

TRAZO DE LAS BÓVEDAS DE NERVADURAS MEXICANAS DEL SIGLO XVI

NATALIA GARCÍA GÓMEZ

Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Facultad de Arquitectura. México
Programa para el Mejoramiento del Profesorado (Promep)

García Gómez, N. (2012). Trazo de las bóvedas de nervaduras mexicanas del siglo XVI. *Revista de Arquitectura*, 14, 106-115.

Arquitecta, Universidad Veracruzana, Xalapa, Veracruz, México. Maestra en Ingeniería de Estructuras, Universidad Veracruzana, Veracruz, México.

Doctora en Ingeniería de Estructuras, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), México, D. F.

Candidato en el Sistema Nacional de Investigadores del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt), periodo 2011-2013.

Publicaciones: On Structural bases for building the Mexican convent churches from the sixteenth century. *International Journal of Architectural Heritage*, 3: 24-51 (2009) ISSN: 1558-3058.

natgargz@gmail.com

RESUMEN

En este trabajo se estudiaron los templos conventuales mexicanos construidos en el siglo XVI, techados totalmente con bóvedas de nervaduras. El objetivo consistió en identificar sus características geométricas y el origen del trazo de los elementos estructurales que conforman estos templos. Para ello se eligieron cuatro iglesias conventuales en función de la relevancia de sus características geométricas y constructivas para su comportamiento estructural, y por su periodo de construcción. A partir de tratados de construcción de la época se identificó la geometría y el trazo de las bóvedas y algunos aspectos básicos del dimensionamiento de sus contrafuertes. Esto ha servido a fin de establecer una base para el estudio de los lineamientos seguidos por sus constructores en la búsqueda de garantizar la estabilidad de estas edificaciones, así como para estudios posteriores de su comportamiento estructural.

PALABRAS CLAVE: arquitectura religiosa, bóvedas de crucería, conventos mexicanos, templos conventuales, tratados de construcción.

TRACING OF RIBBED VAULTS OF THE 16TH CENTURY IN MEXICO

ABSTRACT

In this paper were studied the Mexican conventual temples built in the XVI century, roofed totally with ribbed vaults. The objective consisted on identifying its geometric characteristics and the origin of the line of the structural elements that conforms these temples. For this were chosen four conventual churches in function of the relevance of their geometric and constructive characteristics for their structural behavior, and for their period of construction. Starting from treaties of construction of the time it was identified the geometry and the line of the vaults and some basic aspects of the dimensioning of their buttresses. This has served in order to establish a base for the study of the limits continued by their manufacturers in the search of guaranteeing the stability of these constructions, as well as it stops later studies of their structural behavior.

KEY WORDS: Religious architecture, ribbed vaults, Mexican convents, monastic churches, architectural treatises.

Recibido: julio 21/2012

Evaluado: agosto 24/2012

Aceptado: septiembre 10/2012

Tecnología, medioambiente y sostenibilidad

Technology, environment and sustainability

INTRODUCCIÓN

Este escrito forma parte del proyecto de investigación financiado por el Programa para el Mejoramiento del Profesorado (Promep) de la Secretaría de Educación Pública (SEP), en la convocatoria 2010, con el título "Comportamiento estructural de los edificios coloniales abovedados en México". El trabajo fue desarrollado en la Facultad de Arquitectura de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos y tiene su antecedente en la línea de investigación de la autora, dirigida al estudio de la concepción de la estructura de los templos conventuales mexicanos del siglo XVI, a partir del análisis de las reglas contenidas en antiguos tratados de construcción y su relevancia en el comportamiento estructural de estos edificios (García y Meli, 2009).

La abundante obra de edificación realizada en México durante el siglo XVI por las órdenes mendicantes franciscana, dominica y agustina, ayudadas por la cuantiosa mano de obra indígena, calificada para emprender grandes obras de mampostería, es ahora para nosotros una muestra relevante de la práctica constructiva de esa época, y su estudio nos permite conocer con mayor profundidad las bases de su diseño. Los sistemas constructivos empleados en estos edificios fueron variados según las posibilidades del lugar, de las condiciones generales a las que debieron adaptarse los constructores europeos, y de las enseñanzas que recibieron de la práctica constructiva prehispánica. Los grandes conjuntos conventuales típicos, logrados por las tres órdenes mendicantes que llegaron a México, están conformados por el convento y el templo, que usualmente están en un atrio o espacio abierto de planta rectangular de grandes dimensiones, delimitado por una barda, en el que puede haber una capilla abierta al lado del templo y capillas posas en sus esquinas.

De los elementos arriba descritos, que conforman los conjuntos conventuales, en este trabajo son de interés los templos, cuyas características han sido definidas por Kubler (1983, p. 241), quien señala que el prototipo fue el de nave única sin crucero o nave rasa, de gruesos muros de mampostería y contrafuertes de gran volumen que soportan una bóveda de cañón corrido. Aunque este tipo de cubierta fue la más común, también se construyeron iglesias techadas totalmente con bóvedas de nervaduras, que si bien se edificaron en mucho menor número que las de cañón corrido, constituyen un sistema de cubierta relevante que ha sido poco estudiado y es motivo del presente trabajo. El propósito principal está dirigido al conocimiento del trazo de bóvedas de nervaduras, así como de las características y el origen del dimensionamiento de sus contrafuertes; el objetivo es indagar en el origen de su diseño y sentar las bases para la mejor comprensión de su trabajo estructural. Se partió de la revisión de tratados de construcción españoles y del estudio de su posible aplicación en las edificaciones religiosas mexicanas, con lo que fue posible identificar

la geometría de las bóvedas nervadas y sus contrafuertes, y sentar las bases de su diseño conforme a las reglas propuestas en antiguos manuscritos de construcción.

METODOLOGÍA

Para lograr el objetivo planteado en este trabajo se recurrió primero a una revisión de los antecedentes de las bóvedas de nervaduras en los países donde se originó este sistema de cubierta. Se estudiaron los aspectos más relevantes de su tradición constructiva, particularmente en España; de esta manera fue posible identificar diversos lineamientos para su trazo y edificación en tratados de construcción. Estos procedimientos fueron ensayados en algunos templos conventuales mexicanos cuyas características son representativas desde el punto de vista geométrico y por su posible influencia en el comportamiento de su estructura. Se hizo una revisión general de los templos mexicanos cubiertos totalmente con bóvedas nervadas que permanecen hasta nuestros días, y para el estudio detallado del trazo de las bóvedas se eligieron las iglesias conventuales ubicadas en Cholula, Tula, Acatzingo y Oaxtepec, de las que se contó con un levantamiento previo realizado por una empresa, mediante un equipo de escáner láser (figura 5). Estos templos se eligieron conforme a sus características geométricas y estructurales, así como al periodo de su construcción. Los modelos se trabajaron en ambiente CAD para facilitar el estudio de cada nervadura y de la plementería. La geometría real de las bóvedas se comparó con la de los procedimientos descritos por dos tratadistas españoles que han sido estudiados por diversos autores contemporáneos de ese país. Primero se identificó el método usado para trazar los terceletes en planta y, posteriormente, para trazar la monteña, se "volteó" cada una de las nervaduras a partir de la planta de la bóveda. Para estudiar los contrafuertes que sustentan estas cubiertas se aplicaron las reglas de tres tratadistas de la época y se compararon con las dimensiones reales de estos elementos, con el propósito de identificar los procedimientos que sus constructores siguieron para determinar sus dimensiones.

RESULTADOS

ANTECEDENTES DE LAS BÓVEDAS DE NERVADURAS

El precedente más remoto de las bóvedas de nervaduras o de crucería son las bóvedas de arista romanas generadas por la intersección de dos cañones corridos de la misma altura; su ventaja respecto de sus antecesoras de cañón corrido es que al concentrar su peso hacia puntos específicos solo necesitan apoyos en sus cuatro esquinas (figura 1). Para salvar las dificultades constructivas en las aristas la edificación medieval las cubrió con arcos conocidos como cruceros (Rabasa, 2000, p. 51). Las bóvedas de arista más antiguas tenían arcos frontales semicirculares, con arcos cruceros semielípticos (Esselborn, 1952, p. 183);

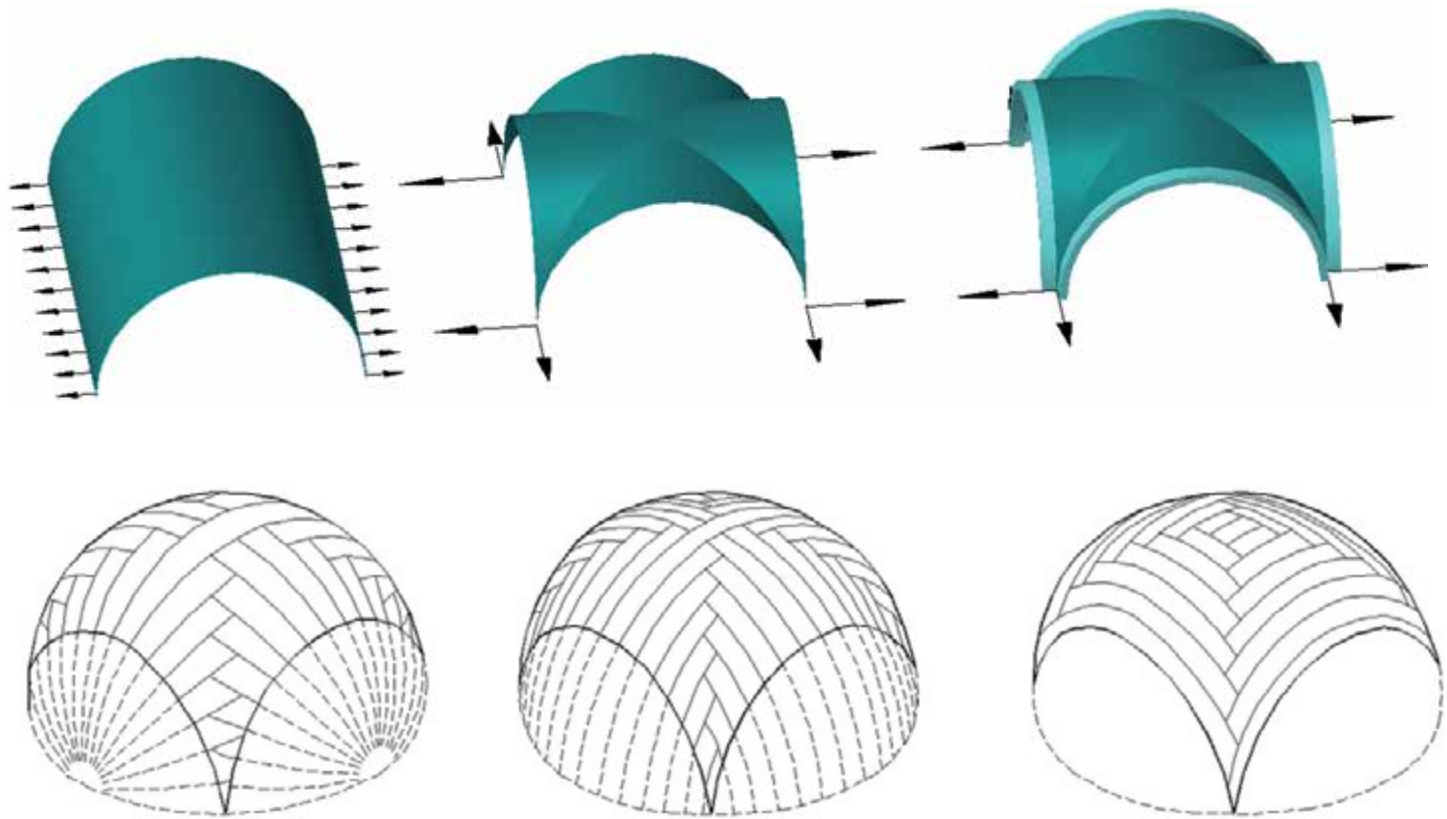


Figura 1. Distribución del empuje de bóvedas de cañón corrido y bóvedas de arista con y sin arcos
Ilustración: N. García.

Figura 2. Disposición de las hiladas de mampostería en bóvedas abombadas
Fuente: Fitchen (1981).

un avance constructivo y estructural de gran relevancia se dio cuando estos arcos se construyeron de medio punto, ya que generan menor empuje que los elípticos y la curvatura de cada dovela no cambia. Rabasa (2000, pp. 51, 54) comenta estos aspectos y señala que el cambio de aristas elípticas a semicirculares marca el inicio de la construcción de bóvedas de nervaduras.

La adopción del semicírculo en los arcos cruceros propició la aparición de cubiertas muy parecidas a las bóvedas vaídas, que en realidad tenían formas abombadas (figura 2) porque su origen fue el de una bóveda de arista y las hiladas no se adaptaban totalmente a una esfera (Fitchen, 1981, p. 59). La aparición de este sistema de cubierta permitió el desarrollo de una gran variedad de formas geométricas en la plementería, que fue ampliamente desarrollada en la España de los siglos XIII al XVI. Fueron muy populares en ese periodo las bóvedas *cuatripartitas* o de crucería simple, que dividen los ténpanos de la bóveda en cuatro partes; Viollet-le-Duc (1996, pp. 105-108) las clasifica según su plementería en bóvedas de estilo francés, aquitano, normando y angevino. Lampérez (1930, p. 470) agregó a esta clasificación la bóveda *aquitano-española* en la que, a diferencia de las últimas tres, su casquete no tiene una superficie continua en forma de cúpula, sino que los plementos tienen diferente curvatura entre cada par de nervios.

Cuando se construyeron nervaduras adicionales a los arcos perimetrales y cruceros —conocidos como *terceletes*, *ligaduras* y *combados*—¹, se inició la construcción de las bóvedas de crucería

estrelladas en Europa. Aunque la más común en España fue la de terceletes con cinco claves (figura 3), también se realizaron numerosas con diseños complicados (Lampérez, 1930, p. 477) consistentes en entramados o mallas que, de acuerdo con Rabasa (2000, p. 70), sirvieron de guía y control de la geometría y no de cimbra, como se ha argumentado por otros autores. En el siglo XVI se construyeron en España formas acupuladas, prácticamente sin aristas y con nervaduras que Navarro (2006, p. 76) describe como nervios sin funcionamiento estructural.

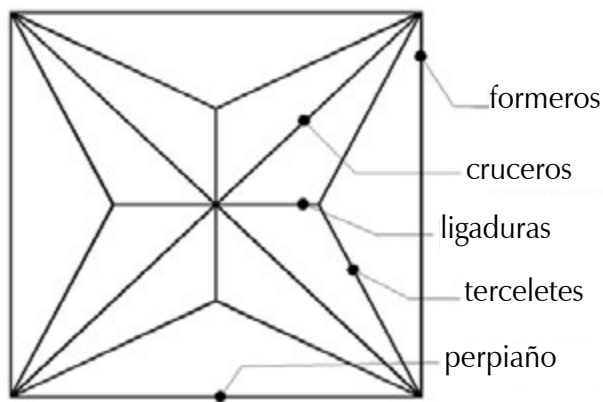
Las bóvedas estrelladas españolas surgieron básicamente de dos escuelas: la *toledana* y la *burgalesa* (Palacios, 2003, p. 1548). La primera caracterizada por diseños rectilíneos, y la segunda, por el uso de nervios secundarios curvos o *combados*. Las geometrías logradas en esas escuelas fueron variadas y han sido clasificadas por Palacios (pp. 1552-56) según la geometría de su rampante² en plano, redondo, esférico, abombado y convexo, además de las bóvedas rebajadas apoyadas en arcos escarzos o carpanel, que usualmente se encuentran en el sotocoro de las iglesias. Estas bóvedas de nervaduras estrelladas españolas, constituyen “la versión renacentista de las bóvedas europeas de crucería del gótico clásico francés” (Kubler, 1983, p. 272), y son semejantes a las que se construyeron en México durante el siglo XVI.

ASPECTOS BÁSICOS DEL DISEÑO DE LAS BÓVEDAS DE NERVADURAS ESPAÑOLAS Y SUS CONTRAFUERTES

El tratado español de Rodrigo Gil de Hontañón (1951), escrito entre 1544 y 1554, del que

¹ Las ligaduras son nervios secundarios de una bóveda nervada, cuando estos son curvos se llaman combados.

² El rampante es la línea o nervadura central que une longitudinalmente las claves de cada tramo.



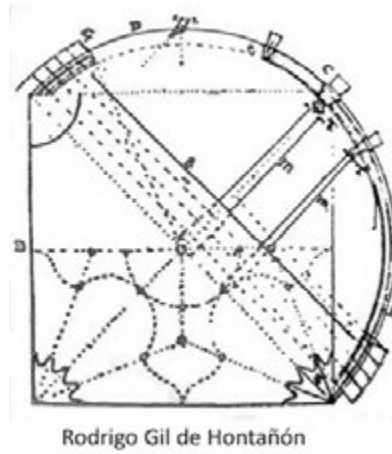
tenemos referencia gracias a la transcripción de Simón García (1991) realizada en 1681, pues el original no se logró conservar; así como el tratado de Hernán Ruíz (Navascués, 1974), redactado entre los años 1558-1560; y los manuscritos de Alonso de Vandelvira (ca. 1591) y del padre Tomás Vicente Tosca (1727), describen métodos para el trazado de bóvedas nervadas (figura 4) mediante la elaboración de monteas³. El primero de ellos indica la secuencia constructiva y los otros describen procedimientos para definir la geometría de cada nervio. Estos métodos conocidos como *trazo de rampante fijo*, han sido estudiados ampliamente por Navarro (2006), Palacios (2003, 2007) y Rabasa (2000).

En particular, el trazo de los terceletes en planta solía generarse a partir de tres métodos: uso de redes, uso de alineaciones y puntos de encuentro de trazos geométricos (Palacios, 2003, pp. 1548-50). De los más comunes en España fue el último de ellos, que consiste en ubicar los terceletes a partir de un círculo circunscrito a la planta de la bóveda y su intersección con los ejes ortogonales.

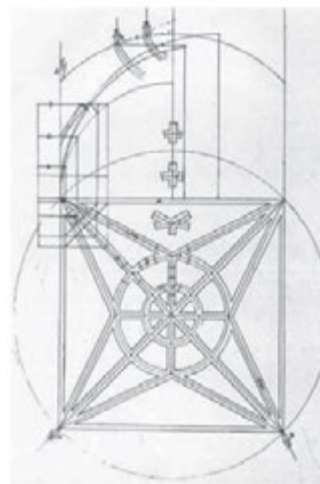
Rodrigo Gil de Hontañón (1951) desarrolló reglas para establecer las dimensiones de las nervaduras y sus claves, así como de los contrafuertes que soportan bóvedas nervadas. Estableció la jerarquía de cada nervadura conforme a la carga que soportan y propuso el peralte necesario para cada una de ellas. Para determinar las dimensiones de los contrafuertes propuso una regla para bóvedas de nervaduras de iglesias-salón⁴; Sanabria (2003, p. 1797) y Huerta (2004, p. 214) describen esta regla mediante la fórmula que aparece en la tabla 1.

³ La montea es el esquema geométrico que relaciona la planta de la bóveda con la elevación de cada nervio.

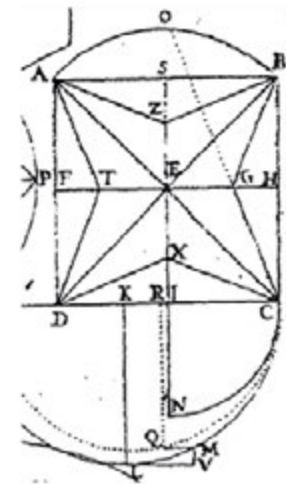
⁴ Iglesia salón: iglesia de disposición basilical, de más de tres naves de la misma altura.



Rodrigo Gil de Hontañón



Alonso de Vandelvira



Padre Tosca

TEMPLOS CONVENTUALES MEXICANOS DEL SIGLO XVI CON BÓVEDAS DE NERVATURAS

Kubler (1983, pp. 271-275) identificó las características más relevantes de las bóvedas de nervaduras mexicanas construidas en el siglo XVI (tabla 2), compuestas por conglomerados de mampostería de grandes espesores, parecidas a las edificadas por Rodrigo Gil de Hontañón en España. Los primeros maestros constructores de estas bóvedas en México fueron fray Juan de Alameda y Claudio de Arciniega (Martínez, 1988, p. 89). Al primero de ellos se le atribuyen las bóvedas de los templos de Huejotzingo, Cholula y Tula, entre otros. Existe la posibilidad de la participación de Claudio de Arciniega en algunos trabajos de construcción en los templos con bóvedas nervadas de Acolman, Metztlitlán y Actopan (Cuesta, 2000, p. 87) y de Francisco Becerra en las bóvedas de nervaduras del presbiterio de Cuauhtinchan y Totimehuacan. Fernández (2007, p. 100) considera que Becerra optó por este tipo de cubiertas, tanto en su país de origen como en el continente americano, más por una concepción estructural que de ornamento.

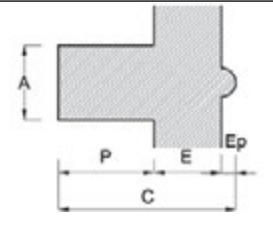
La construcción de templos cubiertos totalmente con este tipo de bóvedas se inició después de la primera mitad del siglo XVI (Kubler, 1983, pp. 269, 270). Hoy en día existen quince templos con estas características, de los que solo uno tiene bóveda de casetones en el presbiterio. En la mayoría, el coro está soportado también por una bóveda de nervaduras plana apoyada sobre arcos escarzanos

Figura 3. Nervaduras de una bóveda estrellada. Imagen: N. García.

Figura 4. Trazo en planta y montea de bóvedas nervadas de tres tratadistas españoles. Fuente: Gil de Hontañón (1951), Vandelvira (ca. 1591) y Tosca (1727).

► Tabla 1.

Regla de Rodrigo Gil de Hontañón para contrafuertes que soportan bóvedas de nervaduras
Fuente: Sanabria (2003, p. 1797); Huerta (2004, p. 214).

C	Profundidad total del contrafuerte	$C = P + E + Ep = \frac{2}{3} \sqrt{T + \frac{2}{3} \Sigma Ln}$	
P	Profundidad del contrafuerte		
E	Espesor del muro	$A = \frac{1}{3} \sqrt{T + \frac{2}{3} \Sigma Ln}$	
Ep	Espesor de la pilastra		
Ln	Longitud de una nervadura de la imposta a la clave		
T	Altura del contrafuerte al arranque de la bóveda		
A	Ancho del contrafuerte		

► Tabla 2.

Características de las bóvedas de nervaduras mexicanas

Fuente: Kubler (1983, pp. 271-275).

CARACTERÍSTICAS DE LAS BÓVEDAS DE NERVADURAS MEXICANAS	
•	Suelen cubrir espacios de planta cuadrada.
•	Arcos perimetrales casi semicirculares y ligeramente apuntados.
•	Arcos perpiños apoyados en los riñones y clave a menor altura que los arcos cruceros.
•	Conglomerado de mampostería de gran espesor apoyada en muros y contrafuertes voluminosos.
•	Las primeras bóvedas en México tuvieron pendientes muy pronunciadas y posteriormente fueron de aspecto cupuliforme.

► Tabla 3.

Templos mexicanos del siglo XVI cubiertos totalmente con bóvedas de nervaduras

Fuente: datos obtenidos en el sitio, excepto los señalados con los siguientes superíndices: ^k Kubler (1983, pp. 279, 300); * Planos del archivo de la Coordinación Nacional de Monumentos Históricos.

Periodo construcción	Ubicación	Longitud	Ancho	Altura	Longitud/Ancho	Altura/Claro	Profundidad contrafuerte	Espesor de muro
TEMPLOS FRANCISCANOS								
1545-1555	Cholula	53,00	12,00	20,50	4,4	1,7	3,03	1,73
	Tula	49,50	12,00	20,30	4,1	1,7	2,87	1,78
1555-1560	Tecamachalco	---	---	---	---	---	---	---
	Acatzingo	53,00	12,20	21,15	4,3	1,7	2,45	1,75
	Puebla (Sn Fco.)	60,00 ^k	13,20 ^k	---	4,5	---	2,50*	1,60*
	Huejotzingo	57,45*	13,06	22,30	4,4	1,7	3,03 ^k	2,00 ^k
Después de 1560	Huaquechula	46,30 ^k	11,40 ^k	19,12 ^k	4,0	1,7	2,80*	1,60*
	Tochimilco	48,30	11,98	20,98	4,5	1,8	2,70	1,90
	Zempoala	50,50 ^k	12,50*	21,40*	4,0	1,7	2,35*	1,50*
	Atlixco	43,20 ^k	11,00 ^k	17,90	3,9	1,6	---	---
	Tepeaca	53,60 ^k	12,80 ^k	21,70*	4,2	1,7	1,80*	---
TEMPLOS DOMINICOS								
Después 1550	12. Coixtlahuaca	---	12,50*	---	---	---	---	---
Después 1561	13. Oaxtepec	53,46	11,26	15,80	4,8	1,4	1,70	1,90
ca. 1558	14. Tlaxiaco	50,40*	11,75*	---	4,1	---	1,20*	1,70*
Después 1550	15. Yanhuatlán	59,20*	14,20*	26,00*	4,2	1,8	2,00*	1,60*

o de tipo carpanel. Más de la mitad de estos templos perteneció a la orden franciscana y fueron construidos en el estado de Puebla; los restantes fueron dominicos, tres de ellos en Oaxaca y uno en Morelos. Los agustinos también emplearon este tipo de bóveda pero solo para cubrir el presbiterio de sus templos, una sección de la nave o el sotocoro; las usaron también para techar los pasillos de algunos claustros de sus conventos, en mayor número que los franciscanos y dominicos. Asimismo, podemos encontrar estas bóvedas en algunas capillas abiertas y capillas posas.

Las iglesias enumeradas en la tabla 3 son de nave única y la proporción de su longitud en planta respecto del claro de la nave está entre 4 y 4,5. Solo el templo de Oaxtepec, que cuenta con "corillos"⁵ (Artigas, 2011, p. 347), tiene relación longitud-claro de poco más de 5, proporción recomendada por Rodrigo Gil de Hontañón para iglesias con crucero (Gil de Hontañón, 1951, p. 13). La tabla 3 muestra los edificios

franciscanos ordenados según la etapa de construcción que propone Kubler (1983, p. 275); se observa que la proporción altura-claro de la nave es cercana a 1,7 en la mayoría de estos templos, independientemente del periodo de construcción. Esto no sucede en las iglesias dominicas, entre las que se encuentran las de mayor y menor esbeltez de todos los templos techados totalmente con bóvedas nervadas.

TRAZO DE BÓVEDAS NERVADAS Y SUS CONTRAFUERTE EN MÉXICO

Para el estudio detallado del trazo de las bóvedas se eligieron las iglesias conventuales ubicadas en Cholula, Tula, Acatzingo y Oaxtepec (figura 5), de las que se contó con un levantamiento previo realizado por una empresa mediante equipo escáner láser. Los tres primeros templos pertenecieron a la orden franciscana; dos ubicados en el estado de Puebla y uno en Hidalgo. El último perteneció a la orden dominica y se encuentra en el estado de Morelos. Dos de ellos se construyeron en el periodo de 1545 a 1555; el tercero de los templos

⁵ Los corillos son espacios adosados a uno central que servían de coros pequeños para cantores (Artigas, 2011, p. 347).



Cholula



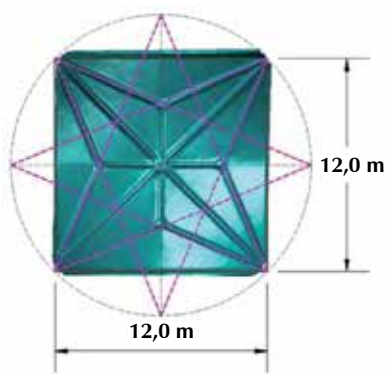
Tula



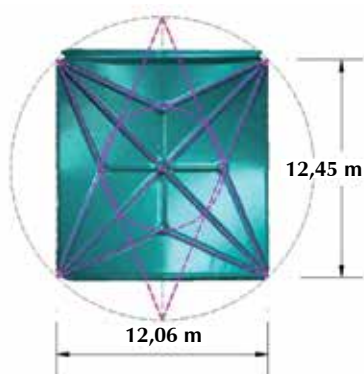
Acatzingo



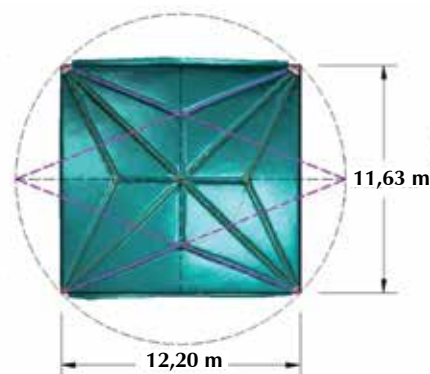
Oaxtepec



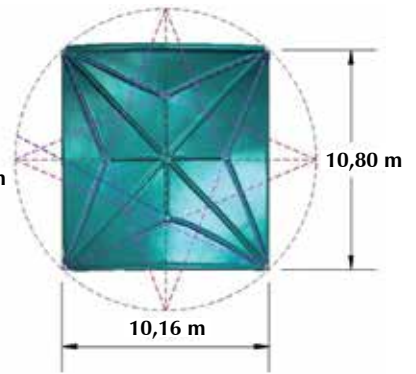
Cholula



Tula



Acatzingo



Oaxtepec

corresponde al periodo de 1555 a 1560, y el último es posterior a 1560. Estas iglesias tienen diferencias geométricas en el contorno de su extradós, en la geometría de sus rampantes y en su plementería. Se comparó su geometría con la obtenida mediante las reglas de los tratados de Alonso de Vandelvira (1575-1580) y el padre Tosca (1707-1715). Para el estudio de las dimensiones de los contrafuertes que soportan estas bóvedas se recurrió a los tratadistas españoles Rodrigo Gil de Hontañón (1951), Martínez de Aranda (ca. 1599) y Hernán Ruiz (Navascués, 1974). Si bien todos estos tratados no fueron conocidos por los constructores de estos templos, ya que llegaron al continente americano después del periodo que aquí se estudia, su contenido refiere a la práctica constructiva española de esa época y anterior⁶, muy probablemente conocida por los constructores de los edificios conventuales mexicanos.

TRAZO DE LOS TERCELETES EN PLANTA

La planta de cada crujía de los cuatro templos estudiados es ligeramente rectangular. El estudio de los terceletes consistió en dibujar en cada planta los métodos propuestos por los tratadistas. En la figura 6 es claro el uso del método de “encuentro

6 Huerta (2004, p. 141) señala que algunas reglas de los tratados surgidos en un periodo histórico pueden tener su origen en la tradición constructiva de siglos pasados y que no fueron dadas a conocer en su momento por la reserva que guardaban los antiguos constructores de sus conocimientos en edificación.

entre puntos” del tratado del padre Tosca en los templos de Cholula y Oaxtepec. Solo un tercelete de la parte inferior izquierda de Oaxtepec coincide con el procedimiento dado por Vandelvira, al parecer más por imperfecciones en la mano de obra y no por cambio de diseño. El estudio de los terceletes de la bóveda del templo de Cholula se hizo a partir de una planta cuadrada de doce metros de lado, solo para hacer coincidir los nervios cruceros en el centro de la planta, ya que en realidad la crujía es ligeramente rectangular. En los templos de Acatzingo y Tula solo cuatro de sus ocho terceletes siguen el trazo de “encuentro entre puntos”. Uno en sentido transversal a la nave y el otro solo en sentido longitudinal. El resto de sus terceletes se obtiene mediante un círculo con centro en la clave de los cruceros, y diámetro igual a la distancia que hay entre los terceletes trazados previamente (figura 6).

TRAZO DE LAS NERVADURAS EN ELEVACIÓN⁷

El rampante y el perfil transversal de tres de los cuatro bóvedas estudiadas coinciden con un semicírculo que tiene su centro en la intersección de los nervios cruceros en planta (figura 7). Aunque las ligaduras no siguen perfectamente esta curvatura, sí se adaptan a ella en lo general. Solo el templo de Oaxtepec tiene ligaduras prácticamente rectas que recuerdan la escuela *toledana*,

7 Elevación: trazo esquemático diferente a un alzado convencional (Rabasa, 2000, p. 121).

Figura 5.

Intradós de las bóvedas de las iglesias de Cholula, Tula, Acatzingo y Oaxtepec

Foto: N. García, 2011.

Figura 6.

Trazo de los terceletes en planta de los templos conventuales

Ilustración: N. García.

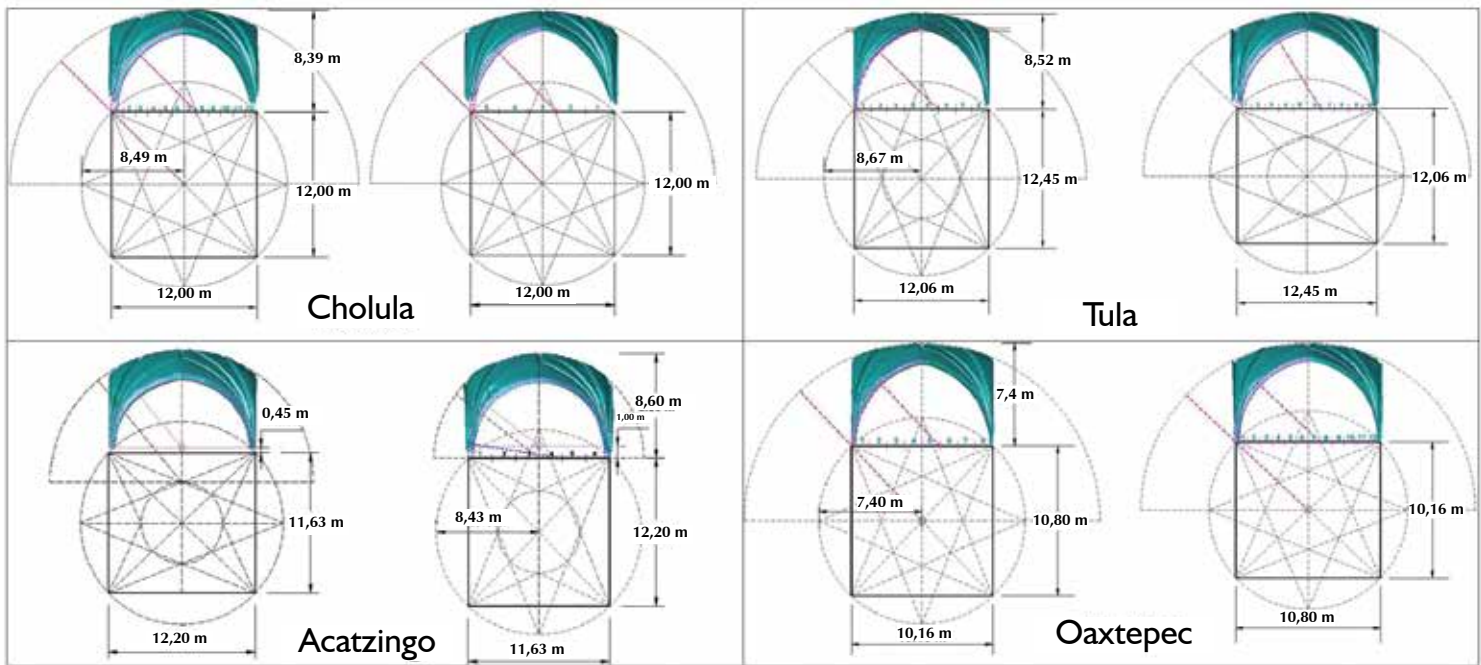


Figura 7.

Trazo de los nervios formeros, perpiaños y ligaduras

Ilustración: N. García.

Figura 8.

Extradós de las iglesias de nervaduras del siglo XVI en México

Fotos: N. García, 2011.



Cholula



Tula



Acatzingo



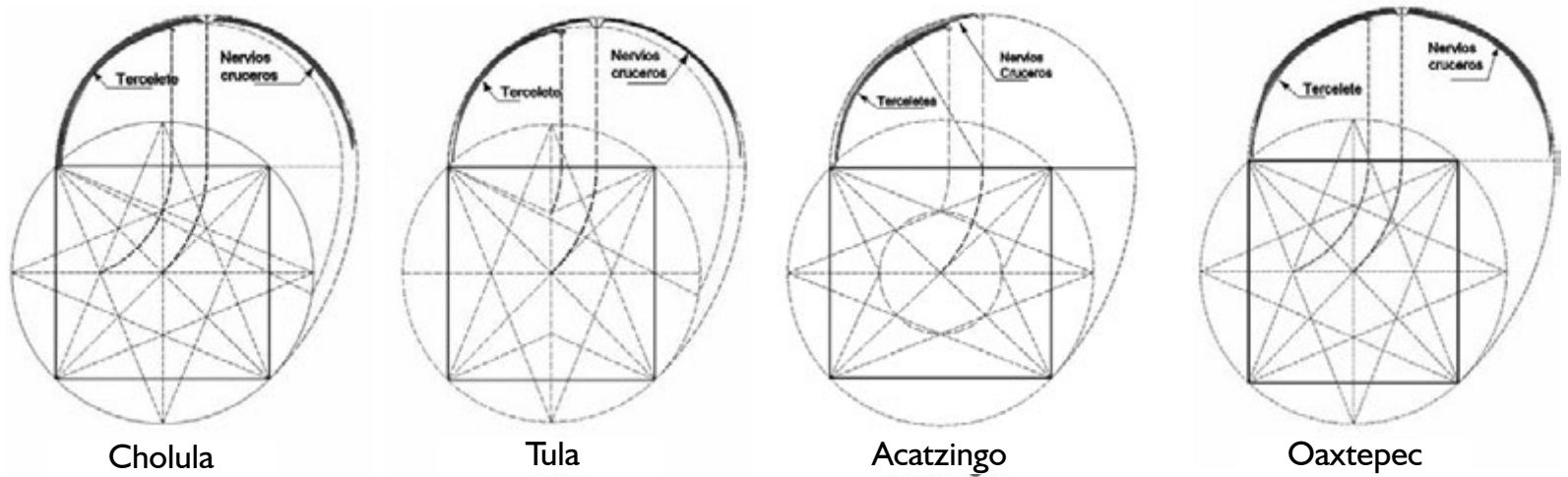
Oaxtepec

a diferencia de las primeras tres, que están más cerca de la escuela *burgalesa* por la presencia de *combados* o ligaduras curvas. En este último caso, la apariencia es más parecida a la de bóvedas *váidas*, particularmente las bóvedas de los templos de Acatzingo y Tula.

En la figura 7 se observa que los arcos perpiaños y formeros tienen la misma flecha en cada caso, solo en la iglesia de Tula la clave de sus arcos formeros está un poco más abajo que la de los perpiaños. Los arcos perimetrales de los cuatro templos son ligeramente apuntados, excepto los de la iglesia de Acatzingo, que tienen perfil semi-circular. En este caso se realizaron dos propuestas para el estudio del origen de su trazo; una de ellas consiste en iniciar los arcos por encima de la línea de arranque de los nervios y definir los arcos formeros mediante dos arcos tangentes semi-circulares⁸ (Bechmann, 1991, en Rabasa, 2000, pp. 61, 62). El perfil de los arcos perimetrales de los otros templos se logra dividiendo el claro en varios tramos iguales, a nivel de los arranques de los haces de nervaduras. El número de estas divisiones no coincide en todos los casos, porque tienen la misma flecha y el claro de los arcos perpiaños y formeros es diferente.

En la figura 9 se observa que el trazo de los nervios cruceros de los cuatro templos sigue el método del tratado del padre Tosca. Solo la bóveda de Acatzingo tiene arcos cruceros con ligero apuntamiento, y en la de Oaxtepec, un descenso leve en la clave. Por su parte, el trazo de los terceletes en los templos de Cholula y Tula coincide más con el método del tratado de Vandelvira. En cambio, los terceletes de la iglesia de Acatzingo están más cercanos a la curvatura de sus nervios cruceros y no siguen ninguno de los dos tratados. Lo mismo sucede en los de la iglesia de Oaxtepec, pero el radio de la curvatura de sus terceletes es menor que el de los cruceros.

⁸ Roland Bechmann ensayó gráficamente diversas proporciones para arcos apuntados de bóvedas cuatrimpartitas.



GEOMETRÍA DEL EXTRADÓS Y PLEMENTERÍA DE BÓVEDAS NERVADAS

Durante el siglo XVI se dieron diversas soluciones al perfil del extradós de las bóvedas de nervaduras (Kubler, 1983, p. 271). Algunas tienen techos casi planos, con los riñones totalmente cargados, en los que solo sobresale la cumbre de la bóveda, como en las bóvedas de Cholula y Tula; otras cuentan con extradós prácticamente libre de relleno que tiene geometría cupuliforme, como las bóvedas del templo de Acatzingo; en un tercer grupo se ubican las de perfil ondulado (figura 8), como las bóvedas de Oaxtepec, Tepeaca y Tochimilco, entre otras.

Desde el punto de vista estructural, la recomendación de “cargar los riñones” de las bóvedas, descrita en antiguos tratados de construcción, les da mayor estabilidad (Meli, 2011, p. 117) y fue práctica común. De los templos estudiados solo la bóveda de Acatzingo no tiene sus riñones cargados y el espesor de su cumbre, de 50 cm aproximadamente, es el menor de todos. La geometría de su plementería es la que más se acerca a la de una bóveda vaída. Esto puede observarse en la figura 10, donde se muestra un corte a la altura de la clave de los arcos perimetrales, paralelo a la planta de las cuatro bóvedas estudiadas aquí. Al igual que la bóveda del templo de Acatzingo, la de Tula se aproxima a la geometría de una bóveda vaída, pero se aleja en la zona de sus arcos perpiñones donde la plementería forma una especie de lunetos. Artigas (2011, p. 341) clasifica a este tipo de bóvedas como *renacentistas*, por sus características geométricas, en las que predomina la forma esférica. De hecho, la bóveda del coro del templo de Acatzingo, carente de nervaduras, nos indica que su geometría en forma de cúpula le proporciona estabilidad por sí sola. Por el contrario, siguiendo a este mismo autor, las bóvedas de los templos de Cholula y Oaxtepec estarían más cerca de la “filiación gótica” (p. 341), que consiste de nervaduras sobre las que se apoya la plementería. Esta característica se muestra más claramente en la bóveda del coro del templo de Oaxtepec, a diferencia del resto de las crujías en las que los cambios de curvatura son menos pronunciados (figura 11).

El recubrimiento de esta bóveda muestra un despiece de doble arista⁹, común en las bóvedas estrelladas españolas (Navarro, 2004, p. 186).

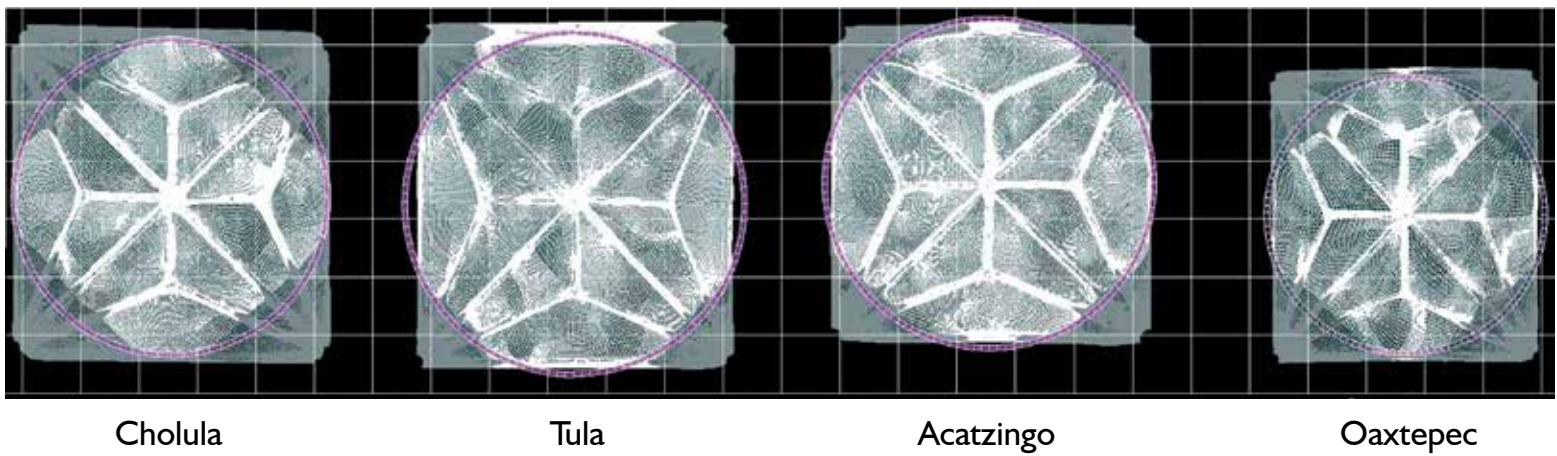
MUROS Y CONTRAFUERTES

En esta sección se estudian las características geométricas de los contrafuertes sobre los que se apoyan las bóvedas de nervaduras. Estos elementos están ubicados a todo lo largo de los muros laterales y su función consiste en contrarrestar el empuje generado por las bóvedas; de ahí su importancia para la estabilidad del edificio. Estos elementos estructurales son de grandes dimensiones, sobre todo en la fachada longitudinal opuesta al convento, debido a que la retícula de muros de este último contribuye a su estabilidad; sin embargo, en ocasiones el contrarresto en la zona superior del templo por encima de la altura del convento no fue bien resuelto, dando por resultado algunos agrietamientos en la bóveda (Meli, 2011, p. 118).

En este estudio se ha comparado la profundidad real de estos elementos de soporte ubicados en el muro longitudinal opuesto al convento, con la dimensión que resulta de aplicar la regla desarrollada por Rodrigo Gil de Hontañón (1951) (tabla 1) para contrafuertes de bóvedas de crucería en iglesias-salón. El canto total o profundidad del contrafuerte obtenido con esta fórmula incluye el espesor de la pilastra, que no tiene ninguno de los edificios estudiados aquí; por ello, en su lugar se tomó en cuenta el enjarje o repisón al que llegan los haces de nervaduras. En la tabla 4 se muestran los resultados obtenidos en los cuatro templos estudiados en este trabajo. Se observa que las dimensiones del contrafuerte de las iglesias de Acatzingo y Tula están muy cercanas a la regla de Hontañón; cabe mencionar que los contrafuertes de la iglesia de Tula tienen planta pentagonal y los de Acatzingo rectangular. Por su parte, las dimensiones de los contrafuertes del templo

Figura 9. Trazo de los nervios cruceros y terceletes. Ilustración: N. García.

⁹ El despiece por doble arista consiste en cubrir la bóveda con el método de arista simple entre los terceletes y los arcos perimetrales, y el espacio entre terceletes y ligaduras mediante una disposición romboidal, de manera que las hiladas son ortogonales a los arcos cruceros.



Cholula

Tula

Acatzingo

Oaxtepec

Figura 10.

Corte de las bóvedas nervadas a la altura de la clave de los arcos perimetrales

Ilustración: N. García.

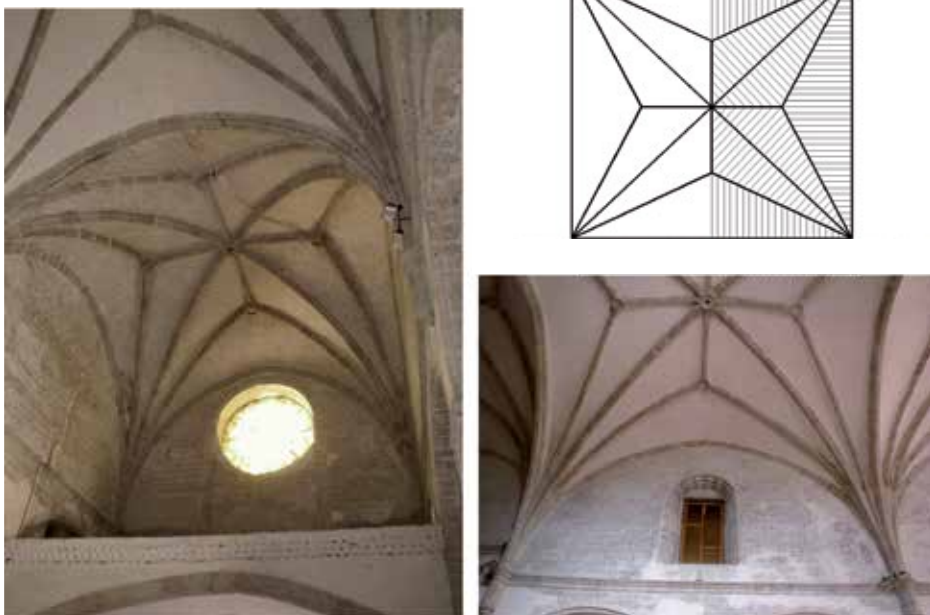


Figura 11.

Bóvedas del coro y de la nave del templo de Oaxtepec

Fotos N. García, 2011.

de Cholula son las más conservadoras, mayores que las obtenidas con la regla.

Solo los contrafuertes de la iglesia de Oaxtepec son de mucho menor proporción que los dados por la regla de Hontañón. Para su estudio se optó por revisar otras dos reglas geométricas de la época a fin de determinar el contrafuerte necesario para bóvedas de nervaduras (Huerta, 2004, pp. 141-151). Estas dos reglas estudiadas tienen su origen en el gótico; una corresponde al manuscrito de Martínez de Aranda (ca. 1599) y la otra al de Hernán Ruiz (Navascués, 1974), ambas del siglo XVI. La primera de ellas es conocida también como regla de Blondel (1675) y existe la posibilidad de su uso en naves de crucería en España, Francia y Alemania. Huerta (2004, p. 148) la aplicó en la catedral de Gerona y la Saint-Chapelle de París, logrando resultados coincidentes. Sin embargo, aclara que esto no significa que fuera usada, sino que demuestra el carácter gótico de esas iglesias. Algo semejante ocurre con la iglesia de Oaxtepec (figura 12), cuyos contrafuertes se alejan de las proporciones de los otros tres templos estudiados aquí, y están más cerca de estas dos reglas, sobre todo de la del tratadista Hernán Ruiz.

CONCLUSIONES

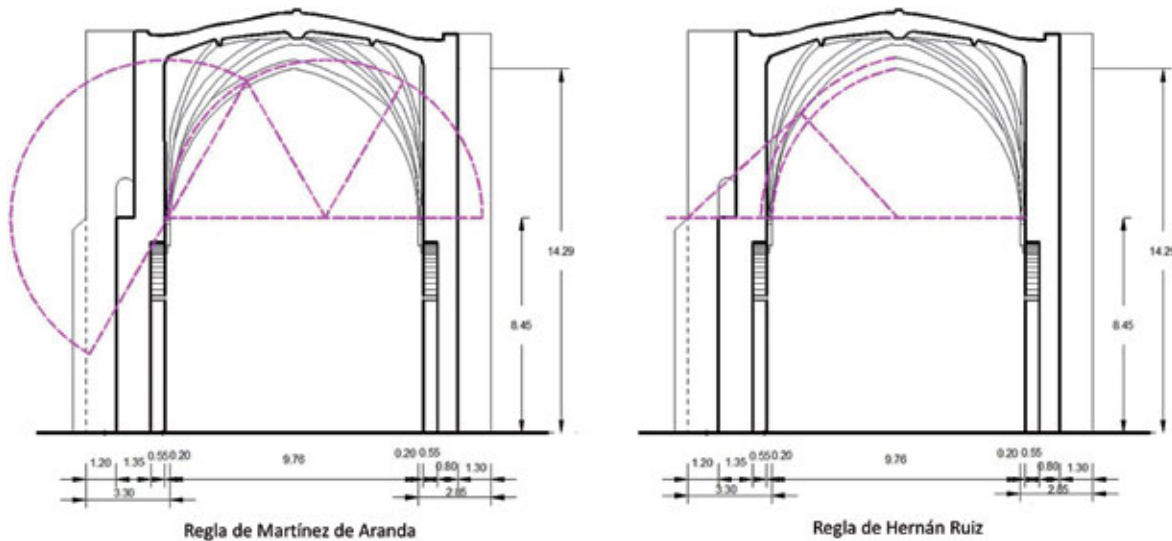
Las bóvedas de nervaduras estudiadas en este trabajo siguen el trazo propuesto en los tratados de Alonso de Vandelvira y el padre Tosca, aunque no literalmente. En algunas de estas bóvedas se toman en cuenta las reglas mencionadas para diseñar los terceletes, y en otras solo en la montea. El trazo en alzado de las bóvedas estudiadas tiene como base el semicírculo en los arcos cruceros y terceletes, con arcos perpiñanos y formeros ligeramente apuntados en su mayoría, excepto en aquella que tiende más a la geometría de una bóveda vaída. Si bien se observan diversos lineamientos de la práctica constructiva española, sus constructores tuvieron que adaptarse a condiciones diferentes a las de su país de origen. Los largos periodos de construcción, la variación en las condiciones demográficas, y la disponibilidad de los materiales y mano de obra, entre otros aspectos, pudieron contribuir a que se encuentren algunas diferencias relevantes en la geometría de las bóvedas de cada crujía en la nave de un mismo templo.

Por otra parte, los contrafuertes de mayores dimensiones se acercan a la regla de Rodrigo Gil de Hontañón. Dos de las bóvedas que soportan estos contrafuertes tienen características renacentistas por su aspecto esférico. Por otro lado, tenemos como muestra un templo cuyos contrafuertes son mucho más esbeltos y que están cercanos a la regla de origen gótico de Hernán Ruiz. Esto puede ser un indicativo de que al inicio del periodo virreinal en México se construyeron templos más conservadores en las dimensiones de los elementos estructurales que sustentan bóvedas de nervaduras, y en el último periodo del siglo XVI se optó por el ahorro de material con dimensionamientos menores en sus elementos de soporte.

➤ Tabla 4.
Reglas históricas aplicadas en los contrafuertes de templos conventuales mexicanos

Ubicación	TEMPLO CONVENCIONAL								REGLA	
	L	H	T	E	P	C	A	Ep	C	A
Acatzingo	12,20	21,15	12,48	2,15*	2,45	4,60	2,33	54,48	4,56	2,28
Cholula	12,00	20,00	11,30	1,73	3,03	4,76	3,03	53,24	4,55	2,27
Tula	12,06	20,00	11,50	1,78	2,87	4,65	2,35	55,43	4,61	2,30
Oaxtepec	10,16	15,70	8,45	1,90	1,70	3,60	1,72	47,58	4,19	2,10

* Incluye espesor de muro y repisón. L = Claro de la nave, H = Altura de la nave, T = Altura al arranque de las bóvedas, E = Espesor de muro, P = Profundidad del contrafuerte, Ep = Espesor de la pilastra, A = Ancho del contrafuerte, C = E+P+Ep.



Ⓐ Figura 12.
Reglas geométricas para determinar el contrafuerte de bóvedas nervadas en el templo de Oaxtepec
Imagen: N. García.

REFERENCIAS

Artigas, J. B. (2011). *México, Arquitectura del siglo XVI*. México, D. F.: Taurus.

Cuesta, L. J. (2000). Sobre el estilo arquitectónico de Claudio de Arciniega. *Anales del IIE, XXII*, (76), 61-68.

Esselborn, C. (1952). *Tratado general de construcción. Construcción de edificios*. Tomo I. (8 ed.). Buenos Aires: Gustavo Gili.

Fernández, Y. (2007). Líneas y modelos arquitectónicos en la obra americana de Francisco Becerra. En Navarro Antolín, F. *Orbis incognitus: avisos y legajos del Nuevo Mundo: homenaje al profesor Luis Navarro García* (vol. 2, pp. 93-101). Huelva: Universidad de Huelva.

Fitchen, J. (1981). *The construction of Gothic cathedrals: a study of medieval vault erection*. (2a ed.). Chicago: University of Chicago.

García, N. y Meli, R. (2009). On structural bases for building the Mexican convent churches from the sixteenth century. *International Journal of Architectural Heritage*, 3, 24-51, DOI: 10.1080/15583050701842344. URL: <http://dx.doi.org/10.1080/15583050701842344>.

García, S. (1991). *Compendio de arquitectura y simetría de los templos conforme a la medida del cuerpo humano, con algunas demostraciones de geometría, año 1681*. Valladolid: Colegio Oficial de Arquitectos de Valladolid.

Gil de Hontañón, R. (1951). *Rodrigo Gil de Hontañón. Selección y estudio de Manuel Pereda de la Reguera*. Santander: Librería Moderna.

Huerta, S. (2004). *Arcos, bóvedas y cúpulas. Geometría y equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica*. Madrid: Instituto Juan de Herrera y ETSA.

Kubler, G. (1983). *Arquitectura mexicana del siglo XVI*. (3ª ed.). México, D. F.: Fondo de Cultura Económica.

Lampérez, V. (1930). *Historia de la arquitectura cristiana española en la Edad Media*. Madrid: Espasa-Calpe.

Martínez, M. (1988). *Los conventos franciscanos poblanos y el número de oro*. (Disertación doctoral, Universidad Nacional Autónoma de México, 1987). Puebla, México: Gobierno del estado de Puebla, Centro Regional de Puebla y Fundación Fuad Abed Halabi.

Martínez de Aranda, X. (ca. 1599). *Zerramientos i trazas de monte*. Recuperado de <http://dicter.eusal.es/?obra=MartinezDeAranda>

Meli, R. (2011). *Los conventos mexicanos del siglo XVI. Construcción, ingeniería estructural y conservación*. México, D. F.: UNAM y Miguel Ángel Porrúa.

Navarro, J. C. (2004). *Bóvedas valencianas de crucería de los siglos XIV al XVI. Trazo y monte*. Tesis de Doctorado para obtener el título de Doctor en Historia del Arte, Facultad de Geografía e Historia, Universidad de Valencia, España.

Navarro, J. C. (2006). *Bóvedas de la arquitectura gótica valenciana*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.

Navascués, P. (1974). *El Libro de Arquitectura de Hernán Ruiz, el Joven*. Madrid: ETSAM. Recuperado de http://oa.upm.es/6641/1/Navascues_12.pdf

Palacios, J. C. (2003). Spanish ribbed vaults in the 15th and 16th centuries. En Huerta, S., De Herrera, J., SEDH, ETSAM, Benvenuto, A. E., COAM, Dragados, F. (eds.), *Proceedings of the First International Congress on Construction History* (pp. 1547-1558). Madrid.

Palacios, J. C. (2007). Juan de Álava: las bóvedas de crucería reticulares. En Arenillas, M., Segura, C., Bueno, F., Huerta, S. (eds.), *Actas del Quinto Congreso Nacional de Historia de la Construcción* (pp. 725-732). Madrid.

Rabasa, E. (2000). *Forma y construcción en piedra. De la cantería medieval a la estereotomía del siglo XIX*. Madrid: Ediciones Akal.

Sanabria, S. (2003). Rodrigo Gil de Hontañón's new arithmetical structural rules at the parish church in Villamor de los Escuderos. En Huerta, S., De Herrera, J., SEDH, ETSAM, Benvenuto, A. E., COAM, Dragados, F. (eds.), *Proceedings of the First International Congress on Construction History* (pp. 1795-1799). Madrid.

Tosca, T. V. (1727). *Tratado de la monte y cortes de cantería* (2ª ed.). Madrid, España: Antonio Marín. Recuperado de <http://www.udc.es/etsa/biblioteca/red/tratados2.htm>

Vandelvira, A. (ca. 1591). *Libro de traças de cortes de piedras*. Recuperado de <http://dicter.eusal.es/?obra=VandelviraAlonso>

Viollet-le-Duc, E. (1996). *La construcción medieval*. Madrid: Instituto Juan de Herrera.

