

_ARTÍCULO



DIEGO GODÍNEZ
SOLOLÁ

ASESOR: LIC. MARCO ANTONIO MORALES

LAS ESCALERAS HELICOIDALES DE LA CATEDRAL DE MÉXICO COMO UN EJEMPLO DEL ARTE DE LA CONSTRUCCIÓN CON MADERA

THE SPIRAL STAIRCASES OF THE MEXICO CATHEDRAL AS AN EXAMPLE OF THE ART OF WOOD CONSTRUCTION.

Dr. Arq. Agustín Hernández Hernández*
Evelyne Campos Lara **
Facultad de Arquitectura,
Universidad Nacional Autónoma de México.

Fecha de recepción: 05 de mayo del 2020
Fecha de aceptación: 29 de julio del 2020.
ahh@unam.mx

Resumen

En el presente artículo se exponen hallazgos técnicos que surgieron durante la manufactura de un modelo interactivo que ofrece: una visión completa de las escaleras helicoidales de madera de más de 14 m de altura, situadas en los campanarios de la Catedral de México. Asimismo, permite recrear el sistema constructivo con su comportamiento estructural, como método no destructivo de investigación para poder analizar procedimientos de restauración prácticos y seguros.

A través de su estructura progresiva, trata de aportar elementos capaces de clarificar varias hipótesis sobre el sistema constructivo de estas escaleras del siglo XVIII, trazadas con una geometría de vanguardia para su momento, donde por primera vez se implementó la elipse como elemento de composición arquitectónica en México.

Técnicamente las escaleras constituyen una extraordinaria curiosidad estructural y aunque actualmente presentan deformaciones con algunos mecanismos naturales de deterioro, han encontrado por sí solas su estado de equilibrio estructural admisible.

Palabras clave:

Anillo, cedro, elipse, empotramiento, espiga, estabilidad, estereotomía, embonar, envareado, flexibilidad, hélice, intervalo, mecanismo, mudéjar, saques, proporción, trayectoria.

* Investigador Titular de Centro de Investigaciones en Arquitectura, Urbanismo y Paisaje de la Facultad de Arquitectura de la UNAM, sus investigaciones se enfocan a la Restauración estructural de construcciones patrimoniales, Aplicaciones del bambú como material estructural y Estructuras resistentes por forma.

** Estudiante de la Facultad de Arquitectura de la UNAM, actualmente se encuentra en proceso para titularse como Arquitecto. Es importante destacar que través de su familia ha heredado el gusto y experiencia por la madera y la carpintería.

Abstract

This article presents technical findings that emerged during the manufacture of an interactive model, which offers a complete view of the wooden helical stairs of more than 14 m in height, located in the bell towers of the Cathedral of Mexico. Likewise, it allows to recreate its construction system with its structural behavior, as a non-destructive research method to analyze practical and safe restoration procedures.

Through its progressive structure, it tries to provide elements capable of clarifying various hypotheses about the construction system of these eighteenth-century stairs, drawn with avant-garde geometry for its time, where the ellipse was first implemented as an element of architectural composition in Mexico.

Technically the stairs are an extraordinary structural curiosity and although they present deformations with some natural deterioration mechanisms, they have found on their own their admissible state of structural equilibrium.

Keywords:

Ring, cedar, ellipse, embedment, spike, stability, stereotomy, fit, envarengado, flexibility, helix, interval, mechanism, mudejar, saques, proportion, trajectory.

Presentación

El uso de la madera como material de construcción en México tiene sus orígenes desde épocas prehispánicas y ha sido de los recursos más usados a través de la historia debido a su versatilidad e incluso debido a aspectos de estética que ofrece a quienes la utilizan como su color, su textura y su agradable forma de envejecer que siempre ha causado una gran fascinación en el hombre.

Con el objetivo de contribuir a difundir el conocimiento de la historia de la construcción con madera, en este artículo primero se contextualiza culturalmente el tema y después se comparte la investigación realizada sobre una de las obras de madera más importantes de México: las escaleras helicoidales de la Catedral Metropolitana de la ciudad de México, principalmente porque no se tiene registro de la existencia de alguna otra obra semejante que pertenezca al siglo XVIII en Latinoamérica, y también porque a pesar del tiempo aún sigue en uso, Figura 1.

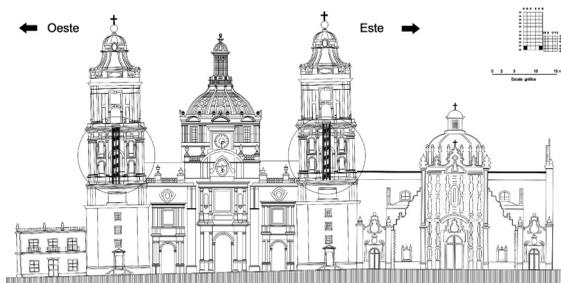


Figura 1
Fachada de la Catedral y Sagrarios
Metropolitanos

Debido a que la madera es un material orgánico, en la actualidad el desconocimiento sobre sus características y sus comprobaciones sistematizadas, ha propiciado prejuicios respecto a su uso en la construcción, tales como su poca durabilidad, su variación por humedad denominada higroscopicidad, su combustibilidad, su putrefacción, entre otros aspectos, creando desconfianza en el uso de este material natural.

Sin embargo, quienes se han interesado en conocerla y estudiarla por sus cualidades, se han sorprendido por encontrar un material de construcción, que tanto como el concreto o el acero, es capaz de absorber esfuerzos simultáneos de compresión, tracción, cortante y flexión. Cuando trabaja de manera adecuada puede alcanzar una alta durabilidad.¹

Sería incorrecto señalar que la madera tiene poca durabilidad a través del tiempo, aunque este es uno de los motivos más comunes del rechazo injusto en el campo de la construcción. No solo en México, sino también en otras partes del mundo, se ha comenzado a hacer conciencia sobre el uso de la madera en la historia de la construcción. Existen varios ejemplos arquitectónicos que testifican dicha aseveración, como sería la construcción tradicional en diversas culturas.

¹ Agustín Hernández Hernández. "Historia de la Arquitectura y el urbanismo mexicano", Volumen IV, Tomo II. Presencia de la Construcción con madera, UNAM, Fondo de Cultura Económica, 2015. P. 195.

Las culturas mesoamericanas como la Chichimeca y la Maya construían con madera, que era trabajada de diferente forma dependiendo de las clases sociales a la que pertenecían.²

[Las casas de los pobres eran de cañas y de ladrillos crudos, o de piedra y fangos y el techo de un heno largo y grueso, una de las columnas o apoyos de estos edificios, solía ser un árbol de proporcionadas dimensiones, el cual además del recreo que les proporcionaba su frondosidad, solía ahorrarles algún gasto y trabajo.

Las casas de los señores y la gente acomodada eran de piedra y cal, tenían dos pisos, con sus salas y cámaras bien distribuidas y sus patios, el techo llano de buena madera, bien labrado y con azotea, los muros tan blancos, bruñidos y relucientes que los primeros españoles que los vieron de lejos, los creyeron de plata; el pavimento de una mezcla igual y lisa.] Francisco J. Clavijero. (1759).

En la cultura Maya las primeras construcciones estaban hechas de bahareque y techos de paja. En un inicio los apoyos eran hechos de troncos de árbol y más tarde se hacían mixtos, con madera y piedra, hasta llegar a construirse completamente de piedra. El sistema de bahareque consistente en un entretejido de palos o cañas recubiertos con barro y las cubiertas de palma eran soportadas por un sistema de largueros de madera que descansaban sobre los muros.

Es hasta la llegada de los españoles que el uso de la madera comienza a ser descrito en textos hechos por técnicos y cronistas de esa época, por lo que se comienza a tener un registro más preciso sobre algunas obras realizadas con madera; así como, también el reconocimiento de algunos autores protagonistas, como lo fue Fray Andrés de San Miguel, quien también es autor del primer tratado de carpintería mudéjar en México, en 1642.³

Durante el virreinato en el territorio mexicano desde 1519, cuando desembarcó Hernán Cortés en costas veracruzanas, la arquitectura se enfocó principalmente a construir templos para las órdenes religiosas encargadas de evangelizar. A mediados del siglo XVI y el primer cuarto del siglo XVII, en diversos territorios del área Maya las construcciones religiosas con madera se realizaban sobre "antiguas" edificaciones prehispánicas, que tenían la apariencia de ser provisionales, pero que ahora resultan ser una tradición constructiva Maya,⁴ y son un claro ejemplo sobre la importancia de la madera para las primeras construcciones realizadas en la Nueva España, pasando a ser una referencia constructiva para las grandes obras de madera realizadas posteriormente.

Debido a la mezcla de culturas y conocimientos de sistemas constructivos, entre los españoles y las culturas prehispánicas, la construcción con madera tuvo gran importancia, principalmente durante la edificación de haciendas y conventos, siendo estos

² D. Francisco Javier Clavijero, traducido del italiano por D. Joaquín de Mora. "Historia antigua de México y su conquista", 1984. P. 243.

³ "Obras de Fray Andrés de San Miguel", Fray Andrés de San Miguel, palografiado por Eduardo Báez Masías. 1969.

⁴ Juan García Targa. "Arquitectura colonial temprana en el área maya: registro material y documentación escrita".

últimos construidos en mayor medida, debido al propósito de las órdenes religiosas que llegaron para evangelizar a los pobladores indígenas.

Según el ingeniero Adrián Pérez Pizarro, se realizaron tantas construcciones de madera en el siglo XVI, que hubo una sobreexplotación de los bosques, en los lugares próximos a la capital. Los edificios históricos en los que aún se puede observar su estructuración, son un auténtico vestigio sobre la importancia de la madera en la construcción de aquella época.⁵

[Lo que hoy es la calle del Puente de Alvarado, era el principio de los inmensos bosques que se extendían más allá de Tacubaya hasta Santa Fe. Esos bosques les suministraron a los españoles todo el material necesario, y muchos de los edificios existentes conservan madera de cedro que data de aquellos remotos tiempos...] Ing. Adrián P. Pizarro (1906).

Existe evidencia de varias obras hechas con madera en diferentes partes del territorio mexicano, como techumbres con alfarjes o armaduras. Siendo un ejemplo notable los entresijos del templo del Carmen, ubicado en San Ángel en la ciudad de México construido en 1608, por Fray Andrés de San Miguel, quien utilizó un sistema constructivo de artesonado mudéjar, el cual consiste en vigas de madera con aplanado de yeso al igual que sus decoraciones, generalmente el término de artesonado se refiere a toda techumbre con decoración de madera.

Otros ejemplos serían los techos de carpintería mudéjar del templo de la Merced, que se encuentra en el centro histórico, construido en 1634, por el Arquitecto Lázaro de Torres,⁶ y la cubierta de madera de la Catedral de Tlaxcala representa un ejemplo extraordinario, edificada entre los años de 1530 a 1536. Esta cuenta con una sola nave y una cubierta de madera a dos aguas, con vigería estructurada en forma piramidal, adornada por un magnífico artesonado de madera mudéjar, Figura 2.



Figura 2
Catedral de Tlaxcala dedicada a
Nuestra Señora de la Asunción,
Ubicada en San Francisco, Centro,
90000 Tlaxcala de Xicohténcatl,
Tlax., Fotografía por Evelyne
Campos Lara.

⁵ Adrián Pérez Pizarro. "Materiales de Construcción", Madera, revista Arte y Ciencia, 1906. P. 19 a P.23.

⁶ Luis Alberto Torres Garibay, "Cubiertas de madera en los templos Virreinales del centro del antiguo obispado de Michoacán", Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, 2016.

Pero no solo las cubiertas de los templos han formado parte de la historia de la construcción con madera en México, también lo han hecho construcciones de índole militar, como es el caso de la Fortificación de San Juan de Ulúa, situada en el puerto de Veracruz, donde su cimentación fue resuelta a base de pilotes de madera de zapote, la cual estabiliza un área de casi cinco hectáreas, donde se encuentran sujetos con un envarengado de madera clavado a la cabeza de cada pilote.⁷ Los inicios de esta obra datan del año 1535 por mandato del Virrey de la Nueva España, Don Antonio de Mendoza. Se dice que el mismo Hernán Cortés ayudó a hacer las empalizadas para defender las embarcaciones del viento del norte.⁸ Pero al ver estas improvisadas edificaciones, el Ingeniero Militar Cristóbal de Erazo, por 1570 desarrolló un proyecto donde se describe la construcción de viviendas de madera, y los inicios de la gran fortaleza militar.

[Aquí y en lo alto de la muralla ay una trinchera (...) llena de arena para poder ir la gente de una torre a otra por el norte.] [Tras el muro y a lo largo de él un camino terrizo con una construcción de madera, "la casa de las mentiras", que continua hacia el interior de la torre nueva. En el Alzado se dibujan diversas viviendas de madera, algunas sobre palafitos, correspondientes a la herrería, la casa del alcalde, y el hospital, terminado en una plaza cuadrada alrededor de la cual se sitúan viviendas de los negros, la iglesia y el almacén]. Archivo de Indias (1590).

Inclusive durante esta época del siglo XVI, era tan importante la madera como recurso natural que caracterizaba a las tierras recién descubiertas. Según el historiador Juan Manuel Zapatero, afirmó que Campeche entre todas las ciudades de la Nueva España, se distinguía por ser "la llave del comercio de las maderas preciosas".

Como se puede notar existen indicios que demuestran que el uso de la madera estaba presente en varios géneros de construcción desde el siglo XVI al XVIII. Es importante señalar que hay obras realizadas durante esta época que siguen siendo reconocidas en la actualidad, puesto que difícilmente serían replicadas, ya que sus autores demostraron pericia en su construcción y manejo del material (la madera). Por esa razón en la disciplina de la arquitectura resulta oportuno ofrecer herramientas que contribuyan a la conservación de estas obras, así como también su clasificación y el estudio de su conducta estructural.

Las escaleras helicoidales de madera

Durante el virreinato, el arte de construir con madera estuvo a la altura de las circunstancias, así lo constatan varias obras conformadas con elementos estructu-

⁷ Sara Elizabet Sanz Molina, "FORTALEZA DE SAN JUAN DE ULÚA", Veracruz, Veracruz-México, Fortalezas.org, 2010 diciembre 11.

⁸ María Luisa Sabau García "México en el mundo de las colecciones de arte", Vol. 4, UCOL, 1994. P. 195.

rales de madera que aún permanecen. Probablemente un fruto especial de aquella experiencia son las fantásticas escaleras helicoidales situadas en los campanarios de la Catedral de México, diseñadas y construidas en el siglo XVIII, por el Arquitecto José Damián Ortiz de Castro originario de Coatepec, Veracruz.

En aras del estudio sobre dichas escaleras, que en conjunto con este inmueble histórico, forman parte del patrimonio cultural del país, reconocido por la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO) desde 1987; el Laboratorio de Estructuras del Centro de Investigaciones en Arquitectura, Urbanismo y Paisaje (CIAUP), de la Facultad de Arquitectura de la UNAM, se dio a la tarea de crear un modelo físico a escala, que tiene el propósito de interactuar para facilitar la comprensión del trabajo estructural de esta pieza única en América, puesto que entre los estudios hechos sobre diversos monumentos de la época del siglo XVIII, no se ha encontrado alguno que tenga el peculiar trazo elíptico como el que presentan estas escaleras, siendo los recursos de diseño habituales las geometrías a base de circunferencias.

Según los registros obtenidos de la Academia de San Carlos, tras un concurso realizado en el año de 1787, el Arquitecto mexicano José Damián Ortiz de Castro; quien era profesor de matemáticas y geometría, resultó designado para realizar las obras de construcción de los campanarios, diseñando un proyecto innovador para hacerlas eficientes contra los sismos e imponiéndose ante los proyectos de los arquitectos José Joaquín de Torres e Isidro Vicente de Balbás. Por esta razón es muy probable que fue también el autor de ambas escaleras helicoidales para acceder a dichos campanarios, ya que en su composición arquitectónica aparece la elipse como trazo directriz.

Resulta importante destacar que, junto con el Doctor Fernando López Carmona, iniciamos el estudio de ambas escaleras desde el 2009, con la participación de alumnos que suelen acudir al Laboratorio de Estructuras para hacer su servicio social, quienes contribuyeron a realizar la recopilación de información con las primeras mediciones, que permitieron explorar la posibilidad de diseñar un modelo a escala y también gracias al apoyo brindado por la Dirección General de Sitios y Monumentos del Patrimonio Cultural de la Secretaría de Cultura, para tener acceso a dicho monumento cuando nuestras actividades de investigación lo requerían.

Aunque fueron varios los intentos preliminares, es ahora con el apoyo del Programa de Práctica Profesional Supervisada de la Facultad de Arquitectura de la UNAM y mediante una entrevista previa para conocer la idoneidad de los alumnos interesados en temas específicos sobre el estudio e investigación de estructuras resistentes por forma y la rehabilitación de inmuebles patrimoniales, que fueron asignados para desarrollar esta importante meta de realizar el modelo físico de dichas escaleras, con la intención de poder analizar su estereotomía, su construcción y su comportamiento estructural de manera interactiva.

Descripción metodológica

Para realizar el modelo físico primero fue necesario analizar escrupulosamente toda la información existente, donde fue posible situar las escaleras en el contexto histórico y así poder formular una serie de hipótesis iniciales sobre la manera en que fueron construidas hace más de doscientos años. Dicha metodología de trabajo sirvió para empezar a estudiar la función de cada pieza, la posible manera en que fueron fabricadas y colocadas en su destino final, aspectos que hasta la fecha no se habían documentado desde el punto de vista técnico.

Las escaleras fueron construidas completamente con madera de cedro blanco (*Juniperus ashei*) y se encuentran desplantadas sobre el sotabanco rectangular de cada torre, por lo que fueron trazadas con una geometría elíptica, la cual tiene la virtud de poder proporcionalarlas en función a ambos lados del rectángulo, Figura 3.

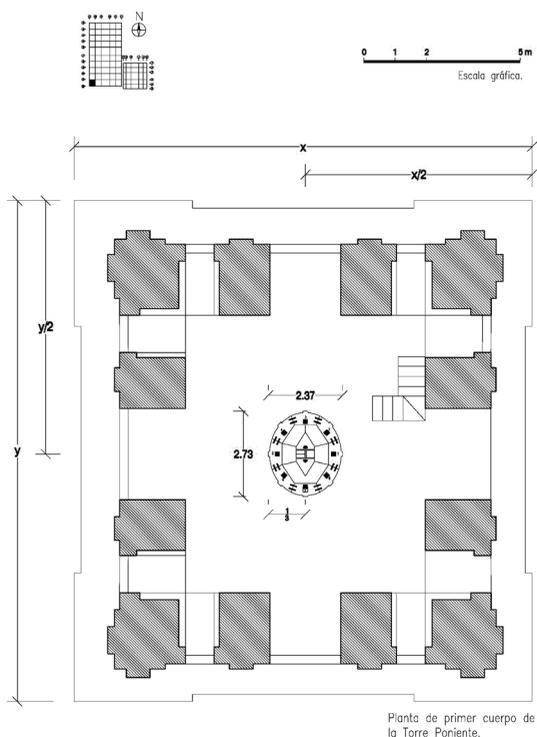


Figura 3
Planta del Primer cuerpo de la Torre poniente, con el desplante de la escalera.

Respecto a la estabilidad de los ocho pies derechos constituidos de una sola pieza de 15 x 15 cm y 14.5 m de altura, se identificó que para inhibir en fenómeno de flexión, están empotrados en la parte inferior y en la parte superior llegan a tope contra el anillo superior de cantera, donde se encuentran fijos con un tipo de “zuncho” de 20 cm de espesor, que permite mantener en comprensión cada pieza; es decir, que al estar estabilizados por carga, conservan su arreglo elíptico.

Durante la fase del proceso analítico mediante asesorías periódicas, brindadas en el Laboratorio de Estructuras, se identificó que, para la manufactura de las escaleras,

era necesaria una estructura auxiliar, constituida por dos postes centrales que tienen una sección semicircular, los cuales permiten controlar de manera práctica la forma de la elipse del “anillo interior”, que está conformado por tramos verticales conectados mediante ensambles tipo cola de milano. La trayectoria que materializa en el espacio es una auténtica hélice elíptica que se asocia con las elipses del contorno mediante una familia de líneas rectas horizontales.

Las alfardas y el anillo interior se encargan de recibir a cada peldaño, que en general presentan una estereotomía parecida a un diedro alabeado que, en la parte inferior, denominada contrahuella, desarrollan una superficie reglada que aporta una visual de continuidad entre peldaño y peldaño. La geometría de la huella se origina al modular la elipse de borde (la número 3) en catorce intervalos iguales, Figura 4. Estos como las alfardas y los barandales siguen la misma forma elíptica con la pendiente de la escalera de 38.77%. De acuerdo con los análisis que desarrolló la Facultad de Arquitectura en el 2009, para su diseño Ortiz de Castro, implantó un sistema de elipses equidistantes como escantillón, permitiendo ubicar a partir de la proyección de los ejes horizontales, la huella de cada peldaño en el espacio, como una familia de generatrices que representan en alzado los peraltes de cada escalón.

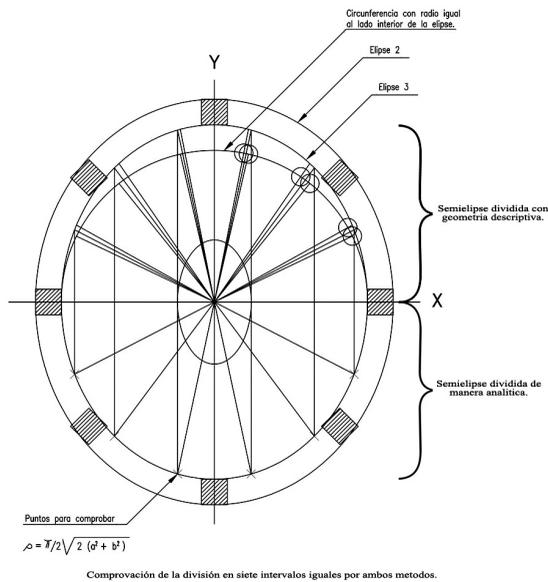


Figura 4
Definición del sistema de elipses equidistantes en planta, obtenido por el Dr. Agustín Hernández Hernández. Recuperado de Memoria técnica 2009, "Escaleras Helicoidales de madera de la catedral de México".

[Con este método gráfico es posible configurar el sistema de elipses equidistantes necesario y encontrar una explicación sobre la disposición de los ocho pies derechos, . . .], [Una vez definido éste del sistema de elipses equidistantes en planta, sigue la fase de modular la elipse número 3, en función a un número de peldaños por ciclo, premisa que define el diseñador, para establecer los intervalos en que dividirá la curva directriz.] Dr. Agustín Hernández Hernández (2009).

Previamente al diseño del modelo físico, se contemplaron también algunas cualidades didácticas que era necesario cumplir para facilitar el proceso de enseñanza-aprendizaje. Ambas conjeturas son resultado de experiencias anteriores, debido a que cuando se explicaba dicho modelo, siempre despertaba la curiosidad de desmontar cada pieza para verificar la validez de sus conceptos, por lo que las uniones se recrearon lo más cercano a la realidad.

Otro aspecto importante que vale la pena estudiar es la definición de materiales a utilizar para lograr una interacción sin detrimento. Como se ha mencionado anteriormente, los modelos previos se realizaron completamente de madera, pero al pasar el tiempo se identificó que varias piezas dejaban de embonar debido a la humedad del ambiente y su propiedad higroscópica, lo que ocasionó complicaciones sistemáticas durante el desmontaje. Después de esta experiencia, se tomó la decisión de fabricar algunos componentes en impresión 3D, con filamento PLA; y otras como la base, el anillo superior, los pies derechos y el anillo interior, con madera de cedro rojo (Cedrela odorata).

La elaboración del modelo 3D inició con la digitalización de una montea biplanar, donde se ubicaron 87 peraltes para cada peldaño, proyectados desde la planta elíptica, después fue la hélice el elemento que sirvió de referencia para obtener el sólido necesario de los dos tipos de alfarda con curvatura en dos sentidos y los barandales, considerando sus respectivos espesores, inscritos en un cilindro elíptico. Durante el modelado de los cuatro tipos de peldaños se reprodujeron también detalles como las espigas de ensamble que explican la superposición del proceso constructivo, Figura 5.

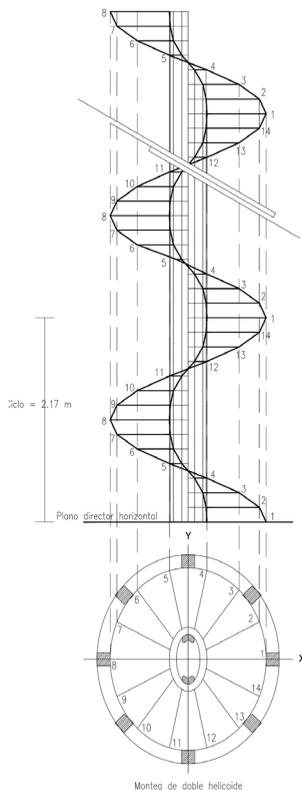


Figura 5
Montea biplanar

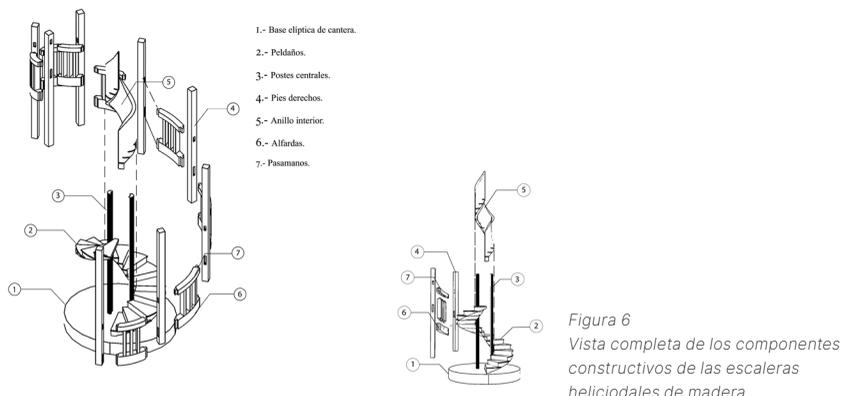
El modelo físico

Como se ha comentado, dicha investigación experimental se inició por el año 2009, basado fundamentalmente en ecuaciones paramétricas debido a que en el helicoide, un par de coordenadas (X,Y) puede tener distintos valores de "Z" y su estabilidad se evaluó con el método de doble integración numérica. Así fue que con el rigor de sus comprobaciones, esa serie de estudios permitió derivar la comprensión de la forma construida. Sin embargo, constituyó una investigación auténtica e interesante, pero extraordinariamente especializada.

De manera particular, siempre hubo la intención de compartirlo con mayor cantidad de gente. Por lo que el reto consistía en poder ilustrar aquellos resultados numéricos para motivar a los interesados y ahora que la inercia mundial ha revalorado la importancia de proteger el equilibrio ecológico, parece extraño que algunos grupos aún desapruaban a la madera como material estructural. Fue así, que la coincidencia de varios factores, propiciaron la oportunidad de construir un modelo físico esc. 1:5, y el tema de las fantásticas escaleras volvió a retomar vigencia, Figura 6.

Las alfardas, barandales, peldaños y pasamanos se imprimieron en 3D, siendo en total 27 piezas que tuvieron una duración de elaboración entre 3 a 4 horas. Para ejecutar la manufactura de dichas piezas fue necesario aprender a manejar el Software de la impresora con el fin de configurarla acorde al material usado, por ejemplo, la temperatura tanto del extrusor como de la placa fue una variable de importante para poder realizar cada pieza, porque depende también de la temperatura del medio ambiente. En el caso en estudio, se manejaron temperaturas de entre 60°C a 75°C en la placa, para impedir que el modelo se despegara de esta y de 190°C a 200°C para los extrusores, en una temperatura ambiente de 15°C a 24° C.

Solo para realizar algunas piezas de madera como la base, los pies derechos, el anillo interior, los postes centrales y el anillo superior, se necesitó cierto nivel de especialización sobre el manejo de material y conocer aspectos característicos de las escaleras originales, ya que como se mencionó anteriormente se trata de un ejemplar único, sin precedentes del método constructivo, Figura 6.



Ante esta circunstancia, se obtuvo la ayuda y colaboración de los maestros carpinteros, Rubén Campos y Manuel Lara, quienes trabajan su oficio desde hace 30 años. La mayor parte de las piezas se fabricaron en su taller aproximadamente durante 15 días; la base elíptica que está conformada con 3 piezas de triplay de pino de 12mm, fue cortada a láser para lograr la profundidad de cada caja que requiere el empotramiento de los 8 pies derechos y el anillo interior, Figura 7.

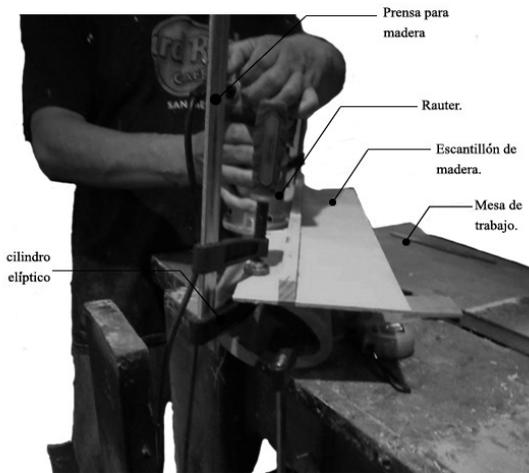


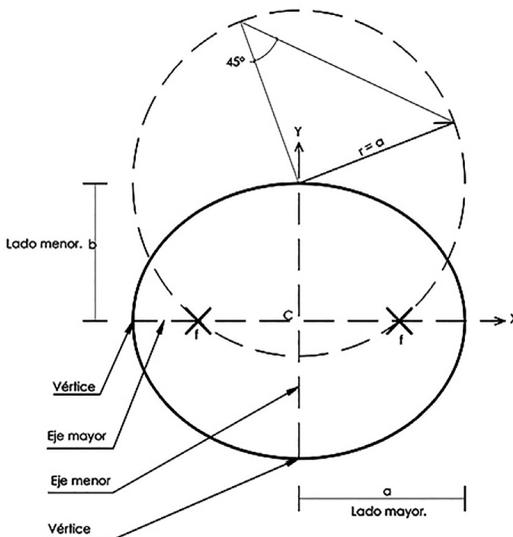
Figura 7
Fabricación de piezas en taller de carpintería.

Es importante comentar que para proyectar el desplante de los pies derechos y trazar la elipse en planta, fue necesario otras sesiones adicionales de capacitación en el Laboratorio de Estructuras, donde cada alumno aprendió tanto el método analítico como el geométrico del modelo, lo cual condujo a aprender a calcular los focos de la elipse, usando solo el compás, como seguramente lo hicieron hace más de doscientos años, Figura 8.

METODO PARA CALCULAR LOS FOCOS DE LA ELIPSE POR MEDIO DEL TRAZO CON COMPAS.

- 1.- Primero ubicar el centro de la elipse. (c)
- 2.-Trazar ambos ejes de simetría (X y Y).
- 3.- Ubicar los cuatro vertices en ambos ejes.
- 4.- Trazar una circunferencia de $r = a$ haciendo centro en uno de los vertices del eje menor.
- 5.-Los puntos donde la circunferencia se intersecta con el eje mayor (x), son los focos que estamos buscando.
- 6.- Ambos focos (f y f') permitiran configurar la elipse.

Este método es práctico porque el cálculo analítico es numérico pero teórico y en el sitio surge un ajuste en el trazo se actualiza inmediatamente.



METODO ANALITICO PARA CALCULAR LOS FOCOS DE UNA ALIPSE CUYO EJE MAYOR COINCIDE CON EL EJE CARTESIANO (X).

Ecuación $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$

Sustitución $\frac{x^2}{(0.96)^2} + \frac{y^2}{(0.83)^2} = 1$

$\frac{x^2}{0.9216} + \frac{y^2}{0.6889} = 1$

Ec. general $0.6889 x^2 + 0.9216 y^2 = 0.63484$

Relación $a^2 = b^2 + c^2$

Despeje de c $c^2 = a^2 - b^2$
 $c = \sqrt{a^2 - b^2}$

Sustitución $c = \sqrt{0.9216 - 0.6889}$
 $c = 0.4823 \text{ m}$

Es la distancia hacia la derecha y hacia la izquierda del eje x.

NOTA:
 Se calculo d1 para ubicar de manera más práctica el foco respecto al vértice del eje mayor.
d1=a-c d1=0.96-0.4823=0.4777m

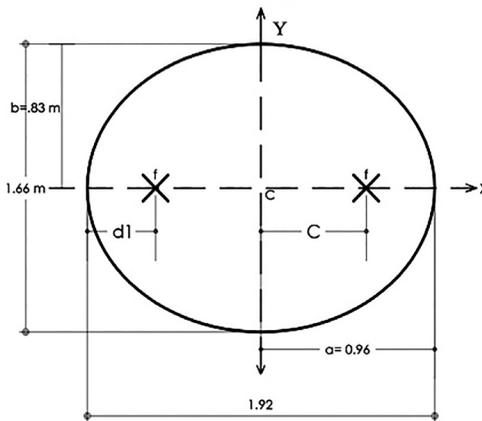


Figura 8
 Dos métodos para calcular los focos de una elipse, con geometría habitual.

Con la ubicación exacta de cada pie derecho, se procedió a fabricarlos con madera de cedro rojo, de dimensiones de 2.8 x 2.8 x 64.0 cm, simultáneamente se inició la manufactura del anillo interior, el cual primero se intentó realizar como un cilindro elíptico conformado por secciones de 1cm aproximadamente, pero al carecer de una fijación rígida en la planta y sin la ayuda de ambos postes centrales (estructura auxiliar), la forma elíptica comenzó a presentar deformaciones prematuras, por lo que se decidió cambiar de estrategia, al implementar un cilindro conformado por dos piezas equivalentes a una semielipse, que permitieron mayor control de la directriz, los cuales se unieron entre sí, mediante ensambles tipo cola de milano dispuestos perpendiculares a cada plano de corte.

Al realizar las cajas que proyectan los peldaños, en los pies derechos y el anillo interior, se fue empotrando una a una las piezas en la base. Posteriormente se marcaron las alturas, procurando que cada peldaño quede nivelado y escuadrado respecto a los pies derechos, porque son los únicos elementos fijos en el espacio. Ello permitió mantener la continuidad de la hélice tangente a los paños de las alfardas, pies derechos y barandales. Al carecer del anillo superior, fue necesario sujetar cada pie derecho al anillo interior con cuerdas, lo que permitió que cada pieza trabajara adecuadamente a compresión y poder realizar ajustes con mayor facilidad para colocar peldaño por peldaño e ir marcando las alturas progresivamente y así, hacer los saques gradualmente con un formón, Figura 9.

Con la altura marcada de todos los peldaños y sus respectivos saques, se utilizó una plantilla de papel, para poder realizar la trayectoria de la hélice interior, tomando en cuenta el eje vertical que se estableció durante el desarrollo analítico y al final del ciclo (14 peldaños), se identificó que al realizar este corte vertical en el cilindro elíptico inicial, las piezas perdieron estabilidad y compresión, por lo que se sustituyeron las cuerdas, que sujetaban los pies derechos al anillo interior, y fue necesario fabricar los postes centrales de forma semicircular, utilizando una broca de media caña, los cuales al integrarlos aportaron la estabilidad que requería el anillo interior. Como se puede inferir, fue hasta esta fase de investigación cuando se confirmó la función específica de los postes centrales, identificada previamente de manera analítica.

Para configurar los barrotes del anillo interior que, debido a lo cerrado de las elipses, resultan de sección oblicua, se tomaron en cuenta los ejes ubicados de forma equidistante, dividiendo el perímetro de la elipse interior en catorce intervalos, como ocurrió con la elipse de borde. Es importante destacar que los barrotes siguen la misma curvatura de la hélice, en este caso la interior.

Respecto al cierre del modelo, se procedió igual que con la base. Se realizó la tapa de forma semielíptica, en triplay de pino de 12mm, para poder encajar cada pie derecho, es decir que cumple cabalmente la función que desempeña el anillo superior en la realidad, el cual es capaz de mantener inalterada la forma elíptica al inducir compresión en las piezas, Figura 10.

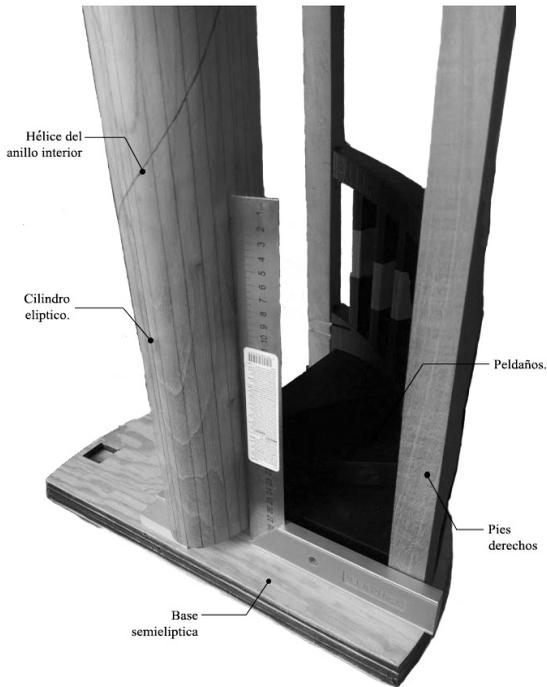


Figura 9
Proceso para realizar los saques, se marcaron las alturas, procurando que cada peldaño quedara nivelado y escuadrado respecto a los pies derechos. Fotografía por Evelyne Campos Lara.



Figura 10
Modelo físico de las escaleras helicoidales de madera de la Catedral Metropolitana de la Ciudad de México. Realizado por Evelyne Campos Lara. 2019, Fotografía por Evelyne Campos Lara.

Al observar el modelo armado, tiene la cualidad de ayudar a deducir de manera rápida, que las escaleras trabajan como un solo elemento calado, a manera de columna hueca, donde la carga viva que reciben los peldaños, se traslada por flexión tanto a las alfardas como al anillo interior, para poder transmitirse a los pies derechos, por ser los elementos soportantes principales, mecanismo que faltaba demostrar.

También tiene el propósito de ilustrar el arte de las uniones, las cuales se estudiaron y mecánicamente sus proporciones son satisfactorias, por ejemplo, la intersección de los peldaños hacia las alfardas y el anillo interior, consiste en una unión de caja y espiga donde los peldaños de una sola pieza, se deslizan por sus extremos hasta situarse en la posición que les corresponde. Este tipo de apoyo lateral resulta eficaz, porque la profundidad del riel en cada alfarda impide cualquier posibilidad de giro.

Dicha característica constructiva con ensambles de caja y espiga se repite también entre alfardas y pies derechos donde, solo por su extremo de arriba lleva una holgura en el lecho superior para colocar una cuña, capaz de afianzar con mayor solidez cada etapa durante el proceso constructivo y debido a su inclinación, en el extremo inferior la cuña es irrelevante, porque se produce una compresión por acción de la fuerza de gravedad.

Por lo tanto, se descubrió un manejo ingenioso del sistema de cuñas que permite encajar y hacer ajustes, acorde al ángulo que garantiza la rigidez del ensamble, esta cualidad permite hacer trabajar a los elementos en armonía transmitiéndose unos a otros los efectos mecánicos. Asimismo, permitió agilizar la colocación de las alfardas de manera práctica y segura. Con el conocimiento de estas características constructivas, se confirma que desde el momento en que empieza a conformarse la escalera, predominan esfuerzos de compresión.

Para poder elaborar cada pieza con este grado de detalle, fue necesario hacer otra serie de visitas a la Catedral, que permitieron comprender las cualidades de los ensambles entre cada elemento, considerando su proporción real, después se logró confirmar paulatinamente la hipótesis, sobre la existencia de una superposición de peldaños que era imposible de conocer sin la geometría exacta de todos los componentes, Figura 11.

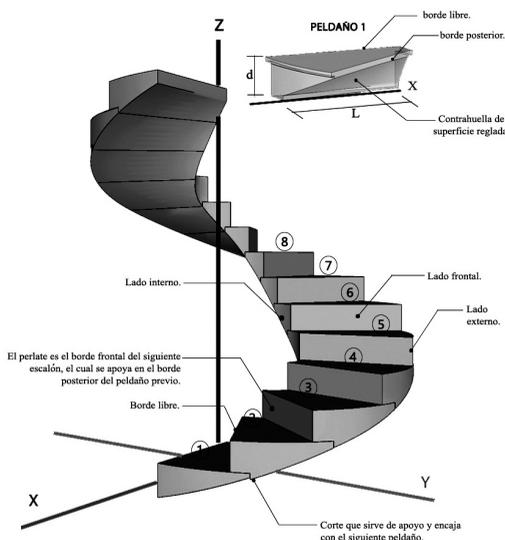


Figura 11
Superposición de Peldaño y su estereotomía, modelo 3D por Evelyne Campos Lara, 2019.

Durante el proceso de fabricación del modelo físico, fue posible analizar oportunamente la excepcionalidad de diseño que tiene cada pieza de dichas escaleras. Como estudiosos de la arquitectura se puede expresar, que se trata de una obra extraordinaria. Solo al trasladarse a la época en la que fueron construidas, sin contar con el equipo que ahora disponemos, se nota el admirable ingenio del arquitecto para realizar tal obra maestra.

Por ejemplo, en nuestro caso para fabricar el modelo escala 1:5, se necesitó asesoría especializada de carpinteros, lo cual hace pensar en varios aspectos que salieron a la luz hace más de doscientos años para construir ambas escaleras en verdadera forma y magnitud a 25 m de altura. Además del ingenio del arquitecto también fue importante el talento de los artesanos juntamente con la calidad de la mano de obra. En las Figuras 12 a, 12b y 12c, se revela a detalle cada componente como parte del conocimiento que debe dominar para poder formular un proyecto de conservación. Asimismo, se considera importante crear una estrategia precisa de apuntalamiento, antes de intentar desmontar una pieza, si para el futuro se considera necesario restaurarla en el piso.

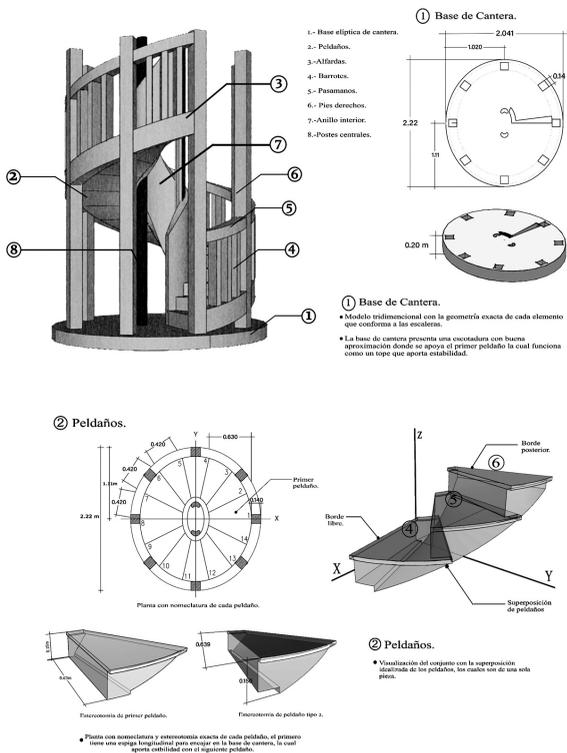


Figura 12 a

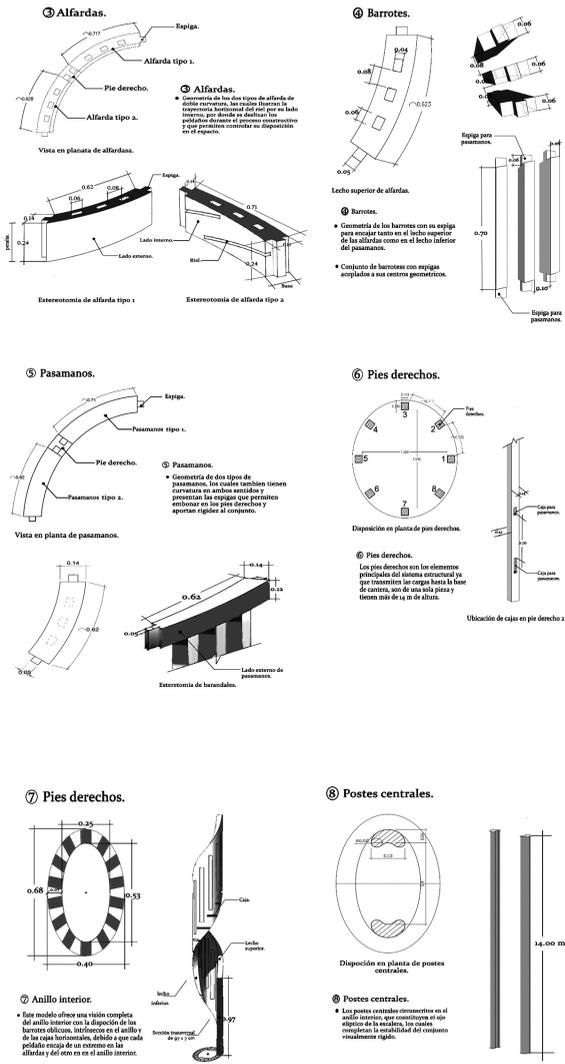


Figura 12 b

Figura 12 c

Esta descripción detallada hace reflexionar sobre la importancia y el rol que han tenido los carpinteros en la historia de la construcción. Según la Dra. Elisa Vargas Lugo, en el siglo XVI, junto con la llegada de los españoles arribaron varios carpinteros a la Nueva España, para la producción de muebles religiosos, pero su trabajo no solo se enfocó en el mobiliario, sino también abarcó otras áreas como “la carpintería de armar” y “la carpintería de lo blanco”.

Aunque “la carpintería de armar”, tiene sus orígenes en el siglo XIII con las armaduras nazaries y mudéjares, resurgió después de la segunda guerra mundial y con la evolución de técnicas constructivas, trajo consigo la tecnología de la madera laminada, que actualmente constituye un avance innovador recurrente en los sistemas industrializados de madera.

Conclusión

En los últimos años se ha identificado que falta una documentación real sobre la fábrica y estereotomía de varias estructuras históricas, así como de sus procesos constructivos, es decir que predominan publicaciones que contienen registros generales más descriptivos que analíticos, desde el punto de vista técnico. En esta ocasión dicho artículo se ha enfocado a una construcción primorosa del siglo XVIII, donde se aplicó la elipse como elemento compositivo y era necesario demostrar cómo fue implementada, ya que antes de dicha obra, los arquitectos solían construir óvalos mediante sectores tangentes de circunferencia y escaleras de caracol con hélices circulares.

Este modelo físico constituye un logro extraordinariamente eficaz para representar resultados analíticos, asimismo permite inducirle carga de manera experimental y concluir que las escaleras constituyen un auténtico sistema estructural resistente por forma. En su elaboración participaron varios alumnos de la Licenciatura en Arquitectura, que descubrieron la importancia de entender a las estructuras para poder valorarlas. Característica que falta fortalecer en los nuevos cuadros de profesionales para restaurar construcciones de madera, ya que en la actualidad cuando ocurren mecanismos de falla, el proyecto de restauración suele ser de sustitución.

Es importante señalar que la disposición de cada componente constructivo expresa un correcto fundamento estructural. Aunque la escalera se afloje, sigue trabajando porque es flexible. Es decir, el sistema es en términos estructurales hiperestático, porque su flexibilidad le permite desarrollar varias trayectorias para que fluyan las cargas capaces de garantizar la estabilidad del conjunto.

Como se señaló en la primera parte del presente artículo, se trata de una curiosidad estructural, con un alto grado de complejidad que cuando se intenta descifrar por primera vez resulta enigmática, porque aparece una serie de hipótesis que exigen mayor información de la que podemos visualizar. Sin embargo, se realizó un esfuerzo para representar el cálculo analítico, con la finalidad de demostrar el potencial de la madera y motivar a expresar con dicho material las formas de la arquitectura actual.

En los últimos años los arquitectos ganadores del premio Pritzker, como Shigero Ban (2014), Frei Otto (2015) y Alejandro Aravena (2016), han sido pioneros en la construcción con materiales renovables, siendo la madera la más utilizada. Actualmente es de vital importancia la conservación del medio ambiente, por lo que construir con madera parece una opción muy razonable, sobre todo porque en realidad es un arte que ha permanecido a través del tiempo, pero que desafortunadamente se ha perdido gran parte de su valoración.

Referencias.

Baéz Macías, Eduardo 1969. Paleógrafo de "Obras de Fray Andrés de San Miguel".
Edit. Instituto de Investigaciones Estéticas de la UNAM.

García del Valle y Villagrán, Gabriel. 1993. "Introducción al estudio de la Edificación".
Edit. Facultad de Arquitectura, UNAM.

Creixell del Moral, José. 1992. "Estabilidad en las construcciones". Edit. Reverte,
Ediciones S.A.

Peschard, Eugenio. (1992). "Resistencia de materiales". Edit. Facultad de Arquitectura. UNAM.

Robles Fernández, Francisco y Echenique, Ramón. 1991. "Estructuras de madera".
Edit. Limusa.

Sans Molina, Sara Elizabet. 2002. "Tres fortificaciones en la Nueva España: estudio
arquitectónico constructivo (Tesis de doctorado), Barcelona. Universidad
Politécnica de Catalunya.

