LAS BÓVEDAS DE GUASTAVINO: ANÁLISIS ESTRUCTURAL

Beca de investigación en Nueva York
Fundación Arquia / Real Academia de Bellas Artes de San Fernando

1_ INTRODUCCIÓN

La investigación presentada en este proyecto está enmarcada dentro de una de las líneas de investigación llevadas a cabo en el Instituto de Restauración del Patrimonio de la Universidad Politécnica de Valencia, consistente en el análisis estructural de tipologías constructivas históricas.

El estudio formal y constructivo de estos edificios y sus elementos constitutivos está ampliamente extendido, sin embargo son muy pocos los estudios a nivel estructural, que constaten su comportamiento mecánico desde un punto de vista numérico y ninguno que considere cargas sísmicas[1].

El grupo de trabajo de investigación al que pertenezco ha desarrollado una línea consistente en el modelado y análisis de edificios propios del patrimonio arquitectónico de la ciudad. Los estudios realizados han dado como fruto distintas tesis doctorales y numerosos artículos en revistas de prestigio. Entre ellos se encuentran la Catedral, la Iglesia de Santa Catalina, la Iglesia de San Juan del Hospital y la Iglesia de los Santos Juanes, todos ellos en la ciudad de Valencia (España). Se trata de edificios con un mismo sistema estructural, muros y bóvedas construidos con técnicas tradicionales propias del lugar y del momento de construcción.

Sin duda la bóveda tabicada juega un papel importante en la concepción formal, constructiva y estructural en las estructuras tradicionales. Este sistema constructivo es exportado por el arquitecto valenciano, Rafael Guastavino. La construcción de Guastavino ocupa un lugar importante en la historia de la arquitectura norteamericana durante los años 1880 y 1940. Su principal producción se concentra en la ciudad de Nueva York, de hecho los archivos de la *Guastavino Company* son la base de la Colección Guastavino en la Biblioteca Avery de la Universidad de Columbia.

El desarrollo de esta investigación implica la necesidad de una toma exhaustiva de da-

[1] _ Existen bóvedas de Guastavino ubicadas en zonas de elevada actividad sísmica, como por ejemplo el Saint Louis Art Museum en Misuri, por lo que sería interesante analizar su comportamiento frente a sismo.

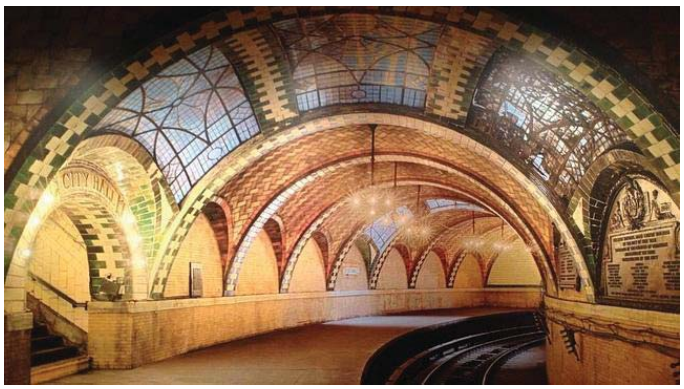


Imagen 1_
Estación de metro de City Hall en Nueva York. Decorada con vidrieras y azulejos policromados.

tos (tanto de medición directa como de recopilación de documentación en archivos) y modelización de las bóvedas más significativas de la ciudad de Nueva York. Se estima en un periodo de 6 meses el desarrollo de este estudio.

A continuación se presenta una memoria del proyecto de investigación a realizar estructurada según las bases descritas en la convocatoria de la Beca de investigación en Nueva York promovida por la Fundación Arquia y la Real Academia de Bellas Artes de San Fernando.

2_ OBJETO Y ÁMBITO DEL ESTUDIO

Rafael Guastavino i Moreno (1842-1908) ha sido calificado por el arquitecto Doménech i Montaner como un arquitecto con dotes excepcionales, autor de una arquitectura revolucionaria y avanzada de un gran movimiento artístico. El arquitecto neoyorkino Peter Bonnet Wight reconocía la gran aportación de este arquitecto valenciano al diseño arquitectónico en Estados Unidos. Pero fue el historiador George Collins quien marcó un hito en nuestro entendimiento de la obra de Guastavino aportando un inventario sistemático de sus edificios en el mundo.

Este arquitecto nació en Valencia en un entorno arquitectónico muy rico. Vivió junto a la catedral y pudo visitar los trabajos de restauración de la Lonja de la Seda y la arciprestal de San Jaime de Vilarreal realizada por su tatarabuelo.
Se formó en la Escuela de Maestros de Obras de Barcelona. De su periodo en Cataluña destacan dos obras: la Fábrica Batlló en Barcelona (1869-1875) y el teatro La Massa en Vilassar de Dalt (1881). En 1881 se trasladó a Nueva York con su hijo Rafael Guastavino Expósito. Allí exportó la bóveda tabicada y extendió su uso a nuevas aplicaciones introduciendo innovaciones en los materiales y la construcción. Tras los incendios de Chicago (1871) y Boston (1872), la sociedad estaba muy sensibilizada; Guastavino presentó sus bóvedas resistentes al fuego, característica que le ayudó a alcanzar un gran éxito con su producto. Creó la Compañía Guastavino, con la que desarrolló 24 patentes y que más tarde continuó su hijo.

Imagen 2_
Durante la construcción de las bóvedas que conforman la Biblioteca de Boston. 1889.



El objeto de esta investigación es el estudio del comportamiento estructural de las bóvedas tabicadas utilizando los métodos de cálculo más avanzados existentes en la actualidad. Estos métodos permiten realizar, entre otros, un análisis dinámico no lineal en el tiempo, siendo éste el tipo de cálculo que mejor reproduce el comportamiento real de la estructura. Las bóvedas de los Guastavino no se han analizado frente a cargas horizontales dinámicas, por lo que esta investigación aportará información inédita en este campo.

Guastavino construyó más de 1000 edificios concentrados en su mayoría en Estados Unidos, aunque también trabajó en otros países como Canadá, India o Cuba. Su obra se extiende por universidades como Harvard, MIT, Berkeley, Yale o Columbia. Intervino en edificios públicos de la importancia del Museo Metropolitano de Nueva York, el Museo Nacional de Washington o la Biblioteca Pública de Boston. Esta investigación se centra en su obra en la ciudad de Nueva York dado que es donde se concentra su mayor producción en edificios públicos de suma importancia.

Se han seleccionado las bóvedas más relevantes de la ciudad de Nueva York como casos de estudio. No sólo se han utilizado criterios estructurales (como la luz de los espacios que cubren) sino que también se han atendido criterios constructivos (como por ejemplo el tipo de aparejo). Los edificios a analizar son los siguientes:

Grand Central Terminal

El Great Hall de Ellis Island

Catedral de St. John the Divine

Carnegie Hall

Museo Americano de Historia Natural

Templo Emanu El

Iglesia de San Bartholomé, en la Quinta Avenida

Estación de City Hall, en Manhattan

El Oyster bar de Grand Central

Imagen 3_
Reproducción por Graefe y Tomlow de la maqueta original realizada por Gaudí para la iglesia de la Colonia Güell.



3_ MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

3.1_ MÉTODOS DE ANÁLISIS

Las estructuras históricas se construían siguiendo reglas empíricas basadas en relaciones geométricas y proporciones. Intentar reproducir el comportamiento mecánico que tienen estas obras por medio de métodos de cálculo modernos es una tarea complicada. La complejidad estriba, por un lado, en que estos edificios patrimoniales son normalmente de fábrica, que es un sistema estructural muy complejo de modelizar. Por otro lado, la manera en la que fueron diseñadas y construidas estas estructuras es totalmente distinta a la que aplicamos actualmente con la obra moderna. En la actualidad, calculamos las estructuras y luego las construimos. Además, en el cálculo, las propiedades mecánicas de los materiales que utilizamos son datos conocidos a diferencia de lo que ocurre con los materiales empleados en el patrimonio histórico.

Existen principalmente dos corrientes a la hora de abordar el análisis de las estructuras de fábrica. Una de ellas, desarrollada principalmente por Jacques Heyman, utiliza el Análisis Límite que consiste en estudiar el equilibrio de la estructura basándose en su geometría. La otra corriente se basa en generar un modelo numérico que reproduzca el comportamiento de la estructura, normalmente a través del Método de Elementos Finitos.

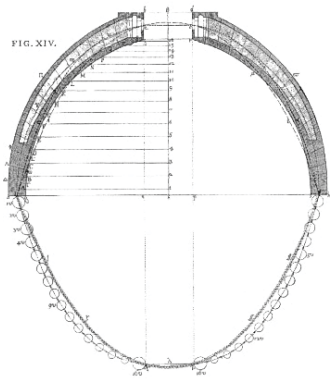
El Análisis Límite tiene la ventaja de no necesitar las características mecánicas del material, resolviendo así uno de los principales problemas que comentábamos anteriormente. Las fábricas tienen una resistencia mucho mayor a compresión que a tracción. Por ello, se diseña condicionando la geometría para que trabaje a compresión. Robert Hooke ya escribió en 1675 en un libro sobre relojes solares lo siguiente:

"Del mismo modo que cuelga el hilo flexible, así, pero invertido, se sostendrá el arco rígido" [2]

Antonio Gaudí se basó en este método para diseñar sus estructuras, con la ayuda de

[2]_ Heyman, 1995, 9.

Imagen 4_
Modelo suspendido de Poleni realizado para comprobar la estabilidad de la cúpula de San Pedro de Roma en 1748.



unos hilos que simulaban las trazas de los elementos constructivos colgaba unos pesos y generaba unas maquetas que al invertirlas 180º reproducían la geometría buscada. Según explica Huerta[3], Gaudí debió basarse en los estudios realizados por Poleni en 1748 sobre las grietas de la cúpula de San Pedro de Roma. En ellos utiliza la catenaria invertida de Hooke, cuya forma sometida a su propio peso trabajando a tracción es la misma que la del arco trabajando a compresión. En su estudio demuestra que la cúpula fisurada es estable ya que la línea de presiones queda dentro de su geometría, aunque no consideró los efectos de la doble curvatura, como indica Alonso en "La compresión de la tracción"[4]. El análisis de fábricas de mampostería a través de Análisis Límite con ayuda de modelos informáticos está siendo desarrollado por O'Dwyer o Pere Roca entre otros.

Otro tipo de análisis es el elástico lineal. Sin embargo este método no reproduce el comportamiento de las estructuras de fábrica, por lo que se recomienda para estructuras de acero y hormigón. Aún así, puede utilizarse como un método complementario que nos daría una primera aproximación en los resultados.

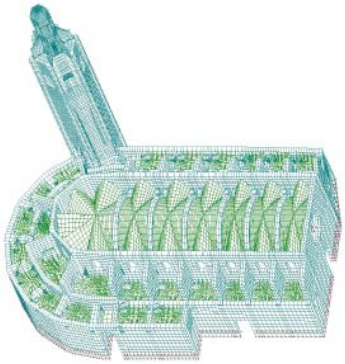
Para abordar el estudio estructural con cierto rigor, siempre que se trate de estructuras formadas por materiales frágiles como la mampostería, es necesario la utilización de un método de análisis no lineal. Uno de los métodos utilizados es el llamado Método de los Elementos Rígidos (MER), desarrollado por Casolo y Peña. Este método tiene en cuenta las propiedades inelásticas del material al discretizar la estructura en elementos rígidos planos unidos entre sí por tres puntos de conexión. Estos puntos representan las características mecánicas del material y se modelizan como dos resortes inelásticos y un tercer punto como unión de cortante, colocado en el centro de la unión. Su aplicación permite el análisis del comportamiento histerético de la fábrica frente a ciclos de carga producidos por sismo. Este método se ha empleado en el estudio realizado por Casolo en 2009 en el Maniace Castle de Siracusa.

El Método de los Elementos Finitos (MEF), es otro método que se basa en dividir la estructura objeto de análisis en un número finito de elementos. Así se limitan las variables

[3]_ Huerta, 2006.
[4]_ Alonso, 2011, 337.

Imagen 5_
Modelo de cálculo por elementos finitos realizado en mi tesis doctoral. 2016.

Nodos_ 94616
Sólidos_ 120448
  Tetraedros_ 87799
  Hexaedros_ 32649
Láminas_ 16069
Nº de ecuaciones_ 323811



y el número de ecuaciones. Puede utilizarse con dos enfoques: la macro-modelización y la micro-modelización.

La micro-modelización consiste en definir cada elemento que forma la fábrica, incluso las interfases mortero-ladrillo se representan como elementos discontínuos. Este método requiere mucho tiempo computacional y se utiliza para el análisis de detalle. La macro-modelización en cambio no requiere tanto conocimiento de la fábrica y reduce considerablemente el coste del cálculo en tiempo. Consiste en considerar el material homogéneo y ortotrópico, se elabora un modelo de cálculo por medio de elementos finitos sin necesidad que estos elementos se correspondan con las dimensiones reales de los elementos que constituyen la fábrica. Los ladrillos, piedra, mortero y la interfase entre ellos se engloban en un mismo elemento obteniendo resultados aceptables.

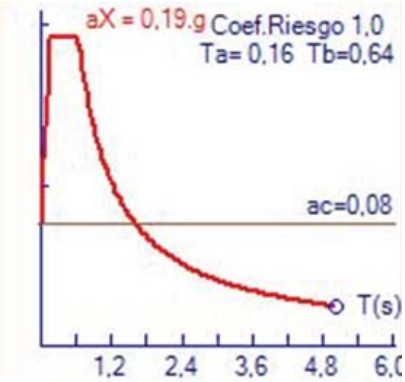
Se han elaborado métodos de homogeneización que ayudan a realizar simplificaciones, como los desarrollados por Lourenço en 1992, Pietruszczak en 1992, Armelle Anthoine en 1995 y otros más modernos como los realizados por Rots en 1998 o el propio Lourenço en 1996[5].

3.2_ MODELO DE DAÑO

Para modelizar el comportamiento no lineal del material puede realizarse por distintos sistemas: el modelo de fisura discreta (que genera una discontinuidad geométrica en el punto donde se alcanza la máxima tensión de tracción), el modelo de fisura distribuida (que supone la modificación de la matriz constitutiva cuando se supera la tensión de tracción límite), el modelo de barras (que sustituye el contínuo por una malla de barras a las que se le asignan propiedades del material) y el modelo de daño. Este último, el modelo de daño, permite definir funciones de daño que considere la diferente respuesta del material a esfuerzos de tracción y de compresión y el efecto de la degradación de la rigidez. Estas variables modifican la influencia de la historia del comportamiento del material en la evolución de las tensiones. La aparición de fisuras y su evolución en el tiempo se pueden describir como las trayectorias de los puntos que han sufrido daño. La fractura se representa como un efecto de daño local, que se puede caracterizar en

5_ Moreno, 2016, 117-119.

Imagen 6_
Espectro elástico de diseño para la ciudad de Valencia con un periodo de retorno de 475 años. Espectro generado para los cálculos realizados en mi tesis doctoral.
La equivalencia de este sismo con la intensidad medida en la escala MSK (Mendelev-Sponheuer-Karnik) es de grado VI.



función de la resistencia a compresión y a tracción del material, de los parámetros conocidos de éste y de las funciones que controlan la evolución de la fisuración según el estado sucesivo de las tensiones en cada uno de los puntos.

El programa de cálculo Angle que ha desarrollado el profesor Alonso incorpora una aplicación del modelo de daño isótropo desarrollado por Oller (1991 y 2001), Oliver (1993), Oñate (1996) y Hanganu (1997). El modelo empleado se basa en el distinto comportamiento a compresión y a tracción de este tipo de materiales, la degradación de su rigidez por el nivel tensional y el efecto en la respuesta en función del tamaño de la malla empleada para modelizar a través de los elementos finitos para obtener un modelo correcto del comportamiento no lineal de este tipo de materiales.

3.3_ ACCIONES SÍSMICAS

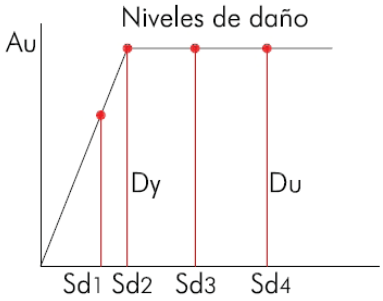
Para definir la acción sísmica a efectos de cálculo se recurre a métodos estadísticos y de probabilidad. La normativa sísmica define la acción del sismo mediante espectros de respuesta de las estructuras frente al movimiento del suelo inducido por el terremoto. El espectro representa la aceleración sobre un punto de la estructura que provoca la acción sísmica en función de la frecuencia o el periodo de vibración de la misma. El espectro elástico de diseño en aceleraciones para la ciudad de Valencia que define la norma NCSE-02 se muestra en la figura 6 y considera una aceleración de cálculo de 0,08g y una aceleración máxima en la meseta para periodos bajos de 0,19g.

Los movimientos sísmicos de cálculo se expresan en términos de un intervalo de recurrencia medio o una probabilidad de excedencia, que es una expresión en años del periodo promedio de tiempo que transcurre entre el suceso de un sismo que produce daños de una severidad igual o superior a una determinada. La probabilidad de excedencia es una representación estadística de la posibilidad de que el efecto de un terremoto exceda una cierta severidad durante un periodo de tiempo determinado expresado en años.

Los periodos de recurrencia o de retorno utilizados en el cálculo son los siguientes:

Sismo de Servicio_ Es aquel que tiene un 50% por ciento de posibilidades de tener lugar

Imagen 7_
Umbrales de los distintos estados de daño.



en un periodo de 50 años. Corresponde con un periodo de retorno de 72 años y puede ser sufrido varias veces en la vida útil de una estructura.

Sismo de diseño_ Es aquel con un 10% de posibilidades de ser superado en 50% años, correspondiendo a un periodo de retorno de 475 años. Puede ocurrir una vez en la vida de una estructura.

Sismo máximo_ Es el de mayor intensidad esperado en la ubicación del edificio. Es aquel con una posibilidad del 5% de ser alcanzado en un periodo de 50 años. Su periodo de retorno es de 975 años.

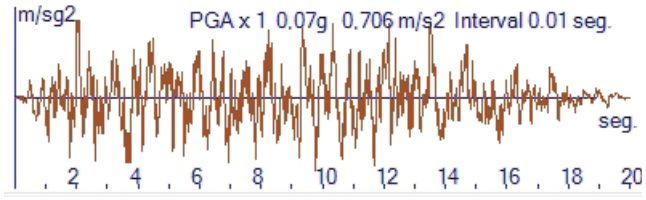
Para realizar el análisis el comportamiento sísmico de la estructura se utilizan dos métodos. Uno es el análisis por empujes incrementales, también conocido como pushover. Y el otro es el análisis no lineal en el dominio del tiempo.

El **análisis pushover** es un cálculo estático no lineal en el que la acción sismica se introduce sometiendo a la estructura a un patrón de cargas laterales Fi que se incrementan de manera monotónica hasta alcanzar la capacidad máxima de la estructura. El patrón de cargas utilizado en esta tesis es el de la distribución modal. Por lo tanto este tipo de cálculo es eficiente para estudiar la capacidad, y la resistencia-deformación de la estructura sometida a la acción de un terremoto. La capacidad de respuesta estructural se representa mediante la curva de capacidad que reacciona el cortante basal Vb y los desplazamientos D en el nivel superior de la estructura.

El espectro de respuesta definido por la norma sísmica para el lugar en el que se encuentra la estructura nos permite cuantificar la demanda sísmica. La intersección de la curva de demanda con la de capacidad en una misma gráfica define el performance point o punto de desempeño, que señala el movimiento que se puede producir en el punto de control definido en la estructua para el sismo de cálculo definido por el espectro.

Para poder comparar ambas curvas de capacidad y demanda es necesario transformarlas en un formato homogéneo denominado ADRS (espectro de respuesta aceleración desplazamiento). La curva de capacidad se simplifica transformándose en una curva

Imagen 8_
Acelerograma artificial en una dirección X para un sismo con un periodo de retorno de 475 años, compatible con el espectro definido por la norma. Generado con SIMQKE_GR.



bilineal que contiene la misma área hasta la capacidad última que la curva real, así ambas representan la misma energía.

La curva simplificada tiene dos puntos característicos: la capacidad de cedencia Dy y la capacidad última Du. El primero representa el desplazamiento en el que la respuesta de la estructura deja de ser lineal y el segundo el desplazamiento en el que el sistema estructural ha alcanzado el mecanismo de colapso o capacidad máxima.

Según se encuentre el punto de desempeño respecto a los puntos de cedencia y capacidad última se definen los umbrales de los estados de daño, según la figura 7.

El comportamiento sísmico también puede evaluarse a través de un **análisis no lineal en el dominio del tiempo**. En él se obtiene la respuesta de la estructura frente al movimiento del suelo a lo largo del tiempo. Se utilizan acelerogramas que representan el movimiento del suelo y se generan unas ecuaciones diferenciales de ese movimiento que se resuelven por el método de Newmark.

Con el programa SIMQKE_GR pueden generarse acelerogramas artificiales compatibles con el espectro definido por la normativa para la ciudad de Nueva York. Con estos acelerogramas se efectuará el cálculo dinámico de los edificios a estudiar en esta investigación.

4_ OBJETIVOS

El objetivo fundamental de esta investigación es el análisis estructural de las bóvedas tabicadas de los Guastavino (padre e hijo) utilizando modelos 3D de los edificios objeto de análisis mediante elementos finitos. Dichos modelos de cálculo sirven para analizar su comportamiento estructural no sólo frente a cargas gravitatorias sino también frente a acciones sísmicas. Para realizar un estudio pormenorizado se recurrirá al análisis no lineal en el tiempo, ya que este método reproduce mejor el comportamiento real de la estructura.

Por un lado se compararán los resultados obtenidos frente a peso propio con los cálculos mediante métodos de equilibrio y análisis gráfico que realizaron los Guastavino durante el diseño de sus bóvedas. Se tratará de dar una respuesta a la confusión que existe sobre el comportamiento estructural exacto de este sistema utilizando los métodos de cálculo más avanzados hasta el momento.

Además de ello, se comprobará la necesidad de los refuerzos metálicos que introdujeron como innovación estructural en el sistema constructivo que patentaron. Estos refuerzos se usaron, entre otros, en la cúpula de la Catedral de St. John the Divine, estructura de especial interés ya que es una de las cúpulas de fábrica más grandes construidas, con una luz superior a los 30 metros, y un antecedente a las cáscaras delgadas de Torroja y otros ingenieros[6].

Un último objetivo es analizar el comportamiento de estas estructuras frente a sismo, justificándolo con métodos numéricos. Las conclusiones que se obtengan permitiran plantear intervenciones preventivas, en caso de necesitarlas, que garanticen la estabilidad del patrimonio arquitectónico realizado por Guastavino.

5_ METODOLOGÍA

La metodología a seguir para el estudio estructural de las bóvedas de los Guastavino se ha desarrollado en el grupo de investigación al que pertenezco en la Universidad Politécnica de Valencia y utilizada en el desarrollo de mi tesis doctoral titulada *La Iglesia de Santa Catalina: historia, construcción y estructura*, defendida el 26 de febrero de 2016. A continuación se desarrolla brevemente una explicación del procedimiento a seguir.

_ Documentación y toma de datos

El estudio estructural de las bóvedas tabicadas de los Guastavino requieren una toma de datos muy minuciosa, tanto de documentación gráfica como escrita, a partir de la cual se elaborarán los modelos de cálculo. La fiabilidad de los resultados obtenidos en

[6]_ Ochsendorf, 2005.

el análisis depende en gran medida del conocimiento que se posea de los edificios en general y de estos elementos constructivos en particular. Es por ello que en la metodología se incluye el vaciado y estudio de los archivos de la *Guastavino Company,* que son la base de la Colección Guastavino en la Biblioteca Avery de la Universidad de Columbia, así como de los distintos artículos científicos publicados hasta el momento[7].

Otra fuente importante para llevar a cabo un modelo de cálculo con máxima precisión geométrica es la aplicación de la técnica del escáner láser 3D complementada con la realización de croquis con mediciones in situ. Esta técnica no destructiva proporciona una nube de puntos que reproduce el volumen del edificio mostrando no sólo las dimensiones exactas de sus elementos constructivos sino también sus deformaciones actuales. Esta técnica la utilicé en mi tesis doctoral, donde se realizaron un total de 100 estaciones obteniendo una nube de puntos única de aproximadamente 35 millones de puntos.

_ Levantamiento 3D

A partir de los datos obtenidos en la toma de datos, con escáner láser o, en su defecto, con técnicas tradicionales de medición in situ, se elaboran los planos necesarios para el entendimiento del funcionamiento constructivo de las bóvedas dentro del edificio al que pertenecen. Tras la realización de los planos en 2D, se construyen en 3D los elementos constructivos a analizar, aportando una volumetría exacta de la estructura.

Para manipular en CAD la nube de puntos completa obtenida del escáner láser mediante el progama Cyclone se utiliza la aplicación informática Escuadra, desarrollada por el profesor Adolfo Alonso Durá en el Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de la Universidad Politécnica de Valencia. Los puntos procedentes del escaneado permiten trazar las líneas que configuran las secciones, alzados y plantas. El levantamiento geométrico a realizar reproduce con fidelidad el estado actual, obteniendo una documentación gráfica inédita.

[7] _ Autores como los historiadores George Collins y Juan Bassegoda i Nonell, y los arquitectos John Ochseldorf, Santiago Huerta, Emily Ann Thompson, Esther Redondo Martínez, Jaume Rosell i Colomina entre otros.

_ Análisis estructural

Con toda esta documentación se realizan los modelos de cálculo para proceder a su análisis estructural. Es imprescindible conocer los métodos y las técnicas de ejecución de este tipo de estructuras en la época en la que se construyeron para la reproducción fiel de los casos de estudio. En base a la geometría obtenida se generan los modelos de cálculo usando el programa informático Angle[8]. Se utiliza la misma herramienta de trabajo para calcular y analizar los modelos.

Se realiza un primer estudio por análisis límite comprobando el equilibrio de los elementos constructivos utilizando la aplicación informática Statical (Alonso, 2003). Esta aplicación permite analizar por el método de la estática gráfica un modelo 3D generado considerando la geometría obtenida. Los resultados se compararán con el análisis que hizo Guastavino en 2D y comprobarán la necesidad o no de los refuerzos metálicos que introdujo el arquitecto. Según la teoría de Análisis Límite, la fábrica se considera un conjunto de bloques no deformables que se sostienen por peso propio. Sólo trabaja a compresión. El rozamiento entre bloques es muy elevado, de modo que el deslizamiento está impedido. Además se supone que las tensiones de trabajo son bajas por lo que los bloques no fallarán a resistencia. Así se reduce el problema al equilibrio, a la estabilidad de la estructura. Si se encuentra una línea de presiones que quede contenida en el interior de la estructura, ésta será estable, ya que trabajará únicamente a compresión.

En un segundo nivel de estudio, realizamos otro cálculo centrado fundamentalmente en el comportamiento del edificio frente a esfuerzos sísmicos. El análisis que mejor reproduce el comportamiento mecánico de este tipo de estructuras de fábrica es el análisis no-lineal. Para ello se emplea el método del modelo de daño y su evolución frente a cargas estáticas y dinámicas. En el análisis de la respuesta del edificio frente a sismo se emplean dos métodos de cálculo. Por un lado el análisis conocido como pushover, por empujes incrementales, y por otro el análisis dinámico no lineal en el tiempo que nos da una aproximación más fiel al comportamiento real del conjunto del edificio.

[8] _ Alonso, 2003.

Por último se aporta un listado de los programas informáticos utilizados como herramientas de trabajo para modelizar, calcular y procesar los modelos:

ANGLE
Programa de Análisis Estructural No-lineal por elementos finitos
Autor: Adolfo Alonso Durá (UPV)

STATICAL
Programa de Estática Gráfica en 2D, interfaz en CAD
Autor: Adolfo Alonso Durá (UPV)

BÓVEDAS 3D
Programa de Estática Gráfica en 3D, interfaz en CAD
Autor: Adolfo Alonso Durá (UPV)

SIMQKE_GR (V- 2.7-2012)
Programa de generación de acelerogramas artificiales
Autor: Piero Gelfi (University of Brescia)

ESCUADRA
Programa para procesado de nube de puntos
Autor: Adolfo Alonso Durá (UPV)

CYCLONE
Programa para procesado de nube de puntos
Autor: Leica Geosystems

BLENDER
Programa para modelado de imagen
Autor: The Blender Foundation

6_ BIBLIOGRAFÍA

ALMAGRO GORBEA A., ZARAGOZÁ CATALÁN A., SOLER VERDÚ R. and MARÍN SÁNCHEZ, R., "Construyendo bóvedas tabicadas", Actas del Simposio Internacional sobre bóvedas tabicadas, Valencia: Editorial Universitat Politècnica de València, 2012

ALONSO DURÁ, A. "Un Modelo De Integración del Análisis Estructural en Entornos CAD, para Estructuras de Edificación", Universidad Politécnica de Valencia, 2003

ALONSO DURÁ, A. and MARTÍNEZ BOQUERA, A. "La Comprensión de la Tracción", *Construyendo Bóvedas Tabicadas, Actas del Simposio Internacional sobre bóvedas tabicadas*, 2011

ALONSO DURÁ, A., MARTÍNEZ BOQUERA, A., MORENO PUCHALT, J. and LLOPIS PULIDO, V. "Analysis and Rehabilitation of San Miguel Arcángel Church in Jalance", Green Lines Institute, Valencia, 2012

ALONSO, A., MARTÍNEZ, A., LLOPIS, V. and MORENO, J. "Construction and Structural Analysis of the Dome of the Cathedral of Valencia", Proceedings of the 8th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures, FraMCoS 2013, pp. 698-704

AUSTIN, P., "Rafael Guastavino's Construction Business in the United States: Beginnings and Development", APT Bulletin, Vol. 30, Nº 4, 1999, pp. 15-19.

BASSEGODA NONELL, J., "Los maestros de obras de Barcelona", Barcelona, Editores Técnicos Asociados, 1973.

BASSEGODA NONELL, J., "La obra arquitectónica de Rafael Guastavino en Cataluña", *Las bóvedas de Guastavino en América*, S. Huerta (Ed.) Madrid, Instituto Juan de Herrera, Madrid, 2001, pp. 3-15.

CASOLO, S. and SANJUST, C. A., "Seismic Analysis and Strengthening Design of a Maronry Monument by a Rigid Body Spring Model: The Maniace Castle of Syracuse", *Engineering Structures,* 7, Vol. 31, Nº 7, pp. 1447-1459, 2009.

COLLINS, G., "The Transfer of Thin Masonry Vaulting from Spain to America", *Journal of the Society of Architectural Historians*, Vol. 27, Nº 3, 1968, pp. 176-201.

GARCÍA-GUTIÉRREZ MOSTEIRO, J., "Las bóvedas tabicadas de Guastavino: forma y construcción", *Actas del Tercer Congreso Nacional de Historia de la Construcción, Sevilla, Instituto Juan de Herrera*, 2000, pp. 365-374.

GARCÍA-GUTIÉRREZ MOSTEIRO, J., "Bóvedas tabicadas", en *Luis Moya Blanco. Arquitecto. 1904-1990.* Electa. Madrid, 2000, pp. 129-145.

GUASTAVINO, R., *An Essay on the Theory and History of Cohesive Construction*, 2ª ed. Boston: Ticknor and Co., 1893.

HEYMAN, J., "Equilibrium of shell structures", Oxford, Oxford Univ. Press. 1977.

HEYMAN, J., et al. "Teoría, Historia y Restauración de Estructuras de Fábrica: Colección de Ensayos", Madrid, Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente, CEHOPU, Instituto Juan de Herrera, 1995.

HUERTA, S., LÓPEZ, G., y REDONDO, E., "Bibliografía seleccionada y comentada sobre Guastavino y la construcción tabicada", *Las bóvedas de Guastavino en América*, S. Huerta (Ed.) Madrid, Instituto Juan de Herrera, Madrid, 2001.

HUERTA, S., "Arcos, Bóvedas y Cúpulas: Geometría y Equilibrio en el Cálculo Tradicional de Estructuras de Fábrica", Madrid, Instituto Juan de Herrera, 2004.

HUERTA, S., "Structural Design in the Work of Gaudí", Architectural Science Review, vol 49.4, pp. 324-339, 2006.

LOREN, M., "La construcción de la identidad arquitectónica norteamericana en el cambio de siglo 1880-1940. Una lectura desde el intercambio y la aportación española: la obra de la Compañía Guastavino en E.E.U.U.", Tesis Doctoral, Historia, Teoría y Composición Arquitectónica, Universidad de Sevilla, 2004.

MORENO PUCHALT, J., "La Iglesia de Santa Catalina de Valencia: Historia, Construcción y Estructura", Tesis Doctoral, Mecánica de los Medios Continuos y Teoría de Estructuras, Universidad Politécnica de Valencia, 2016.

OCHSENDORF, J., and AUTUÑA, J., "Eduardo Torraja y la Cerámica Armada", *Actas del Primer Congreso Internacional de Historia de la Construcción*, Madrid, Instituto Juan de Herrera, 2003.

OCHSENDORF, J., "Los Guastavino y la bóveda tabicada en Norteamérica", *Informes de la Construcción,* Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, Madrid, Vol. 56, Nº 496, 2005.

OCHSENDORF, J., "Guastavino Vaulting: the art of structural tile", New York, Princeton Architectural Press, 2010.

REDONDO MARTÍNEZ, E., "Las patentes de Guastavino and Co. en Estados Unidos (1885-1939)", *Actas del Tercer Congreso Nacional de Historia de la Construcción, Sevilla, Instituto Juan de Herrera*, 2000, pp. 895-905.

REESE, M.L., "Structural Analysis and assessment of Guastavino vaulting", Tesis Doctoral, Department of Architecture, Massachusetts Institute of Technology, 2008.

ROBERTSON, D., "Seismic considerations for Guastavino ceiling, vault and dome construction", APT Bulletin, Vol. 30, Nº 4, 1999, pp. 51-58.

ROSELL I COLOMINA, J., "Rafael Guastavino i Moreno: Inventiveness in 19th Century Architecture", en Tarragó, S. (Ed.) *Guastavino Company (1885-1962), Catalogue of Works in Catalonia and America,* Collegi d'Arquitectes de Catalunya, 2002 (artículo publicado originalmente en 1995).

SILMAN, R., "Structural repairs to fire-damaged Guastavino tile vaults at Grand Central Terminal's Oyster Bar", APT Bulletin, Vol. 30, Nº 4, 1999, pp. 47-49.