



# Utilización del software ArcoTSAM para el aprendizaje del comportamiento de las estructuras de fábrica.

## Using ArcoTSAM software as a learning tool in behavior of masonry structures.

<sup>1</sup>Fernando Magdalena Layos, <sup>2</sup>Joaquín Antuña Bernardo, <sup>2</sup>Antonio Aznar López, <sup>2</sup>José Ignacio Hernando García

<sup>1</sup> Construcciones Arquitectónicas y su Control. Escuela Técnica Superior de Edificación. Universidad Politécnica de Madrid. Avenida Juan de Herrera, 6 (28040 – Madrid). España

<sup>2</sup> Estructuras y Física de Edificación. Escuela Técnica Superior de Arquitectura. Universidad Politécnica de Madrid. Avenida Juan de Herrera, 4 (28040 – Madrid). España

\* Corresponding author email: fernando.magdalena@upm.es

Recibido: 14/03/2017 | Aceptado: 01/05/2017 | Fecha de publicación: 31/08/2017  
DOI:10.20868/abe.2017.2.3558

### TITULARES

- Software ArcoTSAM
- Herramienta de aprendizaje estructural

### HIGHLIGHTS

- ArcoTSAM software
- Structural learning tool

## RESUMEN

---

El aprendizaje del comportamiento mecánico de las estructuras de fábrica presenta ciertas dificultades. El conocimiento que subyace al estudio de las estructuras está condicionado por el uso casi exclusivo en su construcción en los últimos cien años de hormigón armado y acero. Los modelos habitualmente utilizados para analizar estas tipologías de estructuras no son aplicables a las construcciones de fábrica. Por ello, al comenzar a estudiar las fábricas hay una dificultad inicial que consiste en reconocer que se trata de una tipología de estructura diferente, y que para su comprensión hay que valerse de herramientas distintas a las que se utilizan habitualmente en la práctica profesional contemporánea. El programa ArcoTSAM que se presenta en este trabajo ha sido realizado por profesores del actual departamento de Estructuras y Física de Edificación (DEFE), de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid (ETSAM) y es una herramienta que permite el análisis de estructuras de fábrica consideradas como agregados de bloques rígidos. Se trata de varios conjuntos de bibliotecas escritas en el lenguaje de programación de Maple. En este trabajo se muestra cómo la herramienta ArcoTSAM puede utilizarse para facilitar el aprendizaje del comportamiento de las estructuras de fábrica en cursos de grado o de máster, además de servir como herramienta de investigación.

**Palabras clave:** *Comportamiento estructural, software, practice, estructuras de fábrica, programación lineal.*

---

## ABSTRACT

---

The Learning of the behavior of masonry structures have some difficulties. The tools usually applied are based in the knowledge acquired in last hundred years in the use of reinforced concrete and steel in structures. This way of proceeding cannot be used in the study of masonry structures. For this reason, when the study of masonry structures begins, students use to have an initial difficulty that consist in recognizing that masonry is a different kind of structure with a different behavior and other tools are needed in order to understand them. ArcoTSAM software is presented in this work. It has been developed by teachers form the department of Structures and Physics (DEFE) of the Technical School of Architecture (ETSAM). The software tool ArcoTSAM is able to analyze masonry structures, considering the structure as an assembly of several rigid blocks, and it depends on a set of libraries that have been defined in Maple language. This work shows how this software tool can be powerfully useful to enhance the learning of masonry structures both in degree courses and post-degree master, and also can be applied as a research tool.

**Key words:** *Structural performance, software, práctica, structures of perforated, linea programation.*

---

## 1. INTRODUCCIÓN

La enseñanza del comportamiento estructural presenta dificultades para cuya superación se han propuesto muy diferentes métodos desde las primeras obras de Salvadori [1]. En algunos casos mediante la utilización de modelos físicos [2] o utilizando herramientas multimedia [3], pero en todos los casos reclamando un aprendizaje activo por parte de los alumnos [4]. Una revisión de algunos de estos enfoques junto a la propuesta de actividades manuales para la enseñanza pueden encontrarse en Khodadadi [5].

El aprendizaje del comportamiento mecánico de las estructuras de fábrica presenta ciertas dificultades específicas. El conocimiento que subyace al estudio de las estructuras está condicionado por el uso casi exclusivo en su construcción durante los últimos cien años de hormigón armado y acero. Los modelos

habitualmente utilizados para analizar estas tipologías de estructuras no son aplicables a las construcciones de fábrica. Por ello, al comenzar a estudiar las fábricas hay una dificultad inicial que consiste en reconocer que se trata de una tipología de estructura diferente, y que para su comprensión hay que valerse de herramientas distintas a las que se utilizan habitualmente en la práctica profesional contemporánea [6].

El programa ArcoTSAM [7], realizado por profesores del actual departamento de Estructuras y Física de Edificación (DEFE), de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid (ETSAM) es una herramienta que permite el análisis de estructuras de fábrica consideradas como agregados de bloques rígidos. Se trata de varios conjuntos de bibliotecas escritas en el lenguaje de programación de Maple (figura 1).

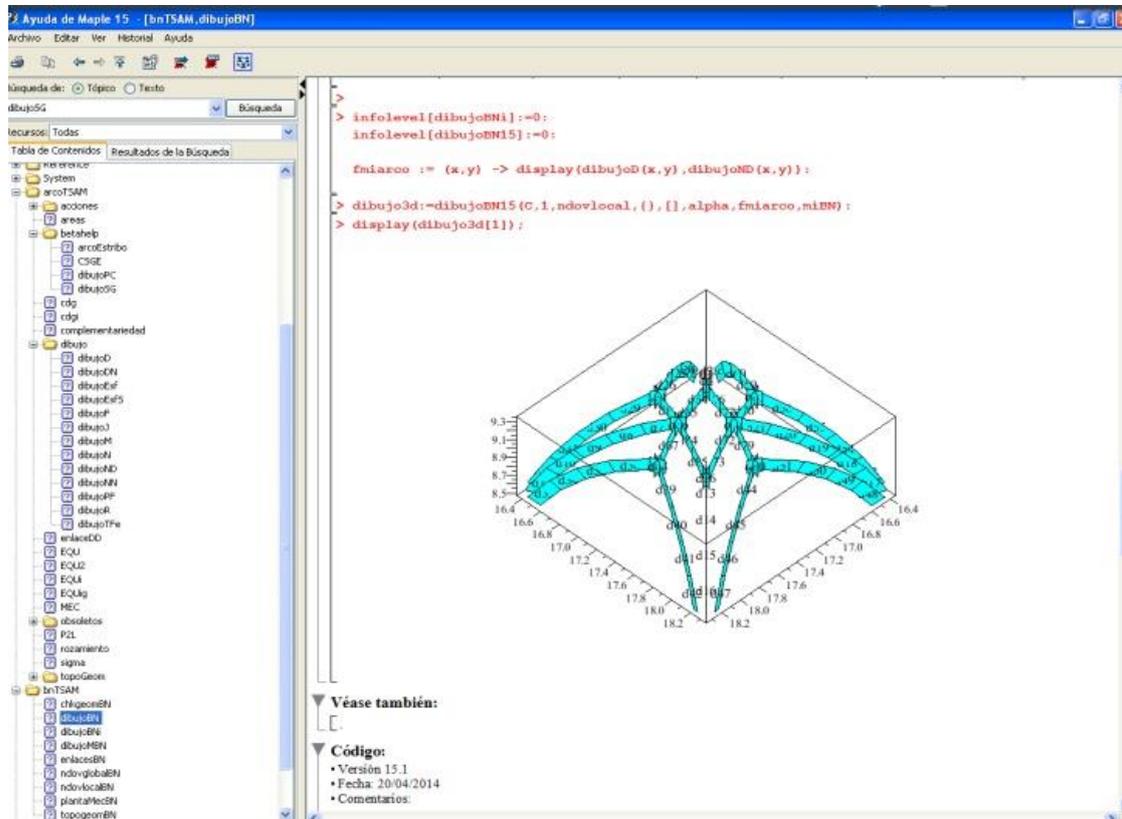


Fig. 1. Hoja de trabajo con las bibliotecas ArcoTSAM.

En este texto se muestra cómo esta herramienta se puede utilizar para facilitar el aprendizaje del comportamiento de las estructuras de fábrica en cursos de grado o de máster, además de servir como herramienta de investigación.

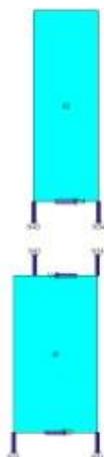
## 2. UTILIZACIÓN DEL PROGRAMA

El programa permite describir el comportamiento de construcciones de fábrica consideradas como conjuntos de bloques

rígidos y obtener la carga última utilizando las condiciones del análisis límite [8]. Está organizado de manera que se pueden establecer las limitaciones al movimiento necesarias para ajustar el modelo a la realidad que se quiere analizar (figura 2). De ese modo, se pueden estudiar diferentes hipótesis para la misma construcción. Se puede obtener la carga máxima que provoca la rotura situada en diferentes posiciones, así como las configuraciones de colapso correspondientes a cada caso.

### Maple: Esfuerzos

- axiles  
N12, N21, N34, N43
- cortante  
V12, V34
- `unitarios([topo, geom], 1);`  
`unitarios([topo, geom], 2);`



### Maple: Cálculo de G y Q

- `G := wp(miarco, rho, e);`
- `Q := [Fy(10,miarco,4)];`

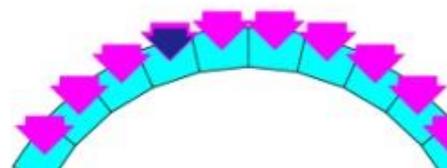


Fig. 2. Representación de las fuerzas en juego para plantear el equilibrio ( $D_rch_a$ ) y distribución de acciones en un arco, peso propio (cian) y carga puntual (azul).

La entrada de datos se puede hacer manualmente, escribiendo las coordenadas de los vértices de los bloques y especificando las caras en contacto. Este procedimiento, viable en el caso de pocos elementos, se hace inabordable en modelos complejos. Por ello, existe una función que permite leer dibujos en formato dxf y generar el modelo adecuado para el análisis. Para que el dibujo en dxf sea útil, es preciso realizarlo siguiendo un orden riguroso en la definición de los vértices y caras de los bloques, así como en la asignación de los nombres de cada grupo de líneas. De este

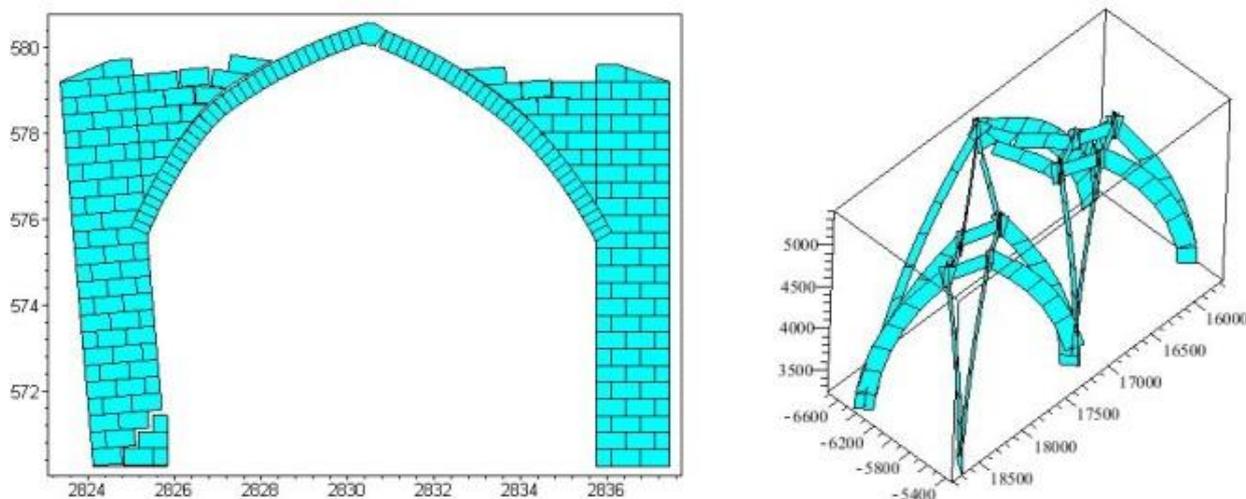
modo se pueden definir modelos de gran complejidad geométrica de manera sencilla, así como modificarlos en función de los resultados obtenidos para conseguir una mejor aproximación al comportamiento de la construcción. Con una buena organización de los nombres de las capas de los diferentes bloques, se pueden estudiar situaciones intermedias que simulen el proceso constructivo, la adición de nuevos elementos o la eliminación de partes de la construcción existente.

El programa tiene además 91 ficheros de ayuda que explican la utilización de otras tantas funciones. En cada uno se incluye el código de la función que describe y varios ejemplos de uso. Así, la ayuda sirve a la vez como manual de instrucciones para el uso del programa y como material para el aprendizaje del comportamiento estructural. Las ayudas están organizadas de manera que pueden imprimirse, y como se han concebido de forma auto-contenida, se pueden utilizar como textos de apoyo a la docencia.

Con el fin de explorar las posibilidades del uso docente del programa se obtuvo financiación de la Universidad Politécnica de Madrid para realizar el proyecto de innovación educativa en la convocatoria 2014-2015 "Creación de

herramientas interactivas para la enseñanza de estructuras de edificación: Modelos virtuales de bóvedas nervadas" [9]. El proyecto permitió la participación de dos estudiantes que, además de trabajar en la mejora y ampliación de las bibliotecas, las utilizaron para su proyecto fin de grado.

El proyecto permitió adaptar las 83 funciones de la biblioteca ArcoTSAM y las 9 de la biblioteca bnTSAM a la versión 15 de Maple (figura 3). Además, se han actualizado las ayudas de cada una de esas funciones. En todas las funciones de la nueva biblioteca bnTSAM se han desarrollado hojas de ayuda en las que se incluyen ejemplos detallados de análisis límite de estructuras de bloques (figura 4).



**Fig. 3.** Modelos de la iglesia de Santiago de Sigüenza (Izqda.) y de la bóveda de la puerta de Los Leones de la catedral de Toledo (Drcha.) obtenidos a partir de dibujos realizados con un programa de CAD que permite la exportación como dxf.

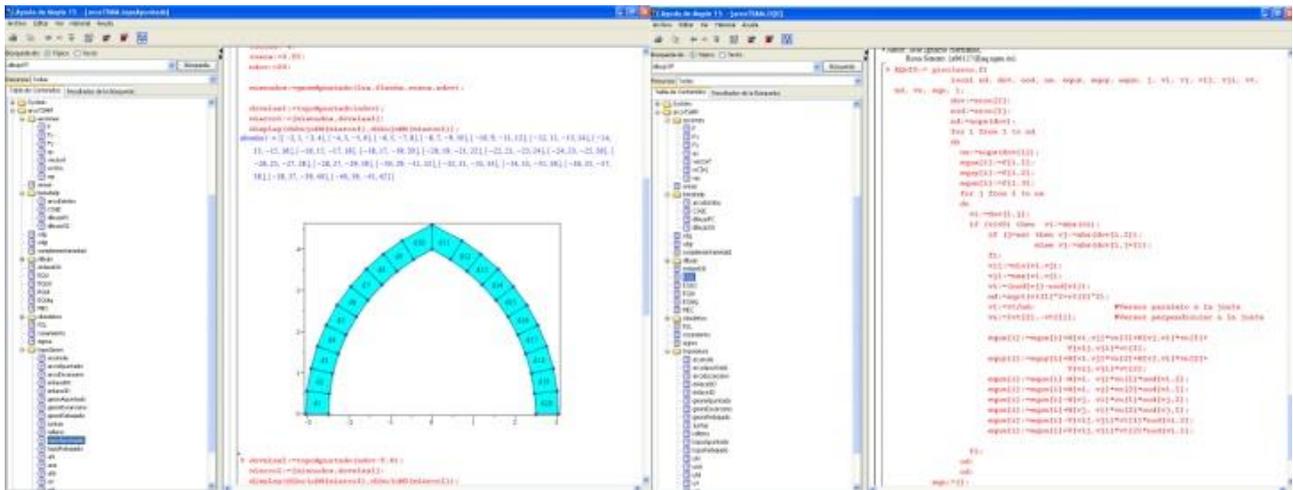


Fig. 4. Hoja de trabajo con las bibliotecas y aspecto de la ayuda de una función.

La aplicación, que se desarrolló originalmente para resolver problemas planos, se ha extendido para poder analizar problemas en

tres dimensiones, como se muestra en la figura 5.

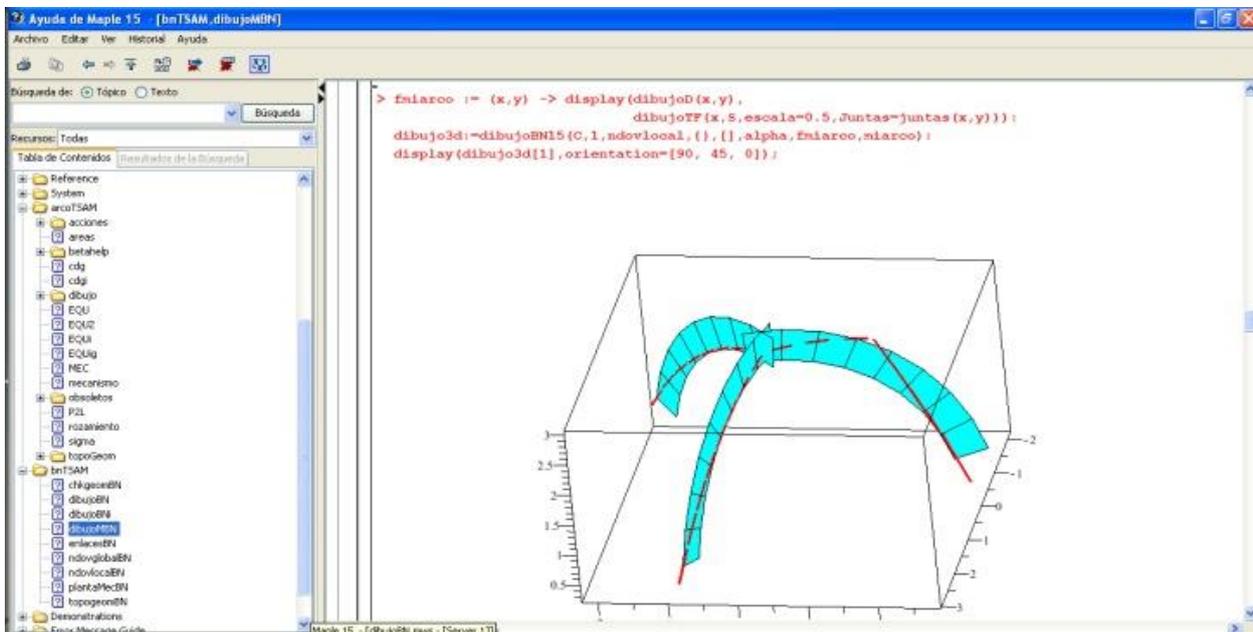


Fig. 5. Modelo de una cúpula nervada utilizando arcos planos.

El programa es una herramienta de aprendizaje de gran potencia. Como se ha indicado, cada función tiene un archivo de ayuda. En este archivo está el código de la función, las instrucciones de su utilización y ejemplos de los resultados que se pueden obtener con ella. Esta organización es tremendamente versátil ya que permite el aprendizaje de diferentes aspectos de la disciplina.

La aplicación inmediata de las ayudas es conocer el uso de la función para utilizarla correctamente. Por otra parte, si se estudian los ejemplos incluidos, se puede comprender mejor su empleo y además, comprender y familiarizarse con los resultados y su significado mecánico.

Por otra parte, como se puede consultar el código de la función, es posible estudiar cómo escribir código en Maple, de manera que se pueda llegar a construir uno mismo sus propias funciones si fuese necesario para un caso particular.

Sin embargo, la principal utilidad como herramienta didáctica en el inicio del estudio de las estructuras de fábrica está en la rapidez y facilidad con que se pueden obtener resultados de casos diferentes. Una vez que se consigue cierta soltura con el manejo del programa, es muy sencillo obtener resultados imponiendo diferentes condiciones de apoyo y de carga buscando máximos o mínimos. Esta facilidad permite que el estudiante pueda plantear y resolver gran cantidad de casos y llegar a comprender los factores relevantes en cada uno.

Por otra parte, el hecho de tener disponible el código de las diferentes funciones permite utilizar esta herramienta al seguir avanzando en el estudio de las construcciones de fábrica, ya que permite la modificación de las funciones

existentes y la creación de otras nuevas. Por ello, es también una herramienta de gran utilidad en trabajos de investigación.

### **3 USO DIDACTICO DEL PROGRAMA: EXPERIENCIAS REALIZADAS.**

Desde las primeras versiones en 2000 se utilizó en investigación y fue un recurso ampliamente utilizado en una tesis doctoral defendida en 2013 [10]. Además se ha usado para realizar material didáctico y el desarrollo de un gran número de clases de las asignaturas “Estabilidad y Métodos de Análisis I” y “Estabilidad y Métodos de Análisis II” del Máster Universitario en Construcción y Tecnología de los Edificios Históricos (MUCTEH) desde su implantación en 2015 en la Escuela Técnica Superior de Arquitectura. Algunos de los documentos elaborados se pueden encontrar en <http://mucteh.com/mucteh/modulos/>.

El software se ha distribuido entre los alumnos del Máster y ha permitido que, en los dos años que se lleva impartiendo, los alumnos hayan realizado varios trabajos para las asignaturas de los módulos “sistemas constructivos adovelados” y “sistemas constructivos por crucería”.

Una de las actividades del máster MUCTEH es el taller de construcción gótica dirigido por el profesor José Carlos Palacios. El inicio del taller arranca en una asignatura de libre elección del plan de estudios de 1996 de la titulación de Arquitecto. El objetivo del taller es la construcción de un modelo a escala (entre 1:2 y 1:5) de una bóveda de crucería. En general se trata de obras construidas, pero en algunos casos se han reproducido algunas bóvedas de

las que se conserva la definición del proyecto pero que no llegaron a realizarse.

El proyecto comenzó en 2009 y desde el principio se estudió la carga de colapso y su configuración utilizando las bibliotecas de ArcoTSAM. El taller se organiza desde entonces cada semestre y en él se construye el modelo de una bóveda nervada que se ensaya hasta rotura el semestre siguiente. La colaboración con el taller se ha ido ampliando y en los últimos años han participado en él alumnos, tanto de grado como de máster.

### 3.1. TRABAJOS FIN DE GRADO: LA BOVEDA DE JOSEPH RIVES

Durante el primer semestre de 2015 y con las herramientas de la biblioteca ArcoTSAM se realizaron dos trabajos de fin de grado de la ETSAM.

Estos trabajos consistían en analizar una bóveda de crucería de Joseph Rives, que se realizó al tiempo que en otra asignatura, el Taller de Construcción Gótica, se construía un modelo a escala de esa misma bóveda.

Aunque el programa está pensado para solucionar problemas planos, introduciendo las condiciones de equilibrio adecuadas, se puede simular el comportamiento tridimensional de una bóveda de crucería como esta. Así, uno de los resultados que se puede obtener es el valor de la carga de rotura de la bóveda aplicada en un determinado punto y describir el mecanismo de rotura asociado a esa carga. Al tiempo que se construía el modelo [11] se realizó el análisis con arcoTSAM y posteriormente, se realizó en ensayo hasta la rotura del modelo de la bóveda [12]. De este modo, el software permite visualizar el mecanismo de rotura y ayuda a mejorar la comprensión del comportamiento mecánico de la bóveda.

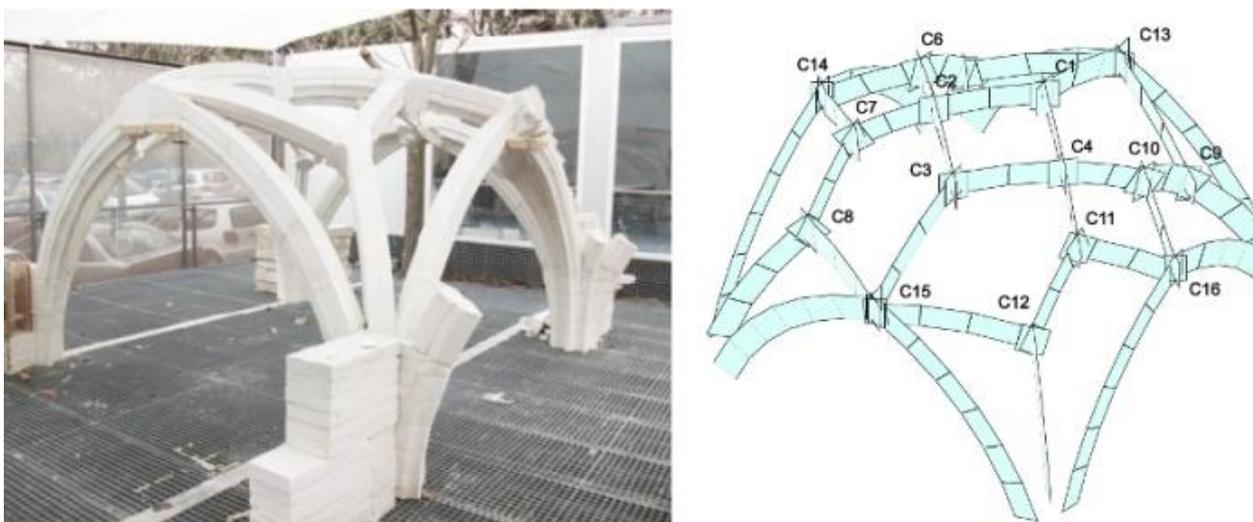


Fig. 6. Bóveda de Joseph Rives, modelo a escala realizado en el taller de construcción gótica (Drcha.) y modelo de análisis estudiado.

Esta colaboración permite al estudiante tener una visión completa del comportamiento estructural de las bóvedas (figura 6), ya que puede participar en todas las fases del proceso, dibujando y analizando la bóveda y siguiendo el ensayo en el que se puede comprobar cómo se van formando los mecanismos que se prevén en el análisis.

### 3.2. PROYECTOS DE LA PRIMERA EDICION DE MUCTEH.

Durante el curso pasado, en el Taller del Máster se construyó un modelo a escala de una bóveda de la nave central de la catedral de Amiens, y los estudiantes realizaron el análisis de la bóveda construida utilizando como material docente arcoTSAM (figura 7). Finalizada la docencia de las asignaturas de análisis, los alumnos realizaron el desarrollo del modelo de cálculo de manera autónoma.



Fig. 7. Modelo a escala de un tramo de la bóveda de la nave central de Amiens durante el descimbrado, y su modelo para la obtención de la carga máxima posible en la clave.

### 3.3. PROYECTOS DE LA SEGUNDA EDICION DE MUCTEH.

En la segunda edición del máster se propusieron varios proyectos para estudiar el comportamiento de fábricas utilizando ArcoTSAM. Igual que en la edición anterior, se analizó la bóveda que se estaba construyendo al mismo tiempo, la bóveda de la Puerta de los Leones de la Catedral de Toledo, que se ensayará a rotura al final de curso.

Además, este curso se ha propuesto el análisis de otras tres obras: la Catedral de Santiago en Sigüenza, la Mezquita de Córdoba y el Cenotafio de Newton, proyecto no construido del arquitecto francés Étienne-Louis Boullée.

Esta variedad de proyectos da idea de la versatilidad y posibilidades que presenta el uso de las bibliotecas ArcoTSAM. En cada uno de los trabajos se han estudiado aspectos distintos, siempre relacionados con la práctica profesional.

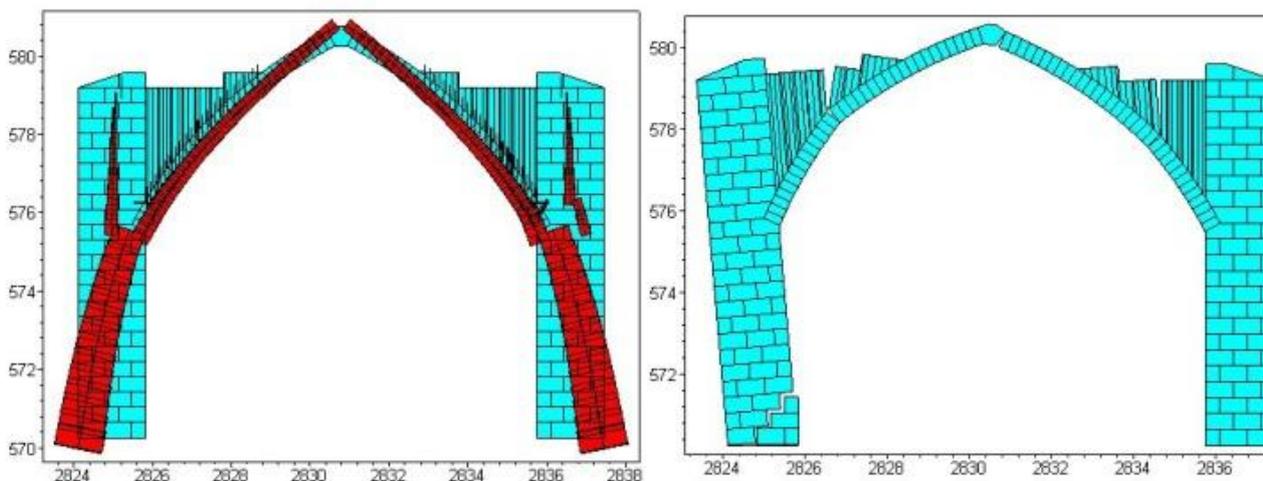
### a) Iglesia de Santiago de Sigüenza.

La iglesia de Santiago ha sido restaurada recientemente. La cubierta se había hundido y parte de los arcos perpiaños también. Las obras de restauración han consistido en rehacer varios arcos perpiaños y completado el existente en la nave para reconstruir la cubierta de la iglesia.

En el trabajo se ha estudiado la estabilidad de un arco perpiaño de la nave comparando diferentes hipótesis [13]. Se ha estudiado el equilibrio del arco con la forma existente antes de la reparación comparándolo con la forma una vez restaurado, que se supone que sería la forma original. Además, se han estudiado dos

posibles maneras de hacer el relleno sobre el arco, una considerando que puede tenerse en cuenta para la estabilidad y otra en la que únicamente se tiene en cuenta su peso, pero no contribuye a la estabilidad del conjunto.

En los diferentes casos se han obtenido las situaciones de empuje mínimo y máximo, con las distribuciones de las líneas de empuje y las configuraciones de colapso (figura 8). La posición de la carga máxima se ha variado hasta encontrar la posición en que con un menor valor se producía el colapso.



**Fig. 8.** Iglesia de Santiago. Líneas de empujes y configuración de rotura para el caso del relleno que no contribuye a la estabilidad.

### b) Mezquita de Córdoba

En la mezquita de Córdoba se ha investigado una hipótesis constructiva, evaluando las condiciones de estabilidad durante el proceso de construcción [14], tal como se puede observar en la figura 9.

El objetivo de la investigación ha sido averiguar si fue necesario utilizar algún tipo de acodamiento o arriostramiento durante la construcción de las arquerías para asegurar la estabilidad antes de que el conjunto, ya terminado, fuese estable. En el modelo se ha supuesto que la construcción comenzó por uno de los extremos y avanzó en el sentido

opuesto. El extremo por el que se empezó a construir tiene un contrafuerte suficiente, lo que se ha modelizado impidiendo su movimiento.

La conclusión obtenida es que era necesario el empleo de algún tipo de acodamiento durante el proceso de construcción para mantener estable el conjunto hasta realizar el arco siguiente.

Obviamente, la cuestión siempre está abierta, ya que pueden imaginarse otros procesos constructivos, por ejemplo, que el arco inferior siguiente no se realice hasta que el pilar superior tenga mayor altura, o cualquier otro.

Utilizando la herramienta ArcoTSAM será relativamente sencillo comprobar esos casos y completar las conclusiones del trabajo realizado.

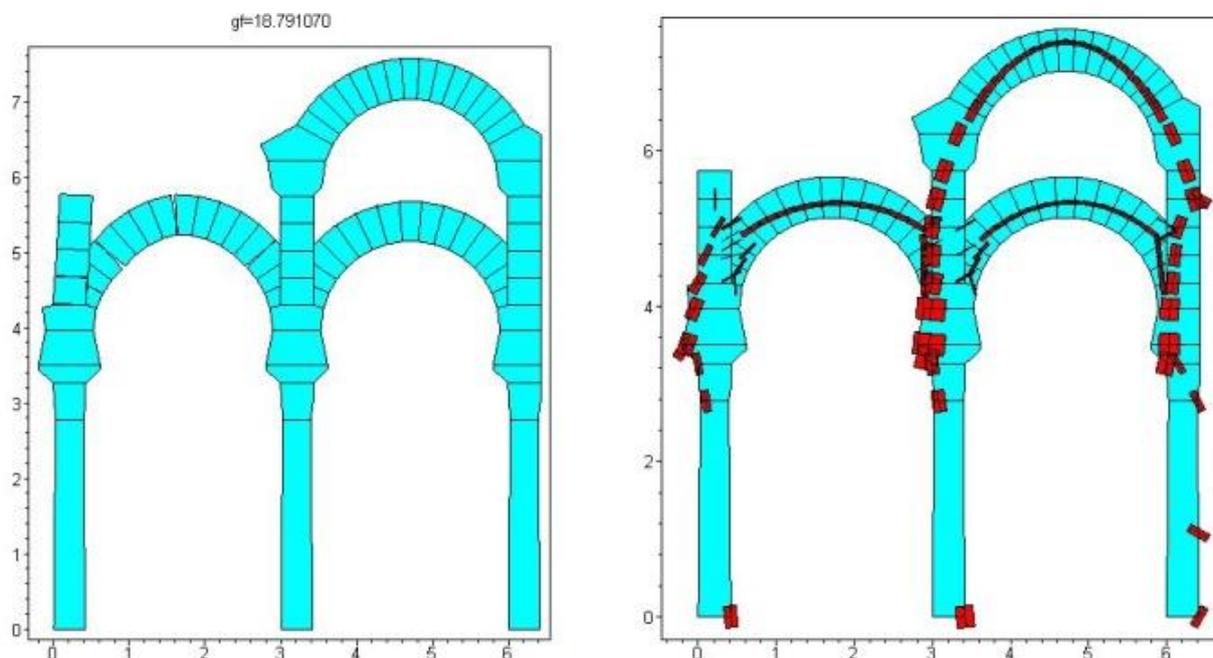


Fig. 9. Arquería de la Mezquita de Córdoba. Configuración de colapso en la fase de construcción (Drcha.) y línea de empuje en ese caso (Izqda.)

### c) El cenotafio de Newton

En el proyecto no construido de Boullée se ha investigado su viabilidad con las dimensiones de los dibujos que se conservan [15].

En el estudio se han analizado dos disposiciones distintas de las dovelas. En una preliminar se ha supuesto que las juntas entre los sucesivos anillos eran radiales, con centro en el de la circunferencia. Finalmente se ha optado por suponer una construcción en la que

las juntas siguen la dirección de las perforaciones previstas en el proyecto para el observatorio. En ese caso, las juntas siguen siendo radiales, pero el centro no se encuentra en el de la esfera, sino en el extremo inferior, que se supone que es la situación del observador.

La conclusión en este caso, es que con las proporciones de los dibujos que se conservan, la construcción puede ser estable (figura 10).

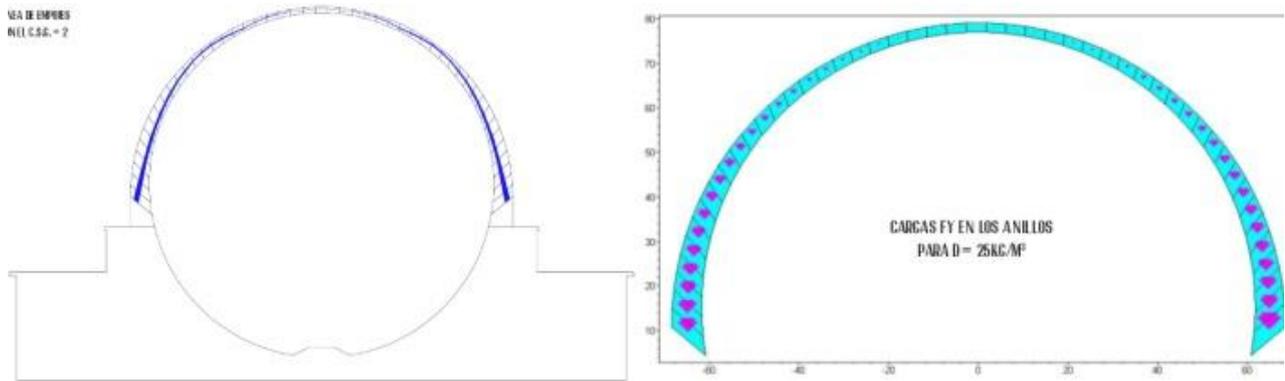


Fig. 10. Cenotafio de Newton, línea de empuje (Drcha.) y distribución de los pesos en cada anillo considerada en el análisis (Izqda.)

d) La bóveda de la puerta de los Leones de la catedral de Toledo.

En el trabajo se estudia la carga máxima que soporta la bóveda de la puerta de los Leones

de la catedral de Toledo [16]. Este es el modelo, representado en la figura 11, que se está construyendo en el taller [17] y que se ensayará a final del curso.

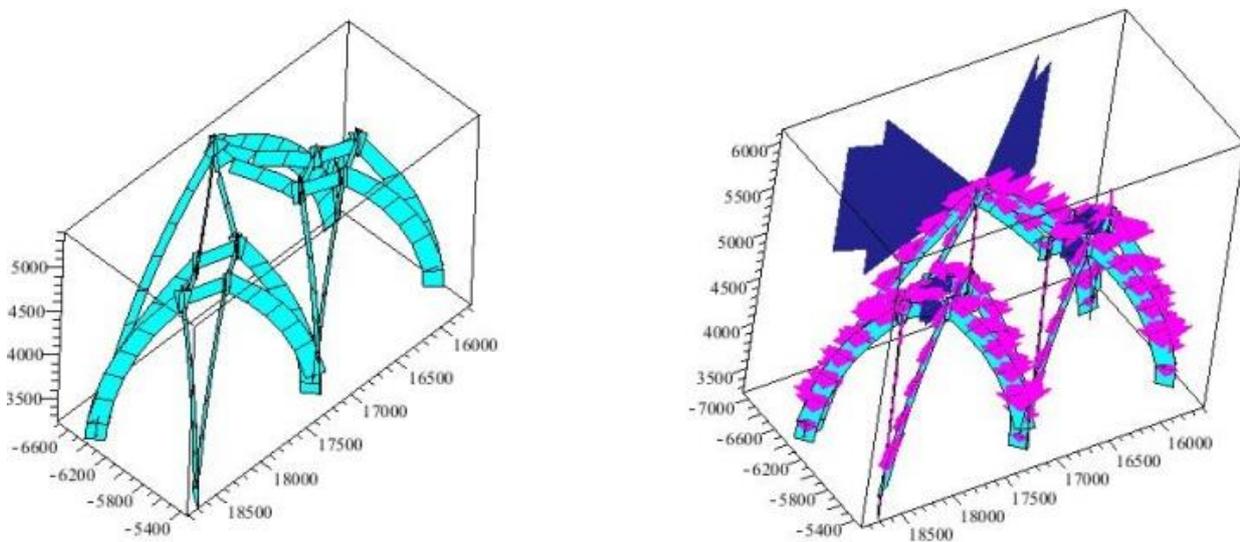


Fig. 11. Modelo de la bóveda de la Puerta de los Leones (Drcha.) y distribución de las cargas y las acciones necesarias para garantizar el equilibrio (Izqda.)

## 4 CONCLUSIONES

Aunque la comprensión del funcionamiento de las estructuras de fábrica presenta dificultades, utilizar herramientas como ArcoTSAM permite realizar gran cantidad de ejemplos en poco tiempo y adquirir rápidamente cierta destreza en predecir cómo se puede conseguir el equilibrio, como se forman los mecanismos de rotura y, en definitiva, "intuir" su comportamiento mecánico. Aún siendo de gran utilidad su uso, la eficacia aumenta cuando se combina con otras actividades, como la construcción de los modelos a escala y su ensayo. Estas operaciones permiten reconocer las dificultades y las limitaciones de los modelos que habitualmente se utilizan en el análisis y, además de desarrollar la capacidad de comprender la mecánica de la construcción, ser consciente de las incertidumbres que siempre existen en los resultados obtenidos. El uso de las bibliotecas hace que el aprendizaje se acelere, sobre todo en las etapas iniciales.

El uso del programa como herramienta educativa, permite que los estudiantes mejoren sus competencias en diferentes áreas.

Utilizando el programa de manera inmediata, se pueden obtener rápidamente soluciones de una gran cantidad de casos. Únicamente con eso ya sería de gran utilidad, pero el hecho de tener acceso al código de las funciones, permite que los estudiantes pueden modificar las existentes y crear otras nuevas que resuelvan nuevos tipos de arcos con formas más o menos complicadas. Con ello, las bibliotecas facilitan el aprendizaje de la programación de Maple.

Por otra parte, el trabajo realizado por los estudiantes se convierte en un documento que se puede utilizar como material docente para la utilización del programa.

## REFERENCIAS

- [1] Salvadori, M. & Heller, R. (1969) Estructuras para arquitectos. Ed. La isla
- [2] Vrontissi, M. (2015) The physical model in structural studies within architecture education: paradigms of an analytic rationale?. IASS.
- [3] Vassigh, S. (2005) A comprehensive approach to teaching structures using multimedia. The American Institute of Architects
- [4] Khodadadi, A. (2015) Active learning approach in teaching structural concepts to architecture students. International Association of Shells and Spatial Structures Annual Symposium (IASS) 2015, At Amsterdam, the Neatherlands.
- [5] Emami, N. von Buelow, P (2016) Teaching structures to architecture students through hands-on activities. Canadian International Conference on Advances in Education, Teaching & Technology
- [6] Heyman, J. (1995). Teoría, historia y restauración de Estructuras de fábrica. Instituto Juan de Herrera.
- [7] Hernando, J.I. (2000-2016). ArcoTSAM.
- [8] Livesley, R. K. (1978). Limit analysis of structures formed from rigid blocks. International Journal for numerical Methods in Engineering. Vol. 12, 1853-1871.
- [9] Antuña, J. (2015). Creación de herramientas interactivas para la enseñanza de estructuras de edificación: Modelos virtuales de bóvedas nervadas. Proyecto de innovación educativa IE1415-03015, financiado por la Universidad Politécnica de Madrid, 2014-2015.

- [10] Magdalena Layos, F. (2013). El problema del rozamiento en el análisis de estructuras de fábrica mediante modelos de sólidos rígidos. PhD Tesis. Dir. Huerta Fernández, Santiago y Hernando García, José Ignacio. Madrid
- [11] Descimbrado de la bóveda de Joseph Rives.(2004).<https://www.youtube.com/watch?v=WfBRtVNs8Dc>
- [12] Rotura de la bóveda de Joseph Rives. (2005).<https://www.youtube.com/watch?v=IhR4Trt8bbY>
- [13] Esteban Ferrer, M., Guerra Martín, M. (2017). Hipótesis estructurales de un arco apuntado con arcoTSAM software. Iglesia de Santiago de Sigüenza (Guadalajara). Trabajo de ESTABILIDAD Y MÉTODOS DE ANÁLISIS I y II. Inédito.
- [14] Escada Marco-Gardoqui, M. (2017). Análisis contrarresto provisional durante el proceso constructivo. Mezquita de Córdoba. Ampliación de la arquería de Almanzor. Trabajo de ESTABILIDAD Y MÉTODOS DE ANÁLISIS I y II. Inédito.
- [15] Barba-Delgado, M., Chaur González, J., Nieto Andrade, J. (2017). Hipótesis de carga en el cenotafio de Newton. Análisis de un proyecto utópico de Étienne-Louis Boullée. Trabajo de ESTABILIDAD Y MÉTODOS DE ANÁLISIS I y II. Inédito.
- [16] López, A., Meléndez, S. y Wang, Y. (2017). Análisis sistemático de estabilidad estructural para una bóveda de crucería y unas solicitudes dadas. 2º congreso internacional de innovación tecnológica en edificación, 2017, Madrid.
- [17] Taller de construcción gótica. <http://mucteh.com/mucteh-modulo-2/taller-modulo-2-taller-de-construccion-gotica/>