

# Optimización del modelado CAD para el análisis del patrimonio histórico molinar

Miguel Castro-García<sup>1</sup>, José Ignacio Rojas-Sola<sup>1</sup> y M<sup>a</sup> del Pilar Carranza-Cañadas<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Ingeniería Gráfica, Diseño y Proyectos de la Universidad de Jaén. España

<sup>2</sup> Departamento de Ingeniería Gráfica y Geomática de la Universidad de Córdoba. España

## Resumen

*El empleo de las técnicas CAD (Computer-Aided Design) es una práctica normal y de carácter obligatorio si se considera la tarea de recuperación gráfica que conlleva cualquier estudio de arqueología industrial. Por tanto, se deduce la importancia que un correcto modelado CAD tiene en los diferentes estudios y análisis, como por ejemplo, los de simulación de un proceso físico mediante el método de elementos finitos. En este sentido, la comunicación pretende analizar aspectos críticos en las superficies y mallado del modelo 3D que se presenta en la tarea investigadora de la recuperación gráfica de cualquier ejemplo de patrimonio industrial, como por ejemplo, los molinos de viento de la Comunidad de Andalucía (España).*

**Palabras Clave:** CAD, MODELADO 3D, MALLA POLIGONAL, MALLA NURBS.

## Abstract

*The use of CAD techniques (Computer-Aided Design) is a normal practice and is considered a mandatory task in the graphical recovery that involves any study of industrial archaeology. Therefore, it suggests the importance of a successful modelling CAD has in the different studies and analysis, for example, simulation of a physical process by Finite Element Method (FEM). In this sense, the communication is intended to analyze critical issues and meshing surfaces of the 3D model presented in the research work of graphic recovery of any example of heritage industrial, for example, the windmills of the Community of Andalusia (Spain).*

**Key words:** CAD, MODELLING 3D, POLYGON MESH, NURBS MESH.

## 1. INTRODUCCIÓN

La arqueología industrial requiere de las herramientas CAD (Computer-Aided Design), para representar la realidad de los restos en estudio, soliendo ser empleadas para la descripción gráfica tanto del estado actual de conservación como de su estado durante la época funcional del bien patrimonial, e incluso para mostrar la evolución que ha tenido durante su fase de construcción o de degradación.

De esta forma, se obtiene un modelo 3D virtual, en base a estudios de diferente índole, cuya fiel reconstrucción resulta clave en la calidad de los resultados obtenidos amén de los análisis a realizar. Así se obtienen, entornos de realidad virtual inforrealistas, que presentan tanto la representación gráfica de los procesos de deterioro y puesta en valor, tanto físico como químico, como de análisis propios de la ingeniería industrial.

Esta comunicación pretende analizar aspectos de diseño de la fase de modelado mediante técnicas CAD para generar un modelo 3D de un ejemplo de patrimonio histórico industrial con características óptimas para su posterior utilización en dos tipos de análisis: simulación dinámica y método de elementos finitos.

Para dicho trabajo, se tomará como base el modelo 3D de un molino de viento harinero que ha sido objeto de estudio en el

marco del Proyecto de Investigación de Excelencia de la Consejería de Innovación, Ciencia y Empresa de la Junta de An-

dalucía titulado: ***El patrimonio histórico molinar eólico de Andalucía***, concedido en la convocatoria de 2007 a la Universidad de Jaén, siendo su investigador principal el Dr. Rojas Sola.

Por un lado se realiza una simulación dinámica, y por otro, mediante la aplicación del método por elementos finitos (Finite Element Method, FEM) a ciertos elementos de su maquinaria, se podrán determinar los aspectos más influyentes de la fase de modelado de acuerdo con los resultados obtenidos.

## 2. TÉCNICAS CAD EN ARQUEOLOGÍA INDUSTRIAL

### 2.1 Antecedentes

La utilización de la expresión gráfica para el archivo y estudio de los restos arqueológicos de cualquier índole, ha sido de gran ayuda a lo largo de la historia. En concreto, en la arqueología

industrial, los resultados gráficos en forma de croquis o planos generados por parte de los arquitectos e ingenieros en el pasado, se emplean en la actualidad como documentación de referencia para dar sentido a los restos de actividad industrial, como pueden ser las explotaciones mineras extinguidas e inaccesibles.

Gracias al desarrollo informático, la utilización de la expresión gráfica se incrementó al adquirir una potencialidad que hubiera sido difícil de prever. Dicho incremento en su empleo se debe en un principio al desarrollo del diseño asistido por ordenador en dos dimensiones de carácter vectorial.

Esta fase permitía describir gráficamente los elementos arqueológicos de una forma exacta, con almacenamiento simple y duradero de los datos originales y reproducibles en cualquier equipo informático. El siguiente paso era evidente: las representaciones pasaron de 2D a 3D. De esta forma, se conseguían modelos más completos y se presentaban como base para ser empleados en otras tareas investigadoras, como el análisis funcional y la obtención de propiedades físicas.

No obstante, éste no fue el último paso ya que se evoluciona para que las técnicas CAD puedan recoger cada vez más todas las variables que conforman la realidad a generar, y obtener de esta manera, resultados más completos. Por ello, el hecho de que se considere la dimensión del tiempo en CAD, tan importante en la arqueología, supone la posibilidad del estudio de los elementos gráficos a través de un tiempo determinado. Esta cuarta dimensión se asocia con los conceptos de simulación y animación, como puede ser una visita virtual 3D a un yacimiento desde cualquier punto del planeta o la simulación de la morfología y propiedades físicas, químicas y otras tantas para su estudio en función del tiempo, con objeto del análisis cuantitativo en diferentes disciplinas como cualitativo a lo largo de su evolución histórica.

## 2.2 Tipología de modelado

Para la optimización del modelado CAD a emplear en el análisis de arqueología industrial, en el ámbito de la molinería de viento, es necesario considerar que dicho modelo elemental de trabajo se puede construir principalmente desde tres técnicas de modelado: modelado sólido, modelado por superficie y modelado generativo.

En el modelado sólido se consiguen modelos 3D mediante las técnicas de geometría constructiva de sólidos (GCS) de forma implícita o mediante sólidos de transformación, que pueden responder a características físicas y químicas inherentes a su material constituyente.

El modelado generativo son un conjunto de técnicas que se basan en directrices procedentes de la naturaleza cuyo ajuste a determinados sólidos es el más apropiado. Estas técnicas se clasifican a grandes rasgos en L-System (también conocidos como Lindenmayer), partículas y fractales.

No obstante, esta comunicación se centrará en el modelado de superficie por polígonos por su importancia como técnica empleada en numerosos programas de simulación y animación, siendo su distribución de malla ampliamente empleada para estudiar algunos aspectos de análisis mediante el Método de Elementos Finitos.

Además, esta técnica se emplea tanto en el modelado 3D exacto de un ente patrimonial como en el modelado orgánico donde se sacrifica la precisión en pro de la creatividad del diseñador a la

hora de la representación gráfica de la realidad estudiada en función de los datos de trabajo.

Una malla consiste en la descripción de una superficie mediante una serie de puntos situados en el espacio que, estando conectados entre sí, conforman la estructura de alambres.

Esta estructura presenta distintas configuraciones en función de los modelos geométricos seleccionados como son curvas, modelos poligonales de Bezier, B-spline, T-spline o NURBS (Non-Uniform Rational B-Splines) (QUIROZ LARREA, 1994). De todos ellos, se van a analizar aquellos en los que la superficie la describe una malla poligonal frente a la descrita por NURBS.

## 2.3 Anatomía del modelado por polígonos

El modelo geométrico poligonal se basa en una malla que tiene como base un sistema tridimensional de puntos, los denominados vértices. A partir de ellos, se construye la estructura de alambres por medio de las uniones entre los mismos, formando triángulos u otro tipo de polígonos. En la Figura 1 se observa el modelo de alambres basado en un modelo geométrico poligonal perteneciente al sistema de linterna, palahierro y barril que conforma parte de la maquinaria de un molino de viento mediterráneo de eje horizontal.

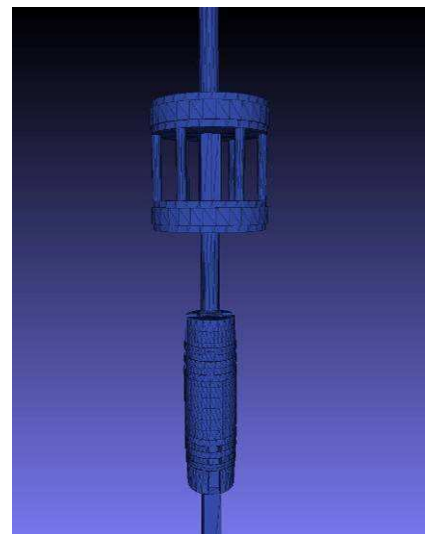


Figura 1. Modelo de alambres poligonal.

Este tipo de modelo geométrico es el más frecuente dentro del software dedicado al modelado vectorial y paramétrico, puesto que se trata de un modelo que presenta una gran exactitud a la hora de su modelado y se ajusta perfectamente a las formas primitivas de su diseño inicial.

## 2.4 Anatomía del modelado NURBS

Se puede definir una superficie NURBS como el producto tensorial de dos líneas, cuyos parámetros descriptivos son una serie de puntos de control que tienen asociados un determinado grado en el espacio en que se represente.

De esta forma, se genera una superficie cuya geometría puede describir desde modelos simples a modelos complejos, como

son las formas orgánicas (MATEUS SANTIAGO, 2007). No obstante, la fase de modelado puede resultar más compleja cuando se pretende obtener un diseño con formas simples y detalles finos, como es el diseño de la maquinaria de un molino de viento. En la Figura 2 se puede observar un cilindro y los puntos de control de su superficie, que se empleará para su estudio en un proceso de simulación de deformación en el siguiente punto.

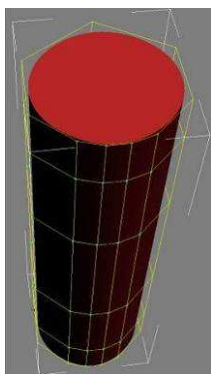


Figura 2. Geometría cilíndrica mediante modelado NURBS donde se aprecia los puntos de control.

### 3. SIMULACIÓN

En esta comunicación, como se ha comentado anteriormente, se pretende analizar dos escenarios de modelado, poligonal y NURBS, para detectar los problemas al emplear uno u otro en una simulación dinámica y en un análisis FEM.

Como punto de partida, se experimentarán con los cilindros (Figura 3) de la linterna (Figura 1), cuya misión dentro de la maquinaria del ingenio eólico es la de engranar con los dientes de la rueda catalina (conocida también como rueda de puntería), que se encuentra unida solidariamente al eje del molino de viento. Estos dos modelos están elaborados mediante técnicas de modelado de geometría poligonal (cilindro izquierdo) y de geometría NURBS (cilindro derecho).

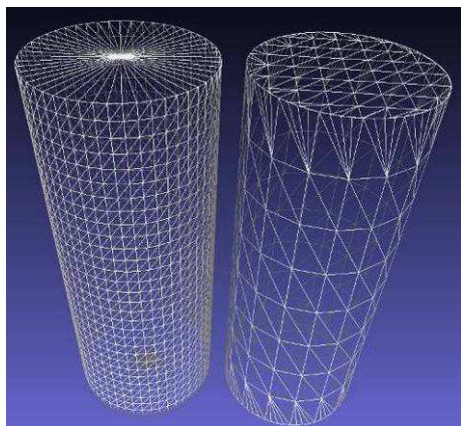


Figura 3. Cilindros. El izquierdo modelado según una geometría poligonal y el de la derecha según una geometría NURBS.

Este apartado tiene el objetivo de simular una deformación de sus partes superiores según un modificador de malla denominado deformación de forma libre (FFD, Free Form Deformation). Una vez establecidas las coordenadas finales de la deformación resulta una simulación como la que se muestra en la Figura 4.

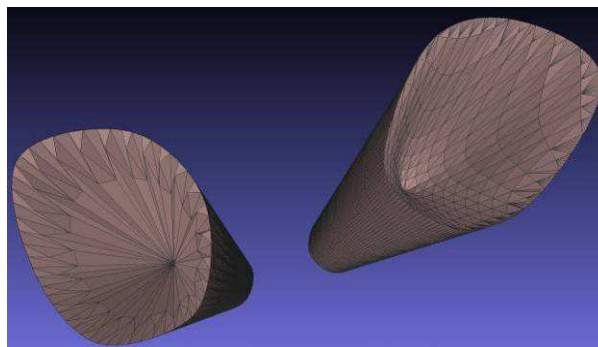


Figura 4. Cilindros bajo la deformación FFD.

A partir del estudio de la modificación de la malla de la figura anterior se puede comprobar cómo se adapta mejor a la deformación FFD el cilindro modelado bajo la geometría NURBS respecto a la poligonal mediante un análisis de curvatura (PEREZ ARRIBAS, 2007). En consecuencia, el modelo de geometría poligonal presenta una serie de estructuras que restan suavidad a la nueva superficie generada, al mismo tiempo que muestran ciertas discontinuidades cerca de los bordes superiores.

### 4. MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

De la misma forma que a la hora de modelar es preciso tener en cuenta el resultado esperado en la simulación para escoger la mejor geometría de malla de trabajo, al aplicar el método de elementos finitos se debe de tener en cuenta la descripción geométrica del modelo 3D. De esta forma, es posible evitar errores y optimizar el tiempo de trabajo.

La cuestión que se analiza es el mallado para la realización del análisis por elementos finitos de una geometría compleja que se presenta en trabajos de arqueología industrial, como puede ser el análisis por elementos finitos en todo el desarrollo de la llanta de freno de la rueda catalina de un molino de viento harinero.

Este tipo de situación puede implicar un método de mallado en el que sea preciso su refinamiento manual o mediante el empleo de parches en la distribución espacial de la malla para obtener un mejor resultado en el análisis (AURICCHIO, 2010). No obstante, existen códigos procedentes de la investigación académica que afronta este problema de una forma satisfactoria, aunque el software profesional actual se rige por códigos propietarios y este problema no lo aborda eficazmente, generando errores en su resultados (DÖRFEL, 2010). Esta es una de las razones por la cual muchos de los profesionales prefieren el refinamiento manual al propuesto por este tipo de software.

En concreto, uno de los problemas de mallado a considerar son las conexiones entre los diferentes parches para el ajuste de la geometría de trabajo. Para ejemplificar el supuesto de una forma

sencilla, se conectan dos mallas bidimensionales, como se observa en la Figura 5, que ejemplifican la unión entre los diferentes parches empleados en la llanta de la rueda catalina del molino de viento.

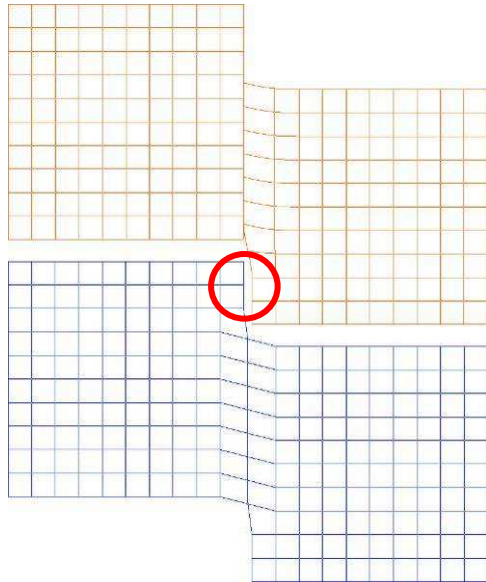


Figura 5. Mallas bidimensionales conectadas. La superior es una malla de geometría NURBS y la inferior es de geometría poligonal.

Si se trabaja con geometrías NURBS pueden aparecer problemas en la conexión debido a incoherencias en la malla al unir los puntos de control de ambas geometrías (SEDERBERG, 2004; ECHTER, 2010). Este hecho se aprecia limitado por una forma de color rojo tanto en la Figura 5 como en la Figura 6.

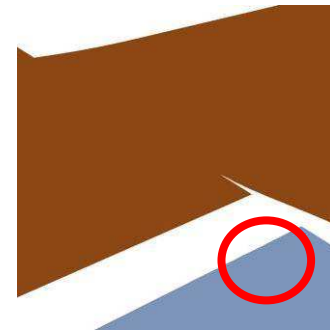


Figura 6. Detalle del error que se produce al conectar dos mallas bidimensionales.

## 5. CONCLUSIONES

En esta comunicación se pone de manifiesto la importancia de decidir qué tipo de superficie, en concreto poligonal o NURBS, debe adoptarse en función del estudio y análisis que se necesite llevar a cabo desde el punto de vista de la arqueología industrial.

En cuanto a los análisis de simulación o de FEM, la estructura de malla poligonal ofrece un menor esfuerzo para la creación de superficies de trabajo precisas, aunque en FEM su ajuste puede crear tensiones no deseadas en la malla. Sin embargo, las superficies NURBS poseen una gran potencialidad a la hora de crear una solución de malla para FEM, aunque poseen ciertos problemas como la necesidad de un refinamiento en la conexión entre elementos de parche en los modelos 3D complejos.

En el proceso de simulación en el que interacciona la geometría 3D, existe una mejor adaptación al proceso de deformación o degradación del mismo de las superficies NURBS que las poligonales.

## FINANCIACIÓN

Esta investigación ha sido financiada por la Junta de Andalucía (Consejería de Innovación, Ciencia y Empresa) en la convocatoria de Proyectos de Investigación de Excelencia en su convocatoria del año 2007, en el marco del Proyecto titulado “*El patrimonio histórico molinar eólico de Andalucía*”.

## BIBLIOGRAFÍA

- AURICCHIO, F. (2010): “The importance of the exact satisfaction of the incompressibility constraint in nonlinear elasticity: mixed FEMs versus NURBS-based approximations”, en *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, nº 199, pp. 314- 323.
- DÖRFEL, M. R. et al. (2010): “Adaptative isogeometric analysis by local h-refinement with T-Splines”, en *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, nº 199, pp. 264-275.
- ECHTER, R. et al. (2010): “Numerical efficiency, locking and unlocking of NURBS finite elements”, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, nº 199, pp. 374-382.
- QUIROZ LARREA, L et al. (1994): “Conexión no conforme de mallas de elementos finitos mediante una formulación híbrida”, en *Mecánica Computacional*, vol. 14, pp. 520-528.
- MATEUS SANTIAGO, S. (2007): “Ajuste con NURBS a una Malla Cuadrilateral Regularizada”, en *Avances en Sistemas e Informática*, nº 3, pp. 109-115.
- PEREZ ARRIVAS, F. (2007): “Modelado Geométrico del Casco de un Buque”, en *Comunicación al Congreso Internacional de Ingeniería Gráfica, INGEGRAF 2007*.
- SEDERBERG, T. W. et al (2004): “T-spline Simplification and Local Refinement”, en *ACM transactions on graphics*, nº 3, pp. 276-283.