la elaboración de la *maqueta virtual* de una forma arquitectónica compuesta por superficies de generación libre. Su objetivo no sólo ha sido obtener un modelo que permita reconocer las complejas características formales que presenta su arquitectura, sino también evaluar las diferentes posibilidades que facilitan las herramientas de los distintos sistemas de generación tridimensional utilizadas por los programas de CAD a la hora de abordar un problema con estas características. La obtención de datos, mediante procedimientos fotogramétricos, nos ha permitido disponer de una información básica muy precisa de la superficie real de la fachada en forma de curvas de nivel. Sin embargo, para transformar esta información en un modelo tridimensional que se adapte lo mejor posible a este tipo de líneas, nos hemos visto obligados a estudiar diferentes estrategias de generación formal. Este proceso nos ha llevado a elaborar previamente diversos modelos basados en los sistemas de generación de superficies controladas mediante *ecuaciones analíticas*. Pero los resultados poco satisfactorios obtenidos mediante estos sistemas, nos hicieron optar por los sistemas de generación de superficies mediante *mallas espaciales poliédricas*. A pesar de que esta segunda modalidad es mucho menos versátil que la primera, la creación de una superficie a través de una *malla espacial*, como resultado, demostró ser el sistema que mejor se adapta a los requerimientos una superficie de forma libre como la que se estaba intentando resolver. De esta manera, el principal problema fue generar la forma de una superficie ya construida a partir del reconocimiento de los datos bidimensionales que la definen, (las curvas de nivel), aplicando un proceso automático que sea lo suficientemente ágil como para competir con los sistemas de generación de superficies basados en ecuaciones analíticas. Para resolver este problema, fue necesario elaborar diversos programas auxiliares complementarios a los facilitados por los sistemas de CAD, con la finalidad de agilizar aquellos pasos que no permitían una fluidez en la resolución de este tipo de superficies. Esta etapa se ha podido realizar gracias a la colaboración decisiva de Joan Miquel Quílez y a la constante dedicación de los autores en la elaboración de programas auxiliares para los sistemas informáticos de diseño asistido. Finalmente, a partir del resultado obtenido se introdujeron parámetros de luz, sombra, textura y reflejos, para presentar con mayor precisión la zona de fachada del edificio estudiada, de tal manera que sus límites y sus contornos sean mucho más evidentes y nos ayuden a entender la forma final de una superficie de generación libre que no está materializada.

Intenciones y formas.

El reto de la representación de formas libres que pueden ser controladas geoméricamente es uno de los problemas que presenta mayores dificultades en el campo del diseño. En el dibujo tradicional, el control de una forma tridimensional que no está limitada por aristas se realiza mediante la representación de sus *contornos aparentes*. Esta metodología, tan utilizada por la geometría de proyección en la representación de formas curvas elementales, reduce drásticamente las posibilidades de controlar sus propiedades geométricas tridimensionales, y es realmente insuficiente cuando se trabaja con superficies de generación libre, aquellas que la informática ha introducido con la denominación de *free forms*.

Los diversos problemas que presentan este tipo de superficies han sido estudiados fundamentalmente en el campo del diseño naval y el diseño aeronáutico. Su traducción al mundo de la informática ha puesto el desarrollo de la tecnología elaborada sobre este tema al abasto de una amplia gama de profesiones. Probablemente, esta sea una de las razones más importantes para que las últimas corrientes arquitectónicas se muestren a favor de la recuperación de este tipo de superficies en su diseño. Un tipo de superficies, que la arquitectura ha utilizado en casos muy puntuales y de una forma tan tímida que casi no han tenido repercusiones. Por esta razón nos pareció conveniente aceptar un reto que nos propusimos hace ya un tiempo: la curiosidad de saber si era posible realizar la representación de las formas que presenta la fachada de la casa Milà, diseñada por Antoni Gaudí, con un alto grado de fidelidad y rigor geométrico.

En este trabajo se expone el proceso de realización de la representación de una zona de la mencionada fachada, como claro exponente de la dificultad que entraña la elaboración de una maqueta tridimensional que permita reconocer en toda su magnitud el comportamiento y la complejidad de sus formas. De todas maneras, la principal intención de esta experiencia, ha sido evaluar de una manera muy concreta las diferentes posibilidades y limitaciones que presentan los nuevos sistemas geométricos implementados por la informática a la hora de establecer un riguroso control visual y métrico de una superficie de forma

libre aplicada al diseño arquitectónico.

Nuestra colaboración con el Laboratorio de Fotogrametría de la UPC en la toma fotográfica para la realización de un trabajo final de carrera, nos permitió resolver el primer problema: la obtención de datos tridimensionales muy precisos de la compleja superficie diseñada por el famoso arquitecto catalán. Sin embargo, la traducción de estos datos en una forma tridimensional definitiva, no sólo nos ha obligado a evaluar el comportamiento de los programas informáticos especializados en la generación de formas tridimensionales, sino a realizar una clasificación y un orden conceptual de toda la parafernalia de entidades formales que ponen al abasto del usuario para realizar un modelo tridimensional basado en superficies. Ambos temas se exponen en este trabajo como una base teórica indispensable para comprender la magnitud del problema que se aborda en él. Por último, es necesario mencionar que ha sido absolutamente indispensable someter los distintos resultados de experimentación y elaboración de las superficies definitivas de la zona de fachada realizada a sistemas informáticos de simulación lumínica. Unos sistemas sin los cuales no sólo era prácticamente imposible distinguir los *contornos aparentes* de las superficies resultantes de sus correspondientes *bordes* o incluso *límites*, sino que habría sido imposible comprender y evaluar el comportamiento y la precisión con la que estaban siendo realizadas.

Experimentos, curvas de nivel y superficies.

La realización de la representación de una zona de la fachada de la casa Milà, es un claro ejemplo del trabajo que supone un levantamiento fidedigno de una forma arquitectónica compuesta por superficies complejas. Este tema nos pareció realmente idóneo para evaluar la metodología de generación de *superficies libres* por medios informáticos, puesto que se trata de una obra proyectada y materializada a pie de obra dando las órdenes oportunas para su ejecución sin la intención de seguir un proceso racional específico.

Los datos.

La toma de datos de la forma de la fachada se realizó mediante un proceso fotogramétrico. Para elaborar este trabajo se utilizó una cámara

semimétrica Rollei 6006 equipada con un objetivo de 80 mm. y otro de 40 mm. Con el primero se realizaron 70 fotogramas dedicados específicamente a la restitución, y con el segundo, 20 fotogramas más como apoyo gráfico adicional. La realización de la toma fotográfica, por los autores de esta comunicación, se realizó definiendo tres franjas horizontales a lo largo de las tres fachadas. La disposición de tomas longitudinales se repartió de modo que los pares fotogramétricos pudieran recoger el máximo de puntos de control definidos sobre la fachada. Unos puntos de control indispensables para establecer la orientación interna de los pares fotográficos y corregir errores durante el proceso de restitución. La intervención de un equipo formado por alumnos de Ingeniería Técnica Topográfica, bajo la dirección del profesor Felipe Buil P., permitió establecer la posición espacial de todos estos puntos de control en relación a los 70 fotogramas realizados.

La conversión de los datos ofrecidos por la fotografía en datos digitales, se realizó mediante un restituidor analítico Zeiss P3 con una resolución de 1 micra y un error medio cuadrático de 5mm. La extracción de datos de la maqueta estereográfica generada por el aparato restituidor, se realizó de dos maneras distintas para poder conseguir diferentes posibilidades de representación y de control de la superficie de la fachada. En el primer caso, se realizó la restitución espacial de las líneas de las juntas de la piedra, con objeto de obtener un despiece muy preciso de los distintos bloques pétreos utilizados en su elaboración. Mientras que en el segundo caso, la necesidad de definir con gran fidelidad la continuidad de toda la superficie que compone la fachada, se resolvió mediante la determinación de curvas de nivel con un intervalo de profundidad de 10 cm. La responsabilidad de estos dos trabajos estuvo a cargo del operador del restituidor F. Javier Muñoz C., y que junto con la toma fotogramétrica culminaron como su proyecto de fin de carrera para obtener la titulación de Ingeniero Técnico Topógrafo.

Entre ecuaciones y decepciones.

Los datos de partida obtenidos por el proceso fotogramétrico, es decir, las líneas que definen las juntas de la piedra y las curvas de nivel de la forma de la fachada, necesariamente tuvieron que ser procesados para poder adaptarlos a las exigencias

de las diferentes técnicas de generación de superficies con las que cuentan los sistemas informáticos.

De esta manera, el primer paso consistió en la transformación de todas estas líneas en *cadena complejas* o *polilíneas*. Pero la operación más importante que se realizó sobre estos datos, fue la de generar líneas de sección transversales y longitudinales. Una condición indispensable para poder generar superficies con metodologías como las de *barrido* o *curvas de paso*. Para elaborar estas secciones se utilizaron las curvas de nivel y, a través de planos equidistantes perpendiculares a la orientación de estas curvas, por intersección, se consiguió obtener los puntos de paso necesarios que definen a este tipo de líneas. Las secciones obtenidas, ofrecieron la posibilidad de configurar la superficie utilizando tres metodologías distintas.

En el primer caso, se aplicó una superficie de *barrido* definida por una generatriz de salida, una generatriz de llegada y una curva guía. Sin embargo, el resultado fue muy pobre. La superficie obtenida se adaptaba muy poco a la forma real, puesto que presentaba muy pocos puntos de contacto con las curvas de nivel originales. Este comportamiento nos permitió verificar que esta metodología no es adecuada para generar superficies tan complejas como la que estábamos intentando resolver. Con la esperanza de obtener mejores resultados, el segundo ensayo se realizó basándose en la metodología de generación de superficies por secciones paralelas (*lofted surfaces*). La aplicación de este sistema, utilizando secciones verticales, dio resultados mucho más satisfactorios que en el primer caso. De todas maneras, el grado de adaptación de la superficie resultante aún presentaba desviaciones importantes respecto a la forma definida por las curvas de nivel básicas, sobre todo en las zonas de la forma en las cuales existían cambios de curvatura muy acentuados. Estas deficiencias nos hicieron dar cuenta de que el problema no estaba en el número reducido de secciones que se habían empleado. Para resolverlo decidimos utilizar secciones verticales y horizontales al mismo tiempo, que nos permitiesen utilizar la metodología de generación de superficies tipo *red* (*network surfaces*). Sorprendentemente este método no nos permitió obtener ningún resultado razonable. Los primeros intentos dieron un error durante el

procesamiento de datos. Al programa le era imposible establecer una superficie controlada por una sola ecuación analítica que se apoyara en todas las secciones que habíamos establecido. Este nuevo problema tenía dos soluciones: o establecer funciones polinómicas de grado muy alto, o definir tolerancias muy pobres. Ambas condiciones nos hicieron desistir en el intento de seguir realizando pruebas, puesto que este tipo de parámetros alteraba desde un principio la configuración de una superficie capaz de adaptarse con precisión a la forma definida por las curvas de nivel de la fachada. De esta manera, las grandes expectativas que habíamos puesto en los sistemas de generación de superficies controladas analíticamente, definitivamente se desvanecieron y tuvimos que adoptar un camino completamente distinto

Rutinas, poliedros y más rutinas.

La siguiente experiencia se desarrolló basándose en la utilización de *mallas poliédricas*, un sistema muy pobre en cuanto a tratamientos y manipulaciones, pero muy eficaz a la hora de definir formas muy complejas. Esta posibilidad se pudo plantear gracias a los estudios que habíamos llevado a cabo en el campo de la representación de superficies topográficas. Estos estudios nos condujeron a elaborar una aplicación informática que pudiera generar una *mallá* espacial capaz de adaptarse a una serie de curvas desarrolladas sobre planos paralelos. La colaboración decisiva, en la elaboración de esta aplicación, de una persona muy familiarizada con este tipo de problemas, como Joan Quílez M., nos permitió obtener una entidad tridimensional con estas características a partir de una selección de *polilíneas* bidimensionales posicionadas espacialmente en planos paralelos y a cotas distintas.

La gran ventaja de esta metodología es que nos permitía utilizar directamente las curvas de nivel de la fachada, obtenidas fotogramétricamente, como líneas generadoras de la superficie que definen. Sin embargo, para desarrollar este proceso fue necesaria la reelaboración de estas curvas, definidas como *cadena complejas*, en *polilíneas* bidimensionales, y así asegurar la posición de todos sus vértices en un solo plano. La corrección de esta anomalía de las curvas de nivel, mediante una rutina informática, se tuvo que realizar debido a las pequeñas imprecisiones que siempre se producen al hacer el seguimiento de formas muy complejas en el aparato restituidor, y que son imperceptibles en innumerables circunstancias, pero inaceptables para los cálculos que desarrolla un programa informático.

Una vez determinadas las polilíneas que definían las curvas de nivel de la superficie, al aplicar nuestro programa de elaboración de *mallas* espaciales, el tiempo del proceso de cálculo se hizo interminable, y nos dimos cuenta que la cantidad de puntos extraídos en la restitución fotogramétrica había generado polilíneas con una excesiva cantidad de vértices. Para resolver este problema, se elaboró otra rutina informática que permitiese reducir el número de vértices de las curvas de nivel sin variar sustancialmente su recorrido. Los parámetros que se establecieron con esta finalidad fueron tres, y

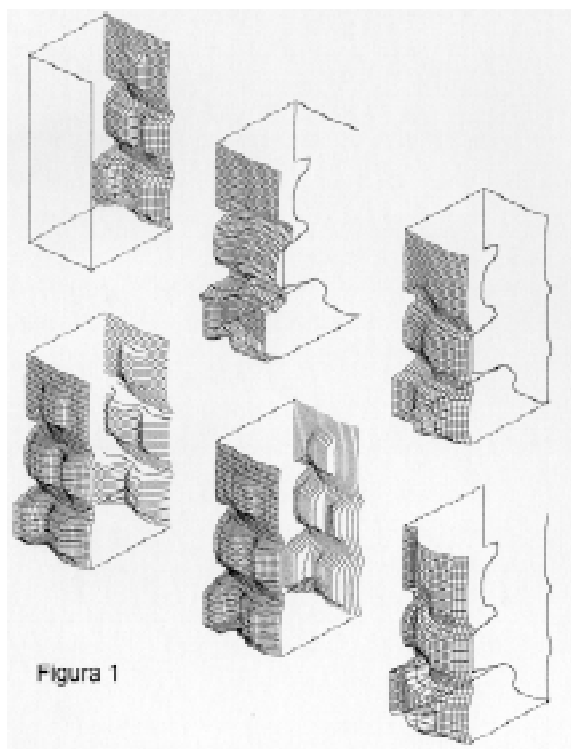


Figura 1

Fig.1

la reducción de sus vértices se realizó en base: Al control de una longitud mínima para sus segmentos. A partir de una restricción de la desviación de sus vértices respecto a la dirección de la curva. Y a través de la limitación del valor máximo del ángulo entre dos segmentos contiguos.

Aplicando este programa auxiliar y procesando las curvas de nivel mediante la aplicación informática de generación de *mallas*, se consiguieron unos resultados excepcionales, si los comparamos con los anteriores, tanto por el grado de adaptación de la superficie resultante a los datos de partida como por el tiempo de procesamiento utilizado

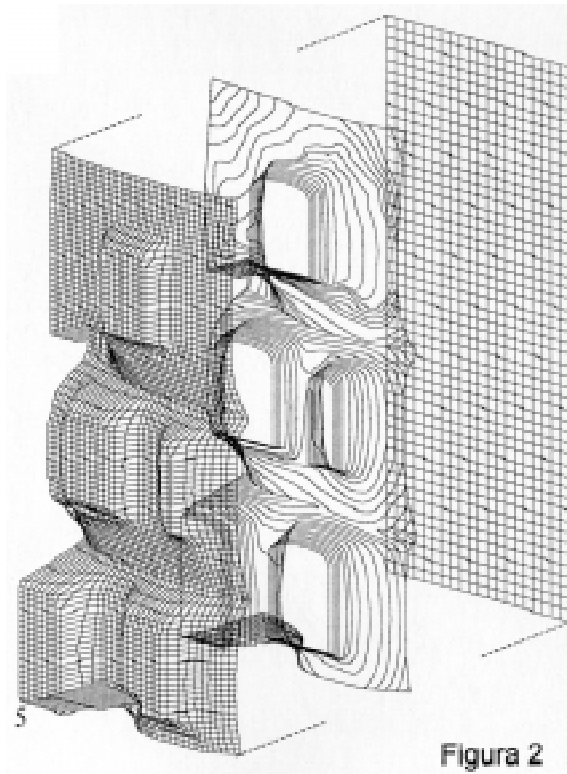
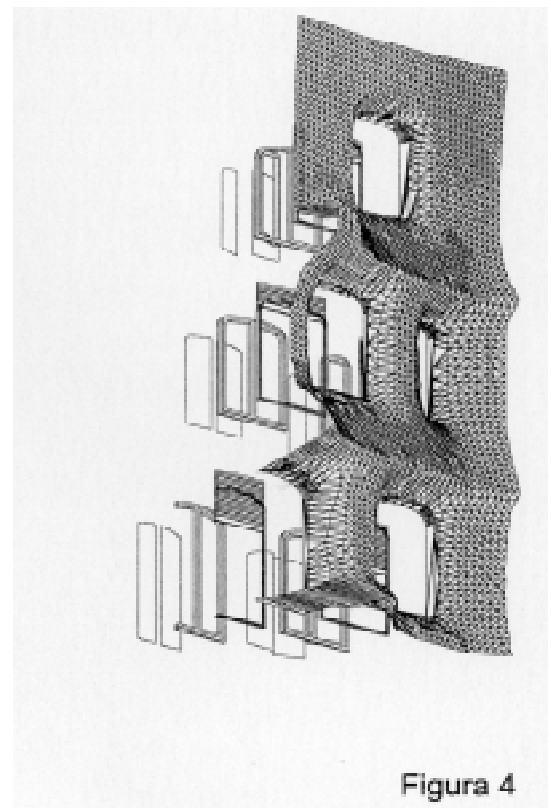
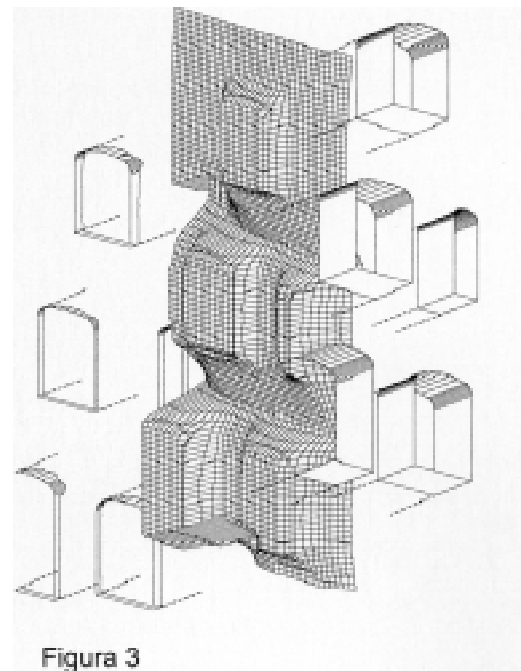


Fig.2

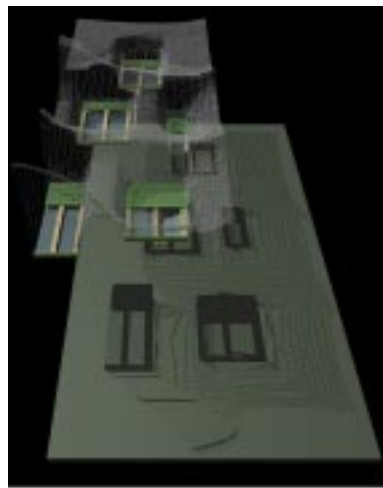
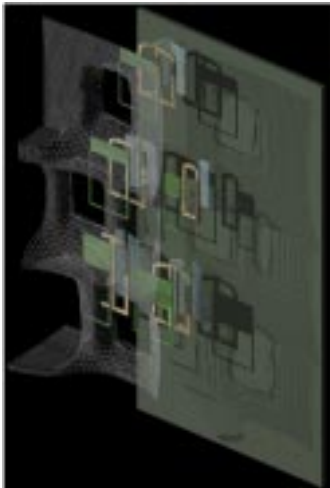
Con estos resultados se puede confirmar que la metodología que utiliza curvas de nivel y *mallas* es la más idónea para conseguir la elaboración de maquetas virtuales de superficies muy irregulares, cuyos puntos exigen la determinación de unas posiciones muy precisas en el espacio



Figs. 3 y 4

Sin embargo, el trabajo aún estaba incompleto, puesto que la *malla* que resolvió la superficie de la fachada tuvo que ser modificada para generar los vanos producidos por las aberturas de las ventanas. La solución a este problema, inabordable mediante la restitución fotogramétrica, se llevó a cabo determinando los límites de las aberturas y proyectándolos sobre la superficie, de modo

que pudiesen crear las perforaciones correspondientes y con ello los nuevos *bordes* de su forma. La colaboración de Xavier Moliner M. en la elaboración de este delicado proceso, hizo posible que la concreción de la estructura final contase con la adición de los elementos de carpintería que conforman los ventanales de la fachada



Figs. 5 y 6

Si bien la resolución de superficies mediante *mallas* espaciales, presenta una rigidez en el tratamiento de sus contornos, producida por su poliedrización, la *suavización* de las superficies definitivas se logró por medio de las herramientas que facilitan los sistemas informáticos de simulación lumínica. Este proceso final nos permitió estudiar los efectos de luz y sombra para poder

entender los *bordes* y *límites* reales de una superficie arquitectónica que carece de aristas como límite visual en cualquiera de sus representaciones. La aplicación de acabados y texturas nos ofreció la posibilidad de infinitos planteamientos en la representación de su forma arquitectónica, puesto que se podía conseguir tantas visualizaciones como se quisiese al disponer de una maqueta virtual del modelo real.



Figs. 7, 8, y 9

Experiencia y arquitectura.

La experiencia descrita en este trabajo, nos ha hecho pensar que la importación al campo de la arquitectura de las técnicas desarrolladas en el campo informático para realizar el trazado de formas basándose en superficies, probablemente exija un cambio de actitud. Un cambio de actitud que permita renovar una disciplina actualmente obsesionada por conseguir el mayor grado de libertad formal posible. Pero que al mismo tiempo sigue utilizando sistemas y herramientas gráficas definitivamente al *borde* del anquilosamiento y al *límite* de sus posibilidades. Incapaces de soportar las exigencias de control y concreción formal de unas aspiraciones de diseño más comprometidas con el mundo de las ideas estéticas que con sus posibles soluciones constructivas.

Bibliografía

- BONNEAU, G. P.**, «Weight Estimation of Rational Bézier Curves and Surfaces», en Geometric Modeling. New York: Springer-Verlag, 1993.
- BRUNET G.**, «Geometric Design with Trimmed Surfaces», en Geometric Modeling. New York: Springer-Verlag, 1993.
- DEGEN, W. L. F.**, «The Shape of the Overhauser Spline», en Geometric Modeling. New York: Springer-Verlag, 1993.
- FOLEY, T. A., DAYANAND, S. & ZECKZER D.**, «Localized Radial Basis Methods Using Rational Triangle Patches», en Geometric Modeling. New York: Springer-Verlag, 1993.
- HAGEN, H. & HAHMANN, St.**, «Stability Concept for Surfaces», en Geometric Modeling. New York: Springer-Verlag, 1993.
- LASSER, D. & BONNEAU, G. P.**, «Bézier Representation of Trim Curves», en Geometric Modeling. New York: Springer-Verlag, 1993.
- SAPIDIS, N. S. & KAKLIS, P. D.**, «A Hybrid Method for Shape-Preserving Interpolation with Curvature-Continuous Quintic Splines», en Geometric Modeling. New York: Springer-Verlag, 1993.
- OLFE, D. B.**, Computer Graphics for Design. From Algorithms to AutoCAD., New Jersey: Prentice-Hall, 1995.
- OLFE, D. B., Computer Graphics for Design. From Algorithms to AutoCAD., New Jersey: Prentice-Hall, 1995.
- HOSCHEK, J. & HARTMANN, E.**, « G^1 Functional Splines for Modeling», en Computer Graphics. Geometric Modeling. New York: Springer-Verlag, 1991.
- ROSE, T., LOUNSBERY, M. & GOLDMAN R.**, «A Tutorial Introduction To Blossoming», en Computer Graphics. Geometric Modeling. New York: Springer-Verlag, 1991.
- FARIN, Gerald.** «Rational B-Splines», en Computer Graphics. Geometric Modeling. New York: Springer-Verlag, 1991.
- DAEHLEN, M. & LYCHE, T.**, «Box Splines and Applications», en Computer Graphics. Geometric Modeling. New York: Springer-Verlag, 1991.
- MORTENSON, M. E.**, Geometric Modeling, New York: Wiley Computer Publishing, 1997.
- GOMEZ SERRANO, J.** La Sagrada Família de Gaudí al CAD, Barcelona, UPC Edicions, 1996. KARARA, H. M.: Non-Topographic Photogrammetry, Falls Church Virginia, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 1989