



Principles and characteristics of CAD geometric modelling of historical buildings

Principios y características de los modelos geométricos CAD en edificios históricos

DAVID MENCÍAS CARRIZOSA

Dr. Arquitecto, Departamento de Construcción y Tecnología Arquitectónicas, Universidad Politécnica de Madrid, España
dameca@gmail.com

PEPA CASSINELLO PLAZA

Dra. Arquitecta, Departamento de Construcción y Tecnología Arquitectónicas, Universidad Politécnica de Madrid, España
mariajosefa.cassinello@upm.es

IGNACIO PAYÁ ZAFORTEZA

Dr. Ingeniero de Caminos, Departamento de Ingeniería de la Construcción y Proyectos de Ingeniería Civil, Universitat Politècnica de València, España
igpaza@upvnet.upv.es

- ◊ Most common geometric models in heritage are point clouds, wired-frame and curves and surfaces models.
- ◊ All the techniques employ the databases of geometric points of the survey as input.
- ◊ The output information consists of points database and in some cases additional databases.

The first and unavoidable phase in the intervention in the Heritage and the existing building is the realization of a survey. Currently, its purpose is to build a digital geometric model in a computer system that serves to represent the built object and also serve as a geometric basis for further analysis. This paper takes a tour of the models used in building the survey data and what input and output information they use. These models are reduced to point clouds, wired-frame and curves and surfaces models. Solid modelling is not widespread in this field given the difficulties presented by its application. All of them have in common that they codify by means of a database that includes the points of the survey and in some occasions another additional database is necessary to complete the reconstruction of the f the geometric information. This information management allows the development of computer applications that automatically analyze existing constructions based on geometry, such as the verification of the equilibrium of masonry structures. This work allows, therefore, clarifying the field that connects the geometric modelling, analytical representation and computational techniques with the architectural survey and intervention in Heritage.

Heritage, CAD, Digital Model, Restoration, Analytic representation

- ◊ Los modelos geométricos más frecuentes en patrimonio son nubes de puntos, alámbricos y de curvas y superficies.
- ◊ Todas las técnicas emplean las bases de datos de puntos geométricos del levantamiento como entrada.
- ◊ La información de salida consiste en base de datos de puntos y en algunos casos bases

La intervención en el Patrimonio y la Edificación existente tiene como primera fase ineludible la realización de un levantamiento, cuya finalidad consiste, en la actualidad, en construir un modelo geométrico digital en un sistema informático que sirva para representar el bien construido y servir de base geométrica para análisis posteriores. Este trabajo realiza un recorrido por los modelos empleados en edificación histórica para determinar las técnicas de modelado que sirven para codificar dicha información y qué información de entrada y salida emplean. Estos modelos se reducen a nubes de puntos, alámbricos y curvas y superficies, ya que el modelado mediante sólidos (BIM) no se encuentra extendido en este campo dadas las dificultades que presenta su aplicación. Todos ellos tienen en común que se codifican mediante una base de datos que incluyen los puntos del levantamiento y en algunas ocasiones es necesario otra base de datos adicional para completar la reconstrucción de la información geométrica. La gestión de esta información permite desarrollar aplicaciones informáticas que, de manera automática, realicen análisis de las construcciones existentes basados en la geometría, como el caso de la verificación del equilibrio de estructuras de fábrica. Este trabajo permite, por tanto, clarificar el campo que conecta el modelado geométrico, la representación analítica y las técnicas computacionales con el levantamiento arquitectónico y la intervención en Patrimonio, y sirve de punto de partida para futuros desarrollos que permitan la gestión de la ingente cantidad de información que se genera en un levantamiento y puede ser empleada para entender el bien en el que se interviene.

Patrimonio; Diseño asistido por ordenador; Modelos Digitales; Restauración; Representación analítica

1. INTRODUCCIÓN: LEVANTAMIENTO Y MODELADO

El entendimiento del Patrimonio para su conservación, consolidación y restauración es un trabajo que requiere, en

primer lugar, un conocimiento exhaustivo de las características y materiales que configuran las propias construcciones [1]. La primera tarea que es necesaria abordar en cualquier estudio o intervención en un edificio existente es, sin duda, la

realización de un levantamiento con el objetivo inicial de poder obtener una representación fidedigna del objeto arquitectónico a tratar.

Tradicionalmente ésta ha sido la única finalidad, aunque sin embargo, la información obtenida convenientemente tratada es empleada en la actualidad para muchos más propósitos, como es el caso del análisis arquitectónico, la investigación arqueológica, la evaluación de daños, los estudios térmicos o la evaluación estructural [2].

Los procedimientos actuales pasan necesariamente por volcar la información obtenida durante el trabajo de campo en un ordenador y realizar un modelo informático del mismo.

Esta información se codifica computacionalmente mediante una serie de técnicas de modelado, sirviendo no sólo para su representación sino como base a futuros trabajos. Por ello, es necesario establecer qué condiciones reúnen los modelos informáticos para codificar la información recopilada en el levantamiento, con objeto de poder diseñar posteriores aplicaciones que interpreten correctamente dicha información.

El objetivo de este trabajo es, a partir del estudio de los modelos geométricos que existen en la actualidad, establecer las características que reúnen aquellos elementos que requieren los programas CAD (Computer Aided Design o diseño asistido por ordenador) para su construcción. Estudiando las diversas técnicas de modelado y su definición matemática, determinar qué elementos son necesarios para cada uno de ellos.

En algunos casos, el estudio de los levantamiento se ha separado de la propia disciplina del modelado [3], pero dado que las herramientas se encuentran cada vez más interconectadas, cada día es más difícil separar tecnología de procedimientos, estudiándose simultáneamente [4,5].

La obtención de la caracterización geométrica resulta de enorme utilidad para diseñar aplicaciones computarizadas que puedan gestionar de manera eficaz la enorme cantidad de datos, no sólo geométricos, que se pueden obtener actualmente de los levantamientos, especialmente en aquellas tipos arquitectónicos cuyo funcionamiento depende de características geométricas, como es el caso de las estructuras históricas de fábrica [6].

Por otra parte, la representación analítica de ciertas construcciones, como en el caso de estructuras de fábrica, permiten realizar evaluaciones estructurales de manera inmediata [7].

2. MODELADO GEOMÉTRICO Y LEVANTAMIENTO ARQUITECTÓNICO

Un modelo, en general, consiste en una representación habitualmente simplificada de un objeto real. En el caso de un modelo informático, para la representación se emplean técnicas computacionales en un entorno digital.

Estos modelos pueden ser físicos, moleculares o matemáticos [8], pero debido a el ámbito del presente trabajo se hace referencia a los primeros, dado que se trata de representar un edificio o construcción existente. En este caso, el objetivo de

la representación es la obtención de un modelo geométrico que sirva de base para análisis posteriores.

El punto de partida será, por tanto, la información obtenida en el levantamiento, bien mediante técnicas digitales, bien digitalizando la información analógica. La importancia de la fase del levantamiento, en el proceso de intervención en el patrimonio es crucial, debido a que errores de apreciación o entendimiento pueden arrastrarse a la modelización, pudiendo producir resultados alejados de la realidad [9].

A lo largo de la historia, dichas técnicas han ido evolucionando según se han ido transformado las mismas herramientas de medición y dibujo. Éstas se pueden clasificar fundamentalmente, por un lado como analógicas, a las técnicas tradicionales del dibujo manual y analítico, y por otro como digitales, que no aparecen hasta el último tramo del s. XX, donde se evidencia un verdadero avance en la precisión de los datos obtenidos [10].

Separando los propios sistemas de adquisición de la geometría y la información de los de representación, estos también pueden ser analógicos y digitales, enclavándose en los últimos la modelización geométrica.

Los primeros hacen referencia a la medición de los elementos principales del bien existente, así como la descripción de los detalles, los elementos escultóricos, mobiliarios, entre los que se encuentran los sistemas simples (niveles, plomadas, distanciómetros...), los sistemas topográficos (niveles topográficos, teodolitos, herramientas GPS, estaciones totales y escáneres láser) y los sistemas fotográficos (rectificación fotográfica y fotogrametría digital) [2].



Figura 1 (a) Toma de datos por medio de medios manuales de la Iglesia de San Salvador de Priesca [2].

Todos ellos tienen por objeto la adquisición de la información geométrica y almacenar, al menos, la posición en el espacio bien de puntos previamente seleccionados manualmente (Fig. 1.a) o bien puntos obtenidos de manera indiscriminada por medio de técnicas automáticas (Fig. 1.b).

Tanto en un caso como en otro, la validez del levantamiento depende en muchos casos de la pericia y capacidad de síntesis de la persona que lo realiza que debe evaluar previamente la necesidad o no de incorporar ciertos elementos [11].

La complejidad de este proceso debe incluir en ocasiones la superposición de diversas técnicas y una planificación adecuada que no desborde el trabajo de gabinete [12].

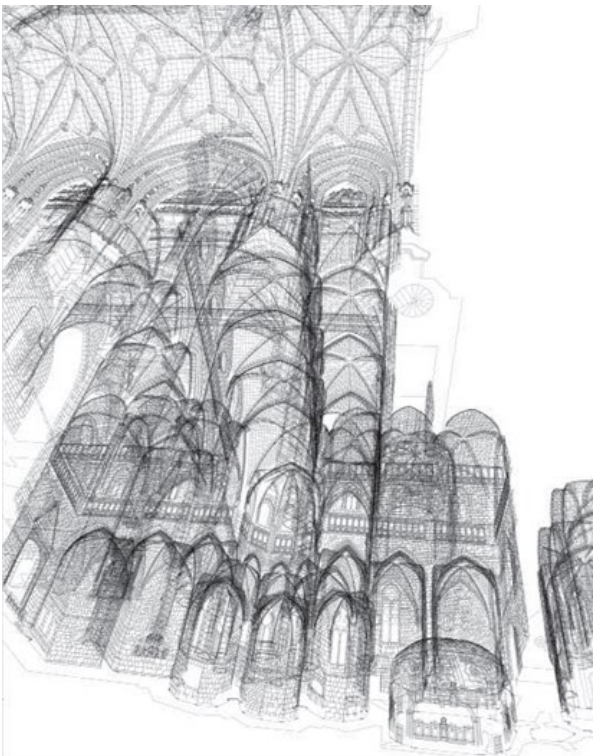


Figura 1 (b) Toma de datos exhaustiva de la Catedral de Santa María la Blanca de Vitoria [6].

3. TÉCNICAS DE MODELADO INFORMÁTICO

Como se ha mencionado anteriormente, el objetivo final del levantamiento arquitectónico es obtener una representación geométrica adecuada a la finalidad pretendida en un entorno digital, partiendo de un conjunto finito de puntos situados en el espacio.

A partir de ellos se conforma una base de datos, por medio de un software CAD, que interpreta dicha información y la visualiza en un entorno digital, con los que, por medio de algoritmos automáticos o mediante procedimientos manuales, se modela el objeto.

Dentro de un sistema CAD, el modelado geométrico trata de determinar mediante diversas técnicas la representación matemática a partir de la introducción de los datos [13], ya sea de manera manual o automática (Fig. 2). Estos modelos pueden realizarse con las siguientes técnicas [14]:

- ◆ Modelado de Puntos
- ◆ Modelado Alámbrico
- ◆ Modelado de Curvas y Superficies
- ◆ Modelado de Sólidos
- ◆ Otros Modelos

No existe un método único y la elección depende de diversos factores, que se pueden resumir fundamentalmente en los recursos tecnológicos disponibles (tanto en capacidad de hardware como en recursos del software) y el objetivo de la modelización.

El aumento de la información incorporada y la resolución del modelo incrementan de manera muy notable las necesidades informáticas, siendo un campo de investigación en las ciencias informáticas la elaboración de procedimientos y algoritmos que reduzcan los recursos computacionales necesarios.

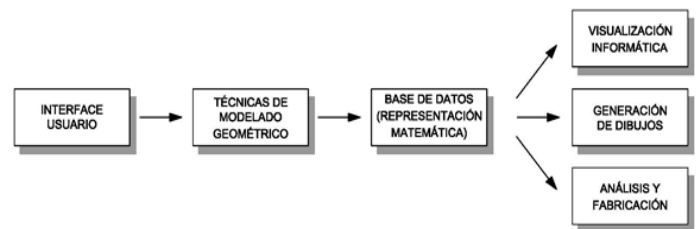


Figura 2 Esquema del papel que desempeña el modelado geométrico en un sistema de Diseño Asistido por Ordenador, redibujado a partir de [13].

Estos modelos se pueden clasificar, en función del espacio euclídeo considerado y los elementos incorporados, en [14]:

- ◆ 2D: modelización de elementos planos en R^2
- ◆ 2.5D: modelización de elementos planos en R^3
- ◆ 3D: modelización de elementos tridimensionales en R^3
- ◆ 4D: modelización 3D con información temporal.

A efectos geométricos, pero no informáticos, los dos primeros son equivalentes, ya que la información que se almacena se hace para una coordenada z constante nula o no nula.

Por otra parte, los modelos 4D, que incluyen parámetros temporales como la iluminación variable o el movimiento, se salen fuera del objeto del presente texto, aunque sin embargo resultan muy interesantes para el estudio, por ejemplo, de la evolución de daños en edificios existentes. Sin embargo desde el punto de vista operativo, la información almacenada se incrementa de manera muy notable, dado que por cada punto se debe conocer la posición espacial para los n instantes t de cada uno de los elementos de la dimensión temporal.

Por otra parte la base de datos asociadas a un modelo (estructura de datos, en terminología informática) debe permitir que, mediante un conjunto de algoritmos y operaciones, dar soporte a la información geométrica correspondiente a un objeto, y es esta base de datos la que es objeto de estudio en este trabajo, independientemente del número de puntos almacenado.

3.1. MODELADO DE PUNTOS

Los modelos de puntos o más comúnmente conocidas como nubes de puntos son conjuntos de puntos no estructurados posicionados en un espacio euclídeo tridimensional, que permiten una visualización por acumulación o sirviendo de base a un trazado geométrico realizado con posterioridad.

La información se almacena de manera muy sencilla, mediante una tabla con las coordenadas X, Y, Z de cada punto, asignando según (1):

$$S = \{P_0 \dots P_n\} \forall P_m = (x_m, y_m, z_m) \quad (1)$$

donde: S – conjunto de puntos; P_m – cualquier punto del conjunto; x_m – coordenada x del punto P_m ; y_m – coordenada y del punto P_m ; z_m – coordenada z del punto P_m .

Este modelo es muy habitual cuando se toman puntos seleccionados manualmente mediante estación total láser (Fig. 3), previamente seleccionado [15] o mediante obtención masiva por medio de escáner láser donde es necesario refinar empleando algún tipo de algoritmo que elimine el ruido [16].

En este último caso, es habitualmente necesario un postproceso de segmentación que permita asignar entidades geométricas a conjuntos de puntos [17].

Algunas herramientas tecnológicas son capaces de recabar información adicional, tal como el color o la reflectividad del material, que sin embargo no son relevantes a efectos geométricos y por tanto, no se incorporan directamente a un modelo estrictamente geométrico.

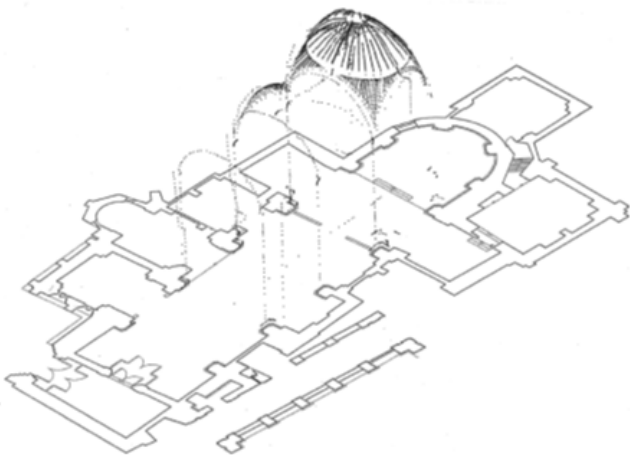


Figura 3. Nube de Puntos de las cúpula de la Iglesia de La Peregrina de Sahagún realizada por A. López Mozo [15].

3.3. MODELADO ALÁMBRICO

Los modelos alámbricos representan la visualización tridimensional más simple posible, y por tanto, la que menos recursos requiere, ya que se representa exclusivamente el objeto mediante aristas y vértices. La información del levantamiento constituyen los vértices expresada de la misma forma que en la nube de puntos mediante la ecuación (1). A este conjunto, que se almacena en una base de datos

independiente, se le añade un segundo conjunto vectorial de aristas [14] de la forma que se indica en (2):

$$\vec{A} = \{ \vec{P_0 P_1} \dots \vec{P_{n-1} P_n} \} \quad (2)$$

donde: A – conjunto vectorial de vértices; $P_0 P_1$ – arista situada entre el punto P_0 y el punto P_1 .

Se trata de la opción más fácil de redibujado y regenerado, y aquella en la que se requieren recursos informáticos menores y donde los algoritmos de representación resultan más sencillos.

Sin embargo, por el contrario, requiere una doble estructura de datos (topológica y geométrica) para su introducción y además puede dar resultados ambiguos y sin sentido real [13]. Se emplea habitualmente como una primera aproximación, dado su facilidad de regeneración en el dispositivo de salida.

3.4. MODELADO DE CURVAS Y SUPERFICIES

El modelo geométrico plano mediante curvas es el más habitual en la representación CAD de edificación y habitualmente es la que proporciona mayor exactitud y control sobre la forma. Por el contrario, dado el desarrollo tecnológico, el modelado de superficies es el que marca la tendencia en el campo de la representación de edificios históricos.

Desde el punto de vista de representación matemática, ambos tipos son similares, aunque como es lógico, el de superficie incluye una variable más.

La información geométrica se almacena como elementos unidimensionales (puntos) directamente volcada del levantamiento, bidi-mensionales (curvas o segmentos) o tridimensionales (superficies).

Para ello se toma, bien una primitiva (cuando se estima que la realidad hace referencia a una figura geométrica idealizada) almacenada con su ecuación analítica, o bien, a partir de una serie de puntos que sirven para construir la curva o superficie. Ésta se puede realizar bien por interpolación bien por aproximación, o en el caso de superficies a partir de conjunto de puntos, mediante mallas.

3.4.1. INTERPOLACIÓN

La interpolación trata de construir una función algebraica, de manera que para valores predeterminados de la variable independiente, tome ciertos valores conocidos.

Se trata de la aplicación al modelado geométrico del procedimiento clásico de aproximación a funciones o a conjuntos.

Los métodos de interpolación son numerosos y diversos, y su aplicación es asimismo muy variada. Se empezaron a desarrollar en el s. XVIII en el marco del análisis matemático y la geometría analítica [18]:

- ◆ Interpolación lineal

- ◆ Lagrange
- ◆ Hermite
- ◆ Splines lineales
- ◆ Splines cúbicos

La representación matemática de estos modelos puede ser bien la base de datos de puntos de interpolación, donde la ordenada correspondería al nodo y la abscisa a la imagen o bien una representación analítica del polinomio interpolador que en el caso de curvas planas sería según se expresa en (3).

$$C(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_{n-1}x^{n-1} + a_nx^n \quad (3)$$

donde: Q – polinomio interpolador de grado n; a_0 [...] a_n

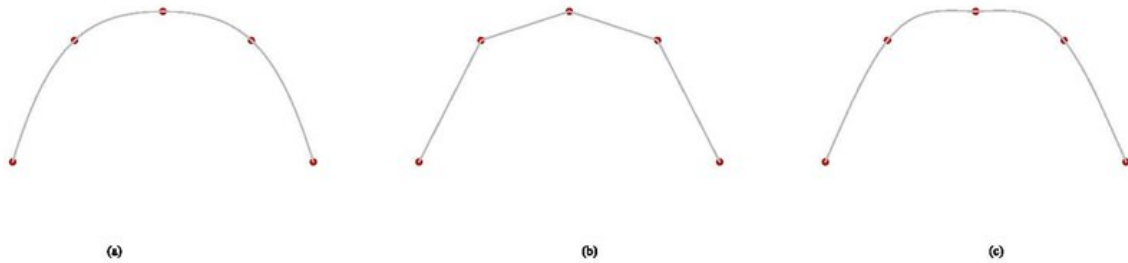


Figura 4. Representación de la interpolación de un arco de medio punto mediante el polinomio de Lagrange (a) splines lineales (b) y splines cúbicos (c) [Imagen del autor]

3.4.2. APROXIMACIÓN PARAMÉTRICA

Las curvas y superficies aproximadoras surgen a partir de la interpolación mediante Splines, empleando una base de polinomios que permite el control local de las curvas. Escrita inicialmente en 1912 por S. Bernstein para la aproximación uniforme a funciones continuas [20]:

Las curvas de Bézier se aproximan a partir de $n+1$ puntos de control P_0, \dots, P_n , creándose una polígono de control con la poligonal que une dichos puntos.

Esta poligonal es la que determina la forma final de la curva. Se definen matemáticamente, a partir de los polinomios de Bernstein, como [21], indicado en (5).

$$C(t) = \sum_{k=0}^n P_k B_k(x) \quad 0 \leq t \leq 1 \quad (5)$$

donde: C – curva paramétrica; t – parámetro; P_k – k-ésimo punto del polígono de control; B_k – k-ésimo polinomio de Berstein.

Las curvas B-Splines, toman su nombre de las Splines (herramienta manual empleada para el diseño de cascos de barcos, que mediante una serie de pesos permitía controlar la forma, a las que se le añade el prefijo B que hace referencia a “básico” [22].

Se trata de una curva formada por la sucesión de segmentos curvos de Bézier. Se define a partir de $n+1$ (P_0, \dots, P_n) puntos de control, el grado k de la curva menor o igual que n y un vector de nudos $X = (a = x_1, \dots, x_{n+k+2}=b)$, que se

coeficientes del polinomio de manera que se cumpla (4):

$$C(x_m) = y_m \quad (4)$$

donde: Q – polinomio interpolador de grado n; x_m – coordenada x del punto P_m ; y_m – coordenada y del punto P_m .

Cabe mencionar que, para realizar la interpolación de un gran número de puntos, la interpolación polinómica única de grado elevado (Lagrange, Hermite, Newton) requiere una gran capacidad de cálculo, pudiéndose producir errores tanto numéricos como distorsiones respecto a la curva deseada, como el fenómeno de Runge (Fig. 4).

Estos errores se minimizan eligiendo los nodos específicamente y un método de interpolación adecuado al tipo de datos, como por ejemplo, los nodos de Chebyshev [19]

representa analíticamente como se indica en (6):

$$C(t) = \sum_{i=1}^{n+1} B_{i-1} N_{i,k+1}(t) \quad a \leq t \leq b \quad (6)$$

donde: C – curva paramétrica; t – parámetro; P_k – k-ésimo punto del polígono de control; B_{i-1} – i-1-ésimo polinomio de Berstein; $N_{i,k+1}$ – base de la función definida en la forma de Cox-De Boor.

Estas curvas permiten un mayor control del diseño y la forma final, por medio de los puntos del polígono de control y del grado de la curva. Además, permite controlar la continuidad entre curvas, lo que asegura el grado de la misma según la exigencia. Aunque en ocasiones, la continuidad geométrica es necesaria, en otras, para suavizar, es necesario dar continuidad a las tangentes o a las curvaturas, así como elevar el grado, igualando sus correspondientes vectores.

La edición de curvas primitivas formuladas mediante las ecuaciones anteriormente expuestas, es el procedimiento que realiza la modelización mediante control de forma. Por tanto, es preciso un tipo de representación que permita la edición rápida, inmediata y con efectos locales de los puntos de control, de todos los tipos de curvas incluyendo las cónicas, que no pueden ser representadas mediante polinomios.

Para ello se dispone de las curvas NURBS (Non Uniform Rational B-Splines, en español, B-Splines racionales no uniformes), que se han popularizado rápidamente entre los programas de CAD, debido a la versatilidad que produce su modelado. Además, en los últimos años se ha ido

desarrollando para confeccionar los modelos geométricos para análisis FEM, que realiza el IGA (Isogeometric Analysis o análisis isogeométrico) [23]. La definición analítica se basa en las B-splines pero incluyendo el vector pesos y las curvas racionales [21], según se muestra en (7):

$$C(t) = \frac{\sum_{i=1}^{n+1} w_{i-1} B_{i-1} N_{i,k+1}(t)}{\sum_{i=1}^{n+1} w_{i-1} N_{i,k+1}(t)}, \quad a \leq t \leq b \quad (7)$$

donde: C – curva paramétrica; t – parámetro; P_k – k-ésimo punto del polígono de control; B_{i-1} – i-1-ésimo polinomio de Bernstein; $N_{i,k+1}$ – base de la función definida en la forma de Cox-De Boor; w_{i-1} – elemento i-1-ésimo del vector peso.

3.4.3. MALLAS

La modelización mediante mallas permite la construcción de un modelo con ayuda de la representación de las superficies, mediante un conjunto de polígonos convexos a partir de un número de puntos predefinidos anteriormente. Por tanto, permite crear la “piel” en el espacio de un objeto mediante elementos planos. Habitualmente se emplean triángulos, aunque para determinadas geometrías son necesarios cuadriláteros o hexágonos.

Este sistema permite el trabajo con diferentes resoluciones, ya sea para la visualización como para la propia representación analítica, lo que permite optimizar los recursos. El aumento de resolución se consigue añadiendo polígonos mediante la subdivisión.

La estructura de datos es similar a la caso del modelo alámbrico, ya que se almacena por un lado los vértices, por

otro las aristas y finalmente las caras o polígonos. En el caso de triangulación, el objeto se representa mediante un conjunto vectorial de triángulos [24], según (8):

$$M = \{T_0 \dots T_n\} \quad \forall T_m = (P_a P_b P_c) \quad (8)$$

donde: M – Malla; T – Triángulo; P_a , P_b , P_c – vértices del triángulo.

Asimismo es necesario almacenar una base de datos con el orden de la triangulación, de manera similar a los modelos alámbricos, de manera que sea posible la manipulación y comprobación de dicha malla.

La creación de las mismas, se puede realizar mediante diferentes procedimientos. Cabe destacar la triangulación de Delaunay, que determina la condición de que la circunferencia circunscrita de cada triángulo de la malla no contenga ningún vértice de otro triángulo, implementándose diversos algoritmos que lo verifican o modifican la triangulación en caso de no verificarse. Diversos *plugins* o aplicaciones específicas realizan estas tareas adicionalmente a los programas de CAD.

3.5. MODELADO DE SÓLIDOS

Por último, cabe destacar el modelo de sólidos también, que se encuentra mucho más extendido en el diseño de obra nueva que en la intervención en edificación existente [25,26]. Esta metodología se basa en la creación de modelos virtuales mediante elementos constructivos paramétricos y la vinculación a bases de datos externas con información adicional.

Se trata de un sistema actualmente poco extendido en Patrimonio fundamentalmente por dos dificultades. La primera es la caracterización de los materiales, ya que siendo muy

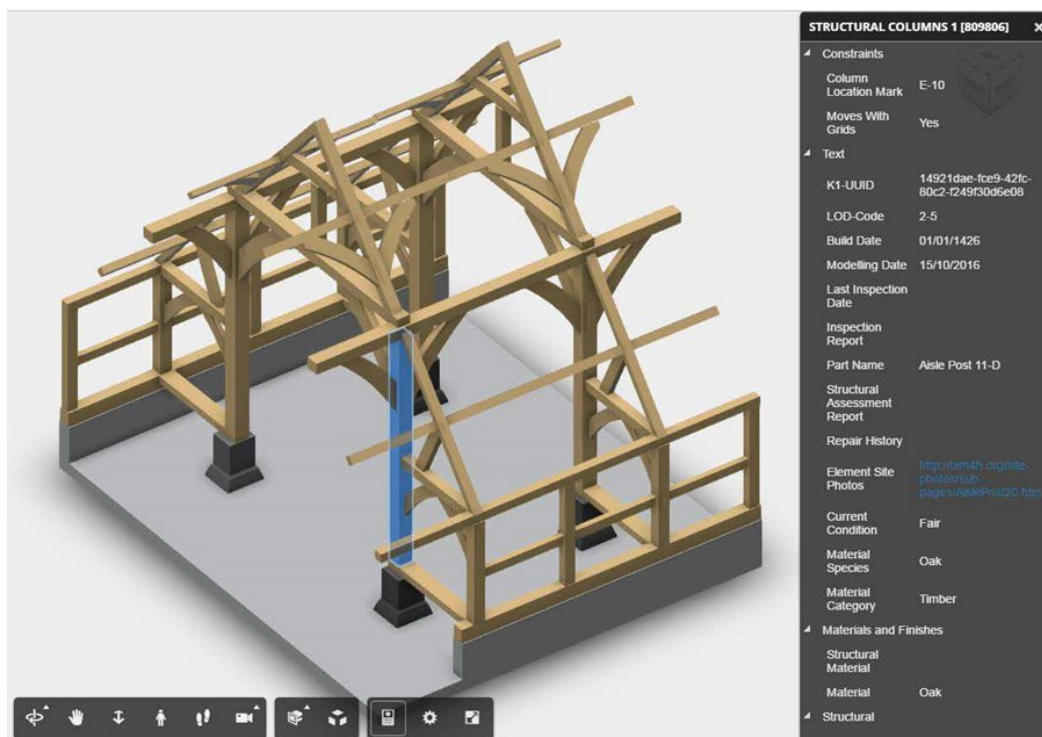


Figura 5. Modelo de la estructura del Granero Harmondsworth, Inglaterra [26]

fácil en obra nueva, en edificación existente no suele ser tan sencilla y en especial en fábricas dado que existe gran variabilidad de algunas características.

Por otra parte, la estandarización y parametrización de elementos constructivos en construcción histórica es mucho más complicada, dada la extensa cantidad de variables existentes, controlables y no controlables, y que además cuenta con la dificultad de la excesiva simplificación geométrica que es necesario realizar para adaptarse a los parámetros del software existente (fig. 5).

Sin embargo, a pesar de las dificultades expresadas, se están realizando algunos esfuerzos importantes en esta dirección. Para ello se recurre a una excesiva simplificación geométrica e idealización de las formas que desvirtúan la propia geometría del edificio y en muchos casos esconden indicios de daños de que se manifiestan geoméricamente [29].

3.6. OTROS MODELOS

Con objeto de representar otro tipo de datos que no son exactamente modelos geométricos, se emplean diferentes modelizaciones gráficas en el campo de las ciencias computacionales, que son específicos para cada objetivo, tales como el modelado de fluidos, de elementos naturales, de telas en movimiento o de campos tensoriales. Estos se pueden clasificar como:

- ◆ Geometría fractal
- ◆ Modelos gramaticales
- ◆ Sistemas de partículas
- ◆ Modelos por características físicas
- ◆ Modelos de visualización científica

Sin embargo, ninguno de ellos es de aplicación en el campo del Patrimonio, por lo que no se cree conveniente profundizar en ellos, para la finalidad de este trabajo. Las técnicas de modelado y su representación analítica en estos casos se

pueden consultar en [14].

4. GESTIÓN DE LA INFORMACIÓN GEOMÉTRICA DE ENTRADA Y DE SALIDA

Una vez realizado el recorrido por los diferentes modelos analizadas, se puede comprobar que en todos los modelos, ya sea el usuario quien lo introduce de manera manual o se importan de un archivo de manera automática, la información de entrada es siempre un conjunto de puntos P.

Todas las técnicas de modelado parte de un numero finito de puntos. Por tanto, todo la información adicional obtenida en el trabajo de campo (material, composición constructiva, color,...), no se incorpora directamente en el modelo geométrico y en caso de ser necesaria, deberá conformarse mediante base de datos adicional.

Tanto en las nubes de puntos como en los modelos alámbricos, la obtención de los conjuntos de las coordenadas es inmediata, ya que el conjunto P se obtiene directamente en un caso directamente del levantamiento y en el otro, de los vértices del modelo. Si ese conjunto representa los puntos de paso de una función interpoladora, se pueden relacionar directamente con los nodos de interpolación y soportes de interpolación respectivamente.

En los casos que se emplean curvas o superficies interpoladas, la obtención también inmediata, ya que el propio conjunto de puntos de interpolación pasa a ser los puntos de soporte y la imagen o imágenes (según sea en el plano o el espacio) de los mismos.

Si la geometría se encuentra modelada con curvas o superficies por aproximación paramétrica, el conjunto de puntos del levantamiento se almacena como la lista del polígono de control que se complementa con la lista de pesos de los nodos (en caso de NURBS o una lista de valores unitarios para curvas de Bézier), el grado de la curva y el vector de nudos.

	Información de entrada procedente del levantamiento	Información de salida codificada
Modelo de puntos	Puntos	Puntos
Modelo alámbrico	Puntos	Vértices y Secuencia de Aristas
Modelo de Curvas y Superficies interpoladas	Puntos (Soporte e Imagen)	Puntos / Polígono de Control
Modelo de Curvas y Superficies aproximadas	Puntos	Puntos / Polígono de Control / Información analítica
Modelo de Superficies de Malla	Puntos	Vértices de los polígonos

Tabla 1: Información geométrica de entrada y salida para cada técnica de modelado.

La gestión de la información obtenida del levantamiento parte necesariamente por la incorporación de una base de datos de puntos al software CAD. En función de la técnica de modelado empleada (Fig. 6) las información será más

compleja, empezando por la base de puntos exclusivamente y terminando con las técnicas de aproximación de curvas y superficies que requieren una base de información analítica que incluye el vector pesos y el vector nodos.

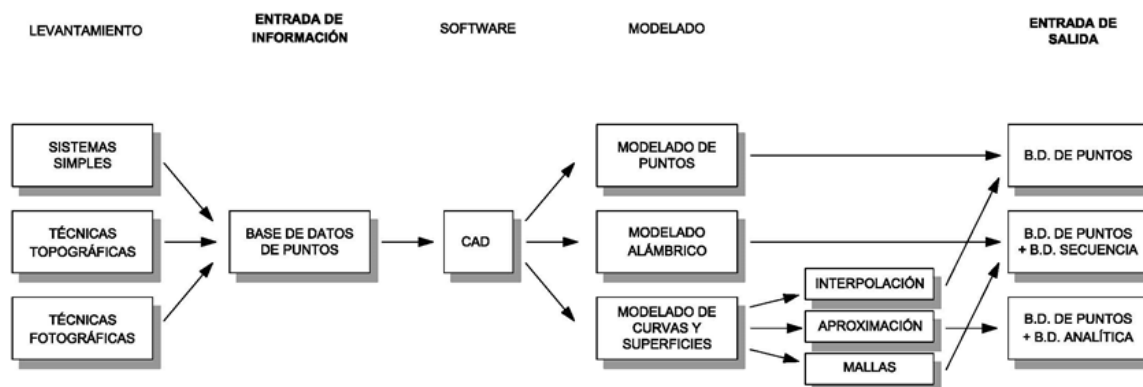


Figura 6. Esquema del flujo de la información necesaria para modelizar un edificio existente.

4. CONCLUSIONES

El presente texto hace un recorrido por las técnicas de modelado más extendidas en el campo del patrimonio y cómo se representan matemáticamente para conformar las bases de datos que los sistemas CAD emplean para la modelización. Por ello, se puede concluir que el flujo de información proveniente del levantamiento pasa necesariamente por emplear conjunto de puntos como entrada.

Los modelos geométricos que sirven como punto de partida para el trabajo en Patrimonio y la construcción existente, se reducen a tres: nubes de puntos, alámbricos y curvas y superficies, que a su vez se puede dividir en modelos de interpolación, aproximación y el caso particular de superficies mediante mallas.

Todos ellos tienen en común que se codifican mediante una base de datos que incluyen los puntos del levantamiento. En casos concretos son necesarios base de datos adicionales para completar la reconstrucción de la información geométrica.

Por tanto, las aplicaciones informáticas que se diseñen en base a dichos modelos, deben trabajar al menos con una base de datos de puntos en su representación mediante coordenadas, independientemente del espacio donde se realice.

Además, en el caso de modelos alámbricos y mallas, es necesaria la incorporación de una base de datos de la secuencia de formación del conjunto de puntos y por el contrario mientras que en los modelos de curvas o superficies por aproximación es necesario añadir el Polígono de Control.

5. REFERENCIAS

[1] ICOMOS/ISCARSAH Committee "Recommendations for the Analysis, Conservation y Structural Restoration of Architectural Heritage" Barcelona:

International Scientific Committee on the Analysis and Restoration of Structures of Architectural Heritage. 2005.

[2] Martín Talaverano, R. "Documentación gráfica de edificios históricos: Principios, aplicaciones y perspectivas." *Arqueología de la Arquitectura* (11): 011. 2014.

[3] Almagro, A. "Levantamiento arquitectónico". Granada: Universidad de Granada. 2004.

[4] Andrés, M. A. N., Pozuelo, F. B. "Evolution of the architectural and heritage representation". *Landscape and Urban planning*, 91(2), 105-112. 2009.

[5] Pajas, J., Oliván, A. S. "Métodos, técnicas y estándares para la documentación geométrica del patrimonio cultural." *Virtual Archaeology Review*. vol. 3, no 5, p. 38-42. 2012.

[6] Mencías, D., Cassinello, P., Payá-Zaforteza, I. "Metodología para el uso de la geometría analítica en el análisis de fábricas aplicado al puente de Arroyo Meaques de Madrid". En *Miradas a la investigación arquitectónica: construcción, gestión, tecnología*. I Congreso Internacional sobre Investigación en Construcción y Tecnología Arquitectónicas. Madrid, 2014, pp. 167-170.

[7] Mencías Carrizosa, D. "La geometría analítica como herramienta de análisis estructural de fábricas históricas". 2017. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. Arquitectura.

[8] Mortenson, M. E. "Geometric modeling". John Wiley & Sons, New York. 1997.

[9] Cámara, L., Latorre, P. "El Modelo Analítico Tridimensional obtenido por fotogrametría. Descomposición, manipulación y aplicaciones en el campo de la restauración arquitectónica". *Arqueología de la Arquitectura*, (2), 87-96. 2003.

[10] Latorre, P., Cámara, L. "El levantamiento para la restauración: No hay método sin herramientas." *Loggia Arquitectura & Restauración* (22-23): 16-37. 2010.

[11] Grussenmeyer, P., Landes, T., Voegtle, T., y Ringle, K. "Comparison methods of terrestrial laser scanning, photogrammetry and tacheometry data for recording of cultural heritage buildings". *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 37(B5), 213-218. 2008.

[12] El-Hakim, S., Gonzo, L., Voltolini, F., Girardi, S., Rizzi, A., Remondino, F., Whiting, E. "Detailed 3D modelling of castles". *International journal of architectural computing*, vol. 5, no 2, p. 199-220. 2007.

- [13] Wang, T. Yang, X. D. "Geometric modeling". Department of Mechanical and Industrial Engineering. University of Manitoba. 2004.
- [14] Vendrell, E. 2008. "Modelado Geométrico". Apuntes de curso. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- [15] Huerta Fernández, S.; Fuentes González, P., López Mozo, A. "Informe sobre la estabilidad de las bóvedas y el sistema de contrarresto de la nave y el crucero de la Iglesia de La Peregrina (convento de San Francisco) en Sahagún". Monografía. 2010.
- [16] Schnabel, R., Wahl, R., Klein, R. "Efficient RANSAC for point-cloud shape detection". Computer graphics forum. Blackwell Publishing Ltd, p. 214-226. 2007.
- [17] Corso, J., Roca, J. "Classification and information structure of the Terrestrial Laser Scanner, Methodology for analyzing the registered data of Vila Vella, historic center of Tossa de Mar" 8th International Conference On Virtual Cities And Territories, Rio de Janeiro, 2012.
- [18] González Urbaneja, "Raíces históricas y trascendencia de la Geometría Analítica." Sigma: Revista de Matemáticas (30): 205-236. 2007.
- [19] Fernández Jambrina, L. "Curvas y superficies en el diseño geométrico asistido por ordenador". OpenCourseWare. [Online]. Available: <http://ocw.upm.es/matematica-aplicada/curvas-y-superficies-en-el-diseno-geometrico-asistido-por-ordenador>.
- [20] Cordero, J. M., J. Cortés. "Curvas y Superficies para Modelado Geométrico". Madrid: RA-MA. 2002.
- [21] Rueda Pérez, S. "Formas Libres. Curvas NURBS" Cuadernos de apoyo a la Docencia. Madrid: Instituto Juan de Herrera. 2015.
- [22] Pottmann, H. "Architectural geometry". Bentley Institute Press, 2007.
- [23] Hughes, T.J.R., Cottrell, J.A., Bazilevs, Y. "Isogeometric analysis: CAD, finite elements, NURBS, exact geometry and mesh refinement." Computer Methods in Applied Mechanics Engineering 194 (2005) 4135–4195. 2015.
- [24] Edelsbrunner, H. "Triangulations and meshes in computational geometry". Acta numerica, vol. 9, p. 1-81. 2000.
- [25] Ragia, L., Sarri F., Mania, K. "3D reconstruction and visualization of alternatives for restoration of historic buildings: A new approach" 1st International Conference on Geographical Information Systems Theory, Applications and Management (GISTAM), Barcelona, 2015.
- [26] Del Giudice, M., Osello, A. "BIM for cultural heritage". International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 5, W2. 2013.
- [27] Historic England "BIM for Heritage: Developing a Historic Building Information Model". Swindon. Historic England. 2017.
- [28] Murphy, M., Corns, A., Cahill, J., Eliashvili, K., Chenau, A., Pybus, C., & Truong-Hong, L. Developing historic building information modelling guidelines and procedures for architectural heritage in Ireland. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences, 42. 2017.
- [29] Mencías Carrizosa, D. "El levantamiento gráfico como herramienta de diagnóstico estructural pre-liminar de edificios históricos de fábrica." En 5º Congreso de Patología y rehabilitación de edificios. Oporto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. 2015.-

WHAT DO YOU THINK?

To discuss this paper, please submit up to 500 words to the editor at bm.edificacion@upm.es. Your contribution will be forwarded to the author(s) for a reply and, if considered appropriate by the editorial panel, will be published as a discussion in a future issue of the journal.