

# Estudio de las bases estructurales para la construcción de los templos conventuales mexicanos del siglo XVI

4 | **D**urante el siglo XVI las primeras tres órdenes mendicantes que llegaron a México —franciscanos, dominicos y agustinos— construyeron un gran número de conjuntos conventuales, los que fueron producto del trabajo conjunto de frailes e indígenas. Aquellos que permanecen hasta nuestros días son de gran utilidad para conocer la práctica constructiva de esa época. Estas construcciones han sido estudiadas principalmente desde el punto de vista histórico o arquitectónico, pero no es frecuente encontrar estudios acerca de su estructura. En este marco es de interés investigar las características estructurales de estas edificaciones y, en particular, el nivel de conocimientos de quienes las construyeron; esto puede contribuir a lograr soluciones adecuadas a los problemas estructurales que pueden presentarse en ellos. Como parte de los temas desarrollados en la tesis del primer autor de este artículo,<sup>1</sup> se presentan aquí algunos aspectos de interés acerca de las características estructurales de los templos conventuales y su relación con algunas reglas históricas contenidas en antiguos tratados de construcción, lo que permite un acercamiento con el nivel de conocimientos de ingeniería estructural que se tenía en esa época. En particular, se estudió la capacidad de los templos conventuales para resistir fuerzas gravitacionales, partiendo de la base de que estas edificaciones fueron concebidas para soportar su peso propio, puesto que sus constructores tenían poco conocimiento de las características geológicas del lugar y provenían de un país con baja sismicidad; después, y de manera especial en los estados del sur del país, fueron haciendo adaptaciones a sus diseños originales, obligados por la actividad sísmica del lugar.

\* Investigadora independiente.

\*\* Profesor emérito del Instituto de Ingeniería, UNAM.

<sup>1</sup> Natalia García Gómez, "Funcionamiento y seguridad estructural de los templos conventuales del siglo XVI en México", México, tesis doctoral, Instituto de Ingeniería-UNAM, 2007.

A partir de este estudio, se encontraron algunas relaciones entre las dimensiones de los elementos estructurales que integran la nave de los templos, las que sugieren el posible uso de patrones de proporción en su estructura. Del mismo modo, los resultados que dan la mayoría de las reglas históricas que se tratan aquí son muy cercanos a las dimensiones reales de los templos; en particular se estudió la profundidad de los contrafuertes de la nave. Los conventos agustinos y algunos franciscanos son los más apegados a dichas reglas, aunque no hay alguna en especial que se acerque de manera consistente a las dimensiones reales.

### Características de la estructura de los templos conventuales

Los conjuntos conventuales están conformados por el lugar de residencia de los frailes o convento, el templo, atrio, capilla abierta y capillas posas (figura 1). A pesar de la gran diversidad de condiciones en que fueron construidos y las variaciones constructivas que presentan, existe cierta homogeneidad en su conformación. Las órdenes necesitaban esquemas de trabajo semejantes para la conversión y evangelización de la población, y esto les llevó a requerir los mismos edificios.<sup>2</sup> La supervisión de las obras por parte de la Corona española también contribuyó al desarrollo de una tipología estructural específica de estas edificaciones. Interesan aquí, sobre todo, las características de los templos.

En el siglo XVI se construyeron, en particular, tres tipos de templos:<sup>3</sup> de una nave, criptocolaterales y de tres naves. La iglesia de una nave es la más representativa de los conjuntos conventuales

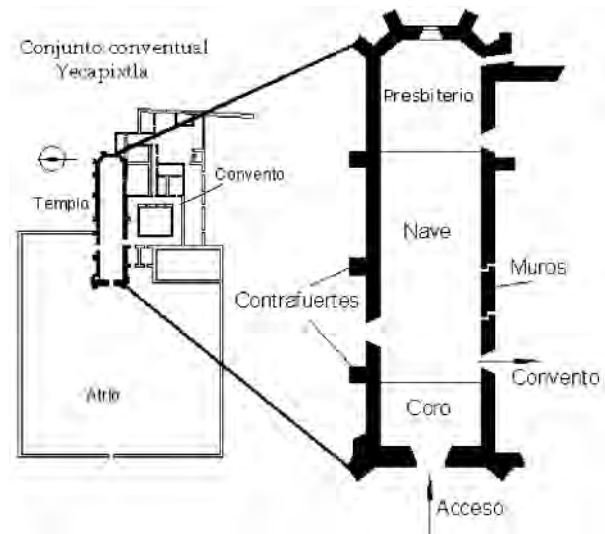


Figura 1. Planta típica de los templos conventuales.

que se realizaron en ese siglo; su planta es rectangular, alargada y de gran altura, estructurada a base de muros gruesos de mampostería, con cubierta abovedada y un sistema de contrafuertes para contrarrestar los empujes generados por el peso propio de la bóveda. Esta tipología tiene algunas variaciones estructurales dependiendo del tipo de bóveda y de la disposición de sus elementos.

Algunos templos tienen contrafuertes tipo botarel, pero los más comunes son los adosados a los muros. Las iglesias suelen tener contrafuertes en el presbiterio, en la fachada y a lo largo de la nave. El tipo de bóveda característico de los templos conventuales pertenecientes a esta época es el de cañón corrido, que consiste de una bóveda pesada de directriz semicircular, apoyada directamente sobre los muros. Otro tipo de bóveda, menos representativa de estos edificios, es la renacentista de lunetos, la cual descansa sobre muros y pilastras. Un tercer tipo de bóveda es la de nervaduras; algunos templos están techados totalmente con este tipo de bóvedas, pero otros sólo en el presbiterio y el coro. Es frecuente encontrar modificaciones en los templos a raíz de problemas estructurales o modas arquitectónicas; algu-

<sup>2</sup> Gloria Espinosa Spinola, *Arquitectura de la conversión y evangelización en la Nueva España durante el siglo XVI*, Almería, Universidad de Almería, 1988, pp. 72-73.

<sup>3</sup> George Kubler, *Arquitectura mexicana del siglo XVI*, México, FCE, 1993, pp. 241-243 y 335-336.

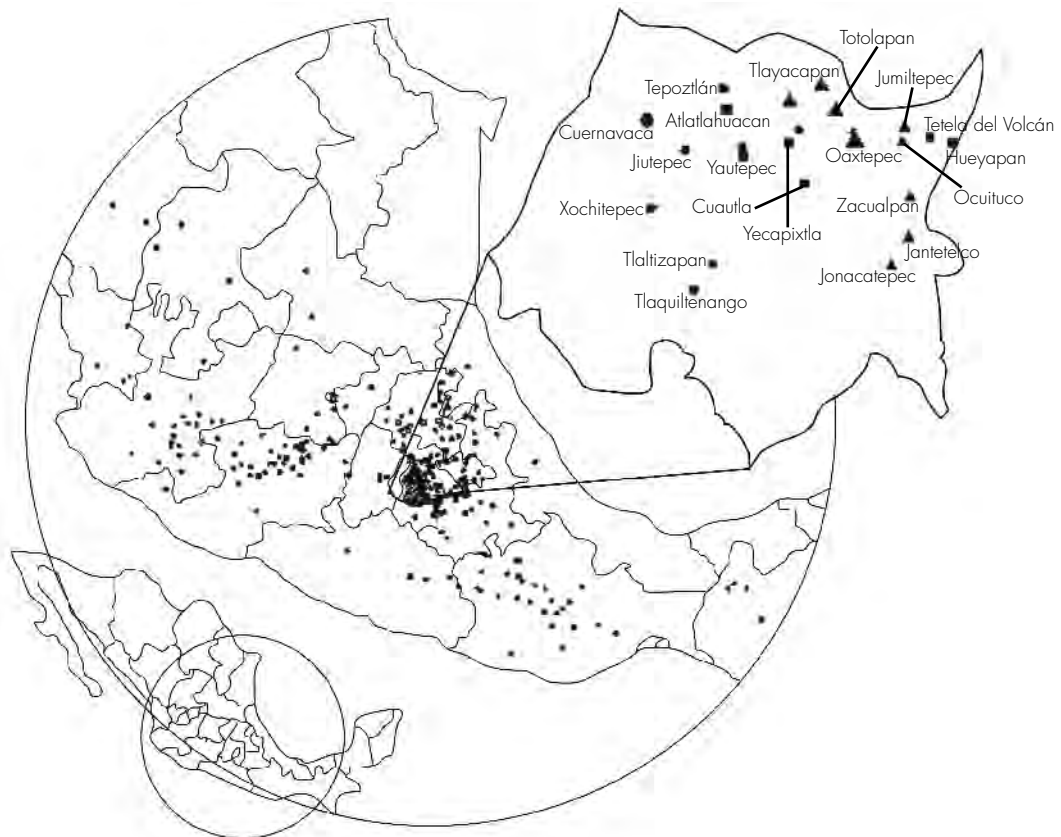


Figura 2. Zona de estudio sobre las construcciones conventuales. Tomado de George Kubler, *op. cit.*

nas de ellas son los cambios de cubierta, adición de arcos fajones en la bóveda, incremento de la sección de los contrafuertes o adición de nuevos contrafuertes y cúpulas.

### Templos estudiados y sus características geométricas

La figura 2 muestra la ubicación de los conjuntos conventuales edificados en México durante el siglo XVI por las tres órdenes mendicantes.<sup>4</sup> En este trabajo, se estudiaron los templos construidos en áreas y regiones que se encuentran dentro de los límites del estado de Morelos, el cual se fundó hasta el siglo XIX. Su cercanía con la capital del

país, su riqueza agrícola y el interés que Hernán Cortés tuvo por este lugar al financiar algunas obras de construcción, propiciaron que las tres órdenes mendicantes construyeran en esa zona diversos e importantes conjuntos conventuales durante el siglo XVI. Algunos de los primeros ejemplos de la arquitectura conventual en México fueron edificados en el actual estado morelense; entre ellos se encuentra el primer convento construido por los agustinos fuera de la capital de México, y el quinto, por los franciscanos.<sup>5</sup> Actualmente once de estos conventos han sido catalogados como Patrimonio Mundial por la UNESCO.

A partir de los datos recabados en fuentes documentales y de la visita a los edificios de la zo-

<sup>4</sup> *Idem.*

<sup>5</sup> Fray Gerónimo de Mendieta, *Historia eclesiástica indiana*, México, Conaculta, 1997, p. 401.



Figura 3. Tipos de bóvedas: a) Cañón corrido sin arcos, Catedral de Cuernavaca. b) Cañón con lunetos, Templo Santiago Apóstol, Jiutepec. c) Cañón de nervaduras, Templo Santo Domingo, Oaxtepec. Fuente: visita de campo (Natalia García).

na de estudio se encontró que una tercera parte de los templos tiene naves con bóveda de cañón corrido, otra tercera parte tiene bóvedas de lunetos y el resto, bóveda de cañón con arcos. Sólo hay una iglesia techada totalmente con bóveda de nervaduras. Algunos de estos edificios estuvieron cubiertos al principio por una techumbre de madera, que después fue sustituida por bóvedas de mampostería, pero de esto se tiene evidencia documental sólo de un caso. La figura 3 muestra algunos de los tipos de bóvedas mencionados.

En la tabla 1 se presentan algunas características geométricas relevantes de la nave de los templos conventuales de la zona de estudio. La información se clasifica de acuerdo con el tipo de bóveda que cubre la nave, y los datos se ordenan de manera descendente según el claro del templo. El periodo de construcción de cada convento que aparece es una aproximación, ya que a veces se ha confundido con la fecha de fundación del convento.

A partir de los datos que aparecen en la tabla 1, se obtuvieron algunos patrones geométricos

entre los elementos que conforman la nave de los templos; los de mayor relevancia se describen en los siguientes puntos.

- Los templos de proporciones más grandes y de mayor altura tienen bóvedas de cañón corrido sin arcos.
- El intradós de las bóvedas es semicircular en prácticamente todos los casos.
- El espesor de las bóvedas está en función del tipo de bóveda y del claro de la nave; este último de manera particular cuando se trata de bóvedas de cañón corrido.
- La profundidad de los contrafuertes adosados al muro está en función del claro de la nave, cuando está techada con bóveda de cañón corrido; para los otros tipos de bóveda esto no está muy definido.
- La relación entre el espesor de las bóvedas de cañón corrido y el claro de la nave es cercana a 1/15, con algunas excepciones.
- Las bóvedas de cañón corrido son las de mayor espesor, mientras que las de lunetos cuentan con espesores menores.

**Tabla 1. Características geométricas de los templos conventuales de la zona de estudio**

Probable periodo de construcción	Templo	Longitud (nave, coro, presbiterio)	Claro	Altura	Espesor bóveda	Profundidad contrafuerte (incluye espesor de muro)	Espesor muro	Claro/longitud	Altura/claro	Profundidad contrafuerte/muro
<i>Bóveda de cañón corrido</i>										
1525-1570	Cuernavaca (F)	68.50	13.50	20.40	1.00	4.25 (a) 12.50 (*b)	2.00	1:5.0	1.50	2.13
1560-1588	Tepoztlán (D)	58.50	13.00	19.50	0.85	5.30 (a)	2.20	1:4.5	1.50	2.40
1535-1541	Yecapixtla (A)	54.10	12.00	19.00	0.80	3.80 (a)	1.80	1:4.5	1.60	2.10
1530-1550	Tlaquiltenango (F)	48.30	11.20	20.53	0.74	3.80 (a) 7.45 (*a)	2.00	1:4.3	1.80	1.90
1570-1580	Atlatlahucan (A)	40.50	10.15	17.00	0.60	3.30 (a)	1.60	1:4.0	1.67	2.00
1537-1571	Jonacatepec (A)	41.20	9.80	10.80	Sin contrafuerte	5.20 (*a)	2.00	1:4.2	1.10	
<i>Bóveda de cañón con arcos</i>										
1554-1572	Tlayacapan (A)	53.00	11.80	21.40	0.60	4.00 (a) 17.40 (*aa)	1.80	1:4.5	1.82	2.20
1535-1567	Zacualpan (A)	34.55	10.00	11.40		2.60 (a)	1.40	1:3.4	1.14	1.85
	Tlayecac (A)	33.05	9.00	12.10	0.60	3.10 (a)	1.30	1:3.7	1.34	2.40
1548-1553	Tlaltizapán (D)	42.57	8.60	12.40		3.40 (a)	1.60	1:5.0	1.44	2.13
1558-1565	Jantetelco (A)	36.40	8.50	10.60		3.40 (a)	1.50	1:4.3	1.25	2.27
1558-1567	Yautepec (D)	50.30	8.15	13.60	0.70	3.20 (a)	1.40	1:6.0	1.67	2.30
<i>Bóveda de cañón con lunetos</i>										
1529-1539	Jiutepec (F)	50.90	11.20	15.00	0.54	3.20 (a)	1.70	1:4.5	1.34	1.90
1534-1541	Ocuituco (A)	39.50	10.30	12.00		2.60 (a)	1.20	1:3.8	1.17	2.17
1534-1545	Totolapan (A)	33.70	10.00	13.60	0.58	5.30-7.30 (b)	1.90	1:3.4	1.36	2.80-3.84
1570-1580	Hueyapan (D)	44.40	9.60	13.30	0.40	3.50 (a) 5.30 (*a)	1.50	1:4.6	1.39	2.30
	Xochitepec (F)		8.60	11.45		2.00 (a)	1.00		1.33	2.00
1570-1581	Tetela del Volcán (D)	36.20	10.50			5.20 (b)	1.20	1:3.4		4.30
<i>Bóveda de nervaduras</i>										
1535	Oaxtepec (D)	56.40	11.20	15.47	0.80	3.25 (a)	1.35	1:5.0	1.38	2.40

Dimensiones en metros. (A) Agustino. (D) Dominico. (F) Franciscano. (a) Contrafuerte adosado. (b) Contrafuerte botarel. (\*a) Contrafuerte adosado adicionalado. (\*b) Contrafuerte botarel adicionalado. (\*aa) Incremento de la sección de un contrafuerte ya existente.

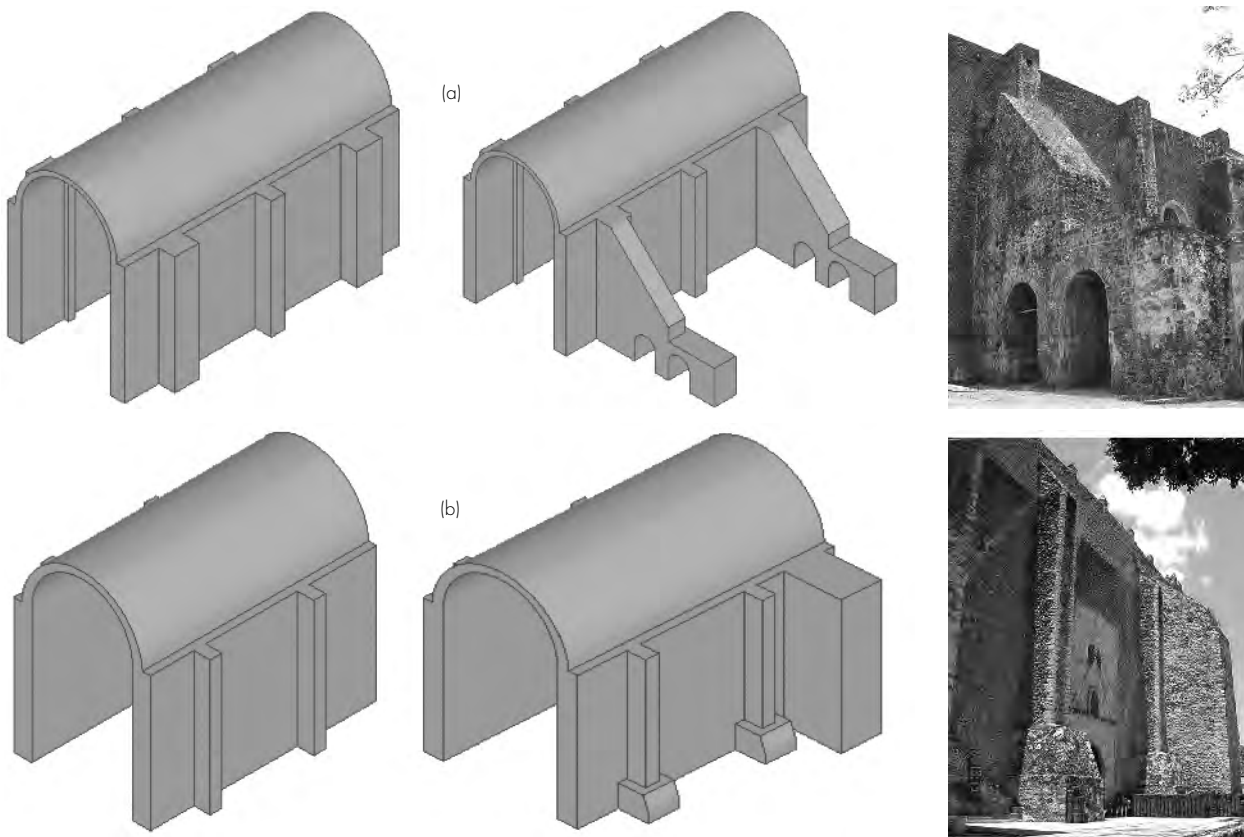


Figura 4. Geometría de templos con cambios en sus contrafuertes. a) Incremento de la sección de los contrafuertes del templo de Tlayacapan, con fotografía de su vista lateral. b) Adición de contrafuertes en el templo de Tlaquiltlenango, con fotografía de su vista lateral. Fuente: visita de campo (Natalia García).

- Los contrafuertes más comunes son los adosados al muro; la proporción entre la profundidad del contrafuerte y el espesor del muro varía de 1.80 a 2.40. Sólo hay dos casos que tienen contrafuertes tipo botarel a lo largo de la nave que se alejan de estos valores.

Los cambios en los contrafuertes y en la cubierta de la nave son los que resultan de interés para este trabajo. Al parecer, las transformaciones de los contrafuertes originales no se dieron por problemas ante cargas gravitacionales, sino por cambio del tipo de cubierta o asentamientos del terreno, específicamente en la cabecera o cerca del coro del templo (figura 4). Los contrafuertes centrales de la nave no tuvieron cambios, sólo los que están cerca del presbiterio o del coro,

con excepción de la iglesia de Hueyapan. Ésta es la única iglesia en la que se observa con claridad que todos sus contrafuertes fueron construidos en una etapa posterior a la terminación del templo, por lo que tal vez en un inicio tuvo techumbre de madera.

De acuerdo con Kubler,<sup>6</sup> el gran espesor de los muros no es muestra de un diseño conservador o de protección contra sismos, sino de preparación para cambios futuros de la estructura; algunos templos estuvieron cubiertos inicialmente por una techumbre de madera, que después fue cambiada por bóvedas de mampostería, las cuales requieren de elementos que contrarresten adecuadamente el empuje producido.

<sup>6</sup> George Kubler, *op. cit.*, p. 184.

## Reglas geométricas históricas

La práctica constructiva anterior a la aparición de la teoría de las estructuras ha sido estudiada por diversos autores; algunos de ellos, como Straub,<sup>7</sup> consideran que las “reglas matemáticas y geométricas” utilizadas por los constructores medievales fueron usadas sólo con fines de composición formal y no estructural. Estas apreciaciones quizá se deban al poco conocimiento que tenemos acerca de las bases de dichas reglas y de la aplicación real que tuvieron en las construcciones antiguas. Por lo anterior, es interesante conocer los casos reales de aplicación, debido a que son un factor primordial para comprender la concepción de su estructura y lograr un mejor entendimiento de su funcionamiento, aspecto importante para la preservación de su seguridad estructural.

Los antiguos tratados de construcción son una fuente importante de conocimiento acerca de la práctica constructiva de épocas pasadas; algunos de ellos contienen reglas para determinar las dimensiones de los elementos estructurales de mampostería. Por medio de estos documentos se sabe que en el diseño de los edificios tenía mucha importancia la proporción. De acuerdo con Martínez,<sup>8</sup> la escasez de documentos y planos constructivos puede atribuirse a la importancia que los constructores daban a la secrecía de su trabajo dentro de su gremio, y a que no tenían necesidad de hacer los trazos del edificio, porque para ellos tenía más importancia la proporción y la elección de un módulo de medida, que las dimensiones del edificio.

Las reglas geométricas históricas fueron formuladas en el marco de las proporciones, cuyo fun-

damento es cierto si la escala no modifica apreciablemente su seguridad. Heyman<sup>9</sup> considera que la estabilidad de una estructura de mampostería puede asegurarse con la proporción adecuada de los elementos que la integran. Es raro que la resistencia del material tenga influencia en la estabilidad de una estructura antigua de mampostería, a menos que se trate de puentes de claros muy grandes.<sup>10</sup> Los antiguos constructores se dieron cuenta que una geometría adecuada podía garantizarles la construcción de una estructura estable, teniendo cuidado que los materiales tuvieran una calidad aceptable.

En los antiguos tratados de construcción que han llegado hasta nuestros días, publicados a partir del siglo xv, se encuentran algunas fórmulas y descripciones gráficas para obtener la dimensión de elementos de estructuras de mampostería; sobre todo se encuentran arcos, bóvedas, contrafuertes, torres y puentes. En este trabajo se hizo una revisión de las reglas de proporción contenidas en algunos tratados de construcción originales: Simón García<sup>11</sup> y Rodrigo Gil de Hontañón;<sup>12</sup> así como de trabajos recientes de autores que han estudiado este tema, entre ellos Huerta,<sup>13</sup> Cabrera<sup>14</sup> y Martínez.<sup>15</sup> En general, estas reglas tienen

<sup>9</sup> Jacques Heyman, *The Stone Skeleton: Structural Engineering of Masonry Architecture*, Londres, Cambridge University Press, 1995, pp. 4 y 22.

<sup>10</sup> *Ibidem*, pp. 13 y 14.

<sup>11</sup> Simón García, *Compendio de arquitectura y de simetría de los templos*, Valladolid, Colegio oficial de arquitectos en Valladolid, 1991, fs. 19v, 20r, 21r y 59r.

<sup>12</sup> Rodrigo Gil de Hontañón, *Rodrigo Gil de Hontañón. Selección y estudio de Manuel Pereda de la Reguera*, México, Librería Moderna, 1951, pp. 44-55.

<sup>13</sup> Santiago Huerta, “Diseño estructural de arcos, bóvedas y cúpulas de España”, Madrid, tesis doctoral, Escuela Superior de Arquitectura de Madrid, 1990, pp. 112, 113, 121-136, 140 y 182.

<sup>14</sup> Juan Cabrera Aceves, “Configuración constructiva y estructural de cinco templos conventuales franciscanos fundados en la zona histórica purépecha”, México, tesis de maestría, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, 1999.

<sup>15</sup> Margarita Martínez del Sobral, *op. cit.*, pp. 67-72, 97-113, 129-133.

<sup>7</sup> Hans Straub, *A History of Civil Engineering*, Londres, Leonard Hill, 1952, pp. 89-90.

<sup>8</sup> Margarita Martínez del Sobral y Campa, “Los conventos franciscanos del siglo xvi en el estado de Puebla”, México, tesis doctoral, Facultad de Arquitectura-UNAM, 1987, p. 120.

---

como base la geometría, y suelen clasificarse en dos tipos: *reglas gráficas y fórmulas racionales*. El primer tipo se basa en construcciones geométricas relacionadas con los métodos de trazos góticos; el segundo proporciona la dimensión de algún elemento estructural como una fracción de la dimensión de otros elementos; estas fórmulas tienen su origen en la tradición romana.<sup>16</sup> Algunas reglas son de carácter general y otras fueron elaboradas para casos particulares, referidas a una tipología determinada. En ambos casos, los conceptos que intervienen en ellas son la flecha de la bóveda o arco, y la directriz de su intradós; las alturas del contrafuerte y de la nave.

En los tratados de construcción hay un número importante de reglas para determinar la profundidad de los contrafuertes; esto muestra que había conciencia de la relevancia de contrarrestar de manera adecuada los empujes que generan las bóvedas y los arcos sobre sus apoyos. Las reglas que se estudian en este trabajo se atribuyen a Gil de Hontañón (1544-1555),<sup>17</sup> Martínez de Aranda (1550-1600), Hernán Ruiz y fray Lorenzo de San Nicolás (1639-1664). Aunque este último autor es del siglo XVII, la regla para el contrafuerte de bóvedas de mampostería de piedra ya es mencionada por Palladio en el siglo XVI. En la figura 5 se describen nueve reglas de los tratadistas mencionados. Estas reglas tienen como base diferentes características geométricas para obtener la profundidad de los contrafuertes que soportan arcos o bóvedas de mampostería. Si bien no se sabe con certeza cuál fue el campo de aplicación de estas reglas, Huerta<sup>18</sup> menciona que se ha considerado que fueron usadas indistintamente tanto en arcos como en bóvedas.

En la figura 5 se observa que la altura de la nave sólo es tomada en cuenta por las reglas 3, 4 y 5; las reglas 4, 7 y 8 pueden aplicarse a cualquier tipo de arco, y las restantes en arcos o bóvedas de medio punto. Sólo las reglas 3 y 8 consideran el espesor de la bóveda. La regla de fray Lorenzo cita de modo explícito que puede ser usada para obtener la profundidad de contrafuertes que sustentan bóvedas y menciona la separación que debe haber entre ellos. Cinco de las reglas anteriores pertenecen a Rodrigo Gil de Hontañón, quien realizó diversas construcciones importantes en España durante el siglo XVI. Para Sanabria<sup>19</sup> esto indica que Hontañón fue mejorando su método a través de su experiencia constructiva o incluso mediante el posible ensayo de modelos a escala. La regla 6 es la única, de las que aparecen en la figura 5, desarrollada para obtener los contrafuertes de bóvedas de nervaduras. Este tipo de bóvedas en los conventos mexicanos tiene características semejantes a las construidas por Gil de Hontañón en España.

| 11

### **Reglas históricas en los templos conventuales mexicanos**

Si bien es posible que la concepción del diseño de los templos conventuales haya sido fruto del “recuerdo” de los modelos españoles, sin que sus constructores hayan seguido un trazo de las normas de alguno de los tratados de arquitectura,<sup>20</sup> es difícil pensar que la concepción estructural de los más de 300 conventos construidos durante el siglo XVI haya sido posible sólo por lo que recordaban los frailes. El estudio de los edificios conventuales ha llevado a considerar la posibilidad

<sup>16</sup> Santiago Huerta, *op. cit.*, p. 99.

<sup>17</sup> Entre paréntesis, periodos probables en que estos cuatro autores escribieron sus tratados de construcción.

<sup>18</sup> *Ibidem.*, p. 316.

<sup>19</sup> Sergio Luis Sanabria, “The Mechanization of Design in the 16th Century: Structural Formulate of R. Gil de Hontañón”, en *J. Soc. of Architectural Historians*, vol. 41, 1982, pp. 287-289.

<sup>20</sup> Juan Cabrera Aceves, *op. cit.*, p. 195.



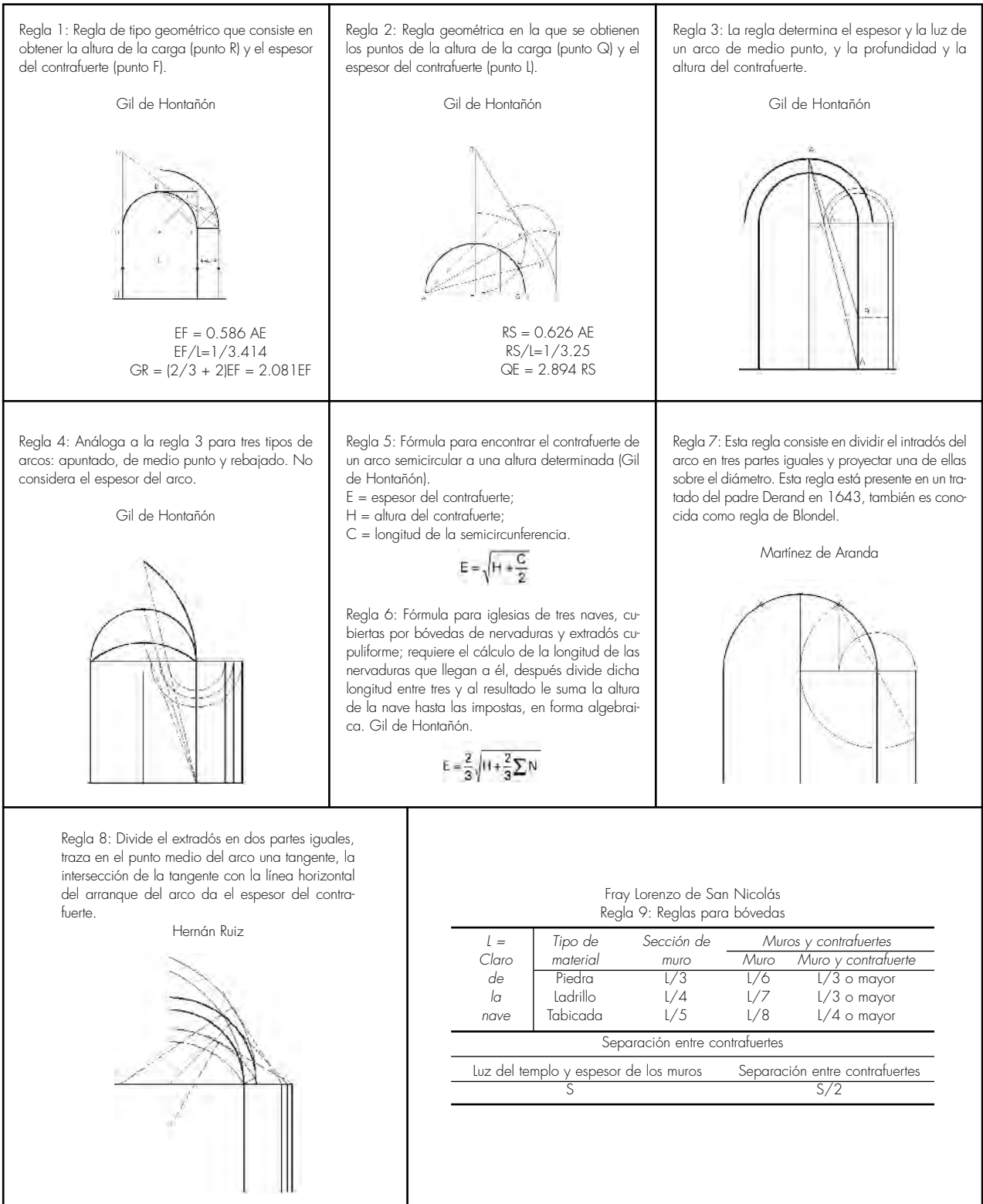


Figura. 5. Reglas históricas para obtener la profundidad de los contrafuertes.

de la participación de constructores experimentados provenientes de España, en número suficiente para realizar tantos edificios en un periodo de tiempo relativamente corto.

Los tratados de construcción escritos en Europa durante los siglos xv y xvi pueden ayudarnos a un mejor entendimiento de los edificios en estudio. En la tabla 2 se registra la profundidad del contrafuerte de los templos —incluyendo el espesor del muro— y la profundidad que se obtiene al aplicar las reglas descritas en la figura 5. Ya que la mayoría de las bóvedas que cubren la nave son prácticamente semicirculares, es posible aplicar las reglas propuestas por los tratadistas que se citan en la figura 5. Los datos geométricos necesarios para aplicar estas reglas son la altura del contrafuerte, el claro y la altura de la nave, la flecha y el espesor de la bóveda (datos de la tabla 1). Las iglesias de los conventos de Atlatlahucan, Tlayacapan, Tlaquiltenango y Cuernavaca tienen contrafuertes de diversas etapas constructivas; las dimensiones que aparecen en la tabla 2 corresponden a las primeras fases de construcción de los contrafuertes de esos templos. No se consideraron las iglesias que tienen contrafuertes tipo botarel a lo largo de la nave.

Al comparar los resultados de las reglas con la profundidad real de los contrafuertes de cada templo, se observa que las reglas 3 y 9 son las más cercanas a los contrafuertes de la mayoría de los templos. En particular, las reglas 2, 3, 4, 8 y 9 se aproximan a la profundidad real de las iglesias techadas con bóveda de cañón corrido sin arcos; entre ellas, la de Tepoztlán tiene contrafuertes de profundidad poco común y son mucho mayores que los contrafuertes obtenidos con las reglas. Un menor número de reglas se asemejan a los contrafuertes de los templos cubiertos con bóvedas de cañón con arcos y bóvedas de lunetos.

Aunque para estos tipos de bóvedas no se observa alguna regla que se acerque de manera consistente a los contrafuertes, se observa que las reglas 3 y 4 son más aproximadas en las iglesias con bóveda de cañón con arcos, y la regla 7 a los templos techados con bóveda de lunetos.

La regla 6 se aplicó al templo dominico de Oaxtepec, único techado completamente con bóveda de nervaduras. Esta regla, desarrollada para bóvedas nervadas que cubren templos de tres naves, da una profundidad de contrafuerte aproximada a la real. Esta bóveda de gran espesor (tabla 1) tiene características semejantes a las construidas por Gil de Hontañón en España, y sus nervaduras tienen la configuración de sus trazos originales. Este tipo de bóveda es de gran importancia, pero no se analiza detalladamente, debido a que requiere una zona de estudio mayor que la elegida en este trabajo.

### Validación de las reglas históricas

No se conocen con precisión las bases de las reglas históricas; quienes las han estudiado consideran que quizá hayan sido producto de la experiencia constructiva, combinada con el uso de métodos gráficos que sus autores fueron perfeccionando. Para evaluar si los fundamentos de las reglas tienen una base racional, en este trabajo se realizaron modelos de la estructura de la nave de los templos conventuales (figura 6), que sirvieron para conocer cómo varía la capacidad de carga de esas estructuras según sea la regla que se aplique.

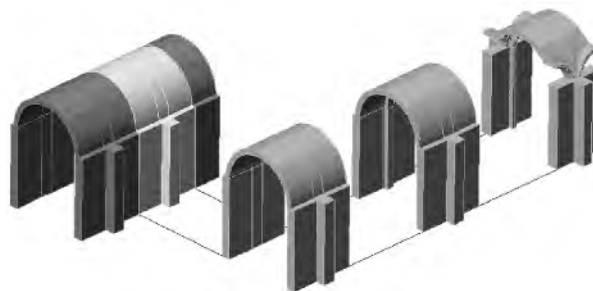


Figura 6. Características geométricas del modelo de nave tipo.

**Tabla 2. Profundidades de contrafuerte\* resultantes de la aplicación de las reglas históricas (m)**

Convento	Profundidad real	Regla 1	Regla 2	Regla 3	Regla 4	Regla 5	Regla 6	Regla 7	Regla 8	Regla 9	
<i>Iglesias con bóveda de cañón corrido sin arcos</i>											
Tepoztlán (D)	<b>5.20</b>	3.80	4.00	4.35	4.40	4.80	3.25	3.85	4.35		
Cuernavaca (F)	<b>4.25</b>	3.95	<b>4.20</b>	<b>4.35</b>	<b>4.50</b>	4.90	3.27	3.85	<b>4.50</b>		
Yecapixtla (A)	<b>3.85</b>	3.50	<b>3.70</b>	4.10	4.30	4.80	3.25	<b>3.70</b>	<b>4.00</b>		
Tlaquiltenango (F)	<b>3.80</b>	3.30	3.40	<b>3.90</b>	<b>4.00</b>	4.85	3.10	2.75	<b>3.75</b>		
Atlatlahucan (A)	<b>3.30</b>	3.20	3.80	<b>3.35</b>	<b>3.45</b>	4.95	2.40	<b>3.25</b>	<b>3.40</b>		
Jonacatepec (A)	<b>3.00</b>	2.87	<b>3.10</b>	2.50	2.70	3.70	2.45	<b>3.10</b>	<b>3.25</b>		
<i>Iglesias con bóveda de cañón con arcos</i>											
Tlayacapan (A)	<b>4.00</b>	3.45	<b>3.80</b>	<b>4.10</b>	<b>4.20</b>	4.90	2.90	3.60	<b>3.90</b>		
Tlaltizapán (D)	<b>3.40</b>	2.50	2.80	3.00	<b>3.20</b>	4.40	1.80	2.70	2.85		
Jantetelco (A)	<b>3.40</b>	2.50	2.65	2.80	3.00	<b>3.60</b>	2.12	2.60	2.83		
Yautepec (D)	<b>3.20</b>	2.40	2.55	2.70	2.90	<b>3.00</b>	2.00	2.50	2.70		
Tlayecac (A)	<b>3.10</b>	2.64	2.80	<b>3.00</b>	<b>3.24</b>	3.82	2.25	2.64	<b>3.00</b>		
Zacualpan (A)	<b>2.60</b>	3.00	3.10	<b>2.80</b>	3.00	3.85	<b>2.50</b>	<b>2.80</b>	3.35		
<i>Iglesias con bóveda de lunetos</i>											
Hueyapan (D)	<b>3.50</b>	2.80	2.90	3.10	2.50	4.00	2.50	2.60	3.20		
Jiutepec (F)	<b>3.20</b>	<b>3.30</b>	<b>3.40</b>	3.80	3.65	4.20	<b>3.10</b>	2.75	3.75		
Ocuituco (A)	<b>2.60</b>	3.00	3.10	2.90	<b>2.80</b>	4.15	<b>2.50</b>	3.10	3.40		
Xochitepec (F)	<b>2.00</b>	2.52	2.70	2.60	2.75	3.70	<b>2.20</b>	<b>2.00</b>	2.85		
<i>Iglesias con bóveda de lunetos</i>											
Oaxtepec (D)	<b>3.74</b>										<b>3.98</b>

\* La profundidad total incluye el espesor del muro.

Nota: las dimensiones más cercanas a la profundidad real de los contrafuertes están en negritas.

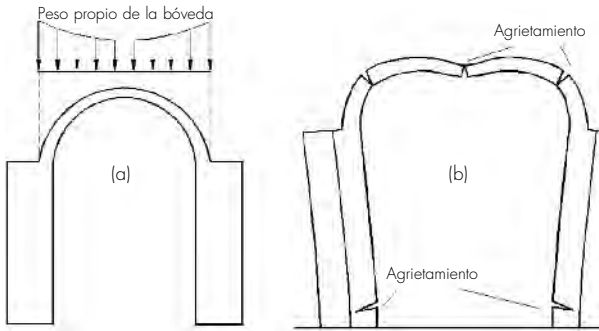


Figura 7. Esquema de (a) la sobrecarga impuesta a los modelos de las naves, y (b) del agrietamiento en la condición de falla de la estructura.

El objetivo fue valorar si al aplicar las reglas, se obtienen estructuras con una capacidad de carga uniforme aunque varíen las propiedades geométricas de la nave. Para esto se utilizó un método de análisis que simula fenómenos como el agrietamiento y aplastamiento del material, lo que permite determinar la carga máxima que soporta la estructura. No se pretende exponer aquí las bases de dicho método, sino mostrar algunos resultados que pueden ser de interés. El procedimiento consistió en aplicar primero el peso propio de la estructura y después una carga vertical con una distribución similar al peso de la bóveda (figura 7a); esta carga se va incrementando hasta que la estructura falla. El colapso de la nave se da por la formación de un mecanismo de cinco articulaciones plásticas, es decir, se presentan agrietamientos en cinco zonas de la estructura, los que conducen a la falla de la estructura, como se muestra en la figura 7b.

La propiedad geométrica básica que se usó para validar las reglas históricas fue la profundidad de contrafuerte que se obtiene con cada una de ellas. Con base en esto, se estudió el efecto de otras características geométricas y su relación con las reglas. Como ejemplo, en la figura 8 se compara el contrafuerte para una nave con bóveda de cañón corrido, obtenido al utilizar dos de las reglas históricas de la figura 5 (reglas 4 y 7), para dos relaciones de aspecto de la nave ( $H/L = 1.2$  y  $1.5$ ). En

**Tabla 3. Nave con bóveda de cañón corrido**

Contrafuerte**	H/L*	
	1.2	1.5
a	2.28	3.18
b	3.24	3.24
c	3.70	4.18

\* Relación de aspecto H/L. \*\* Cotas en metros.

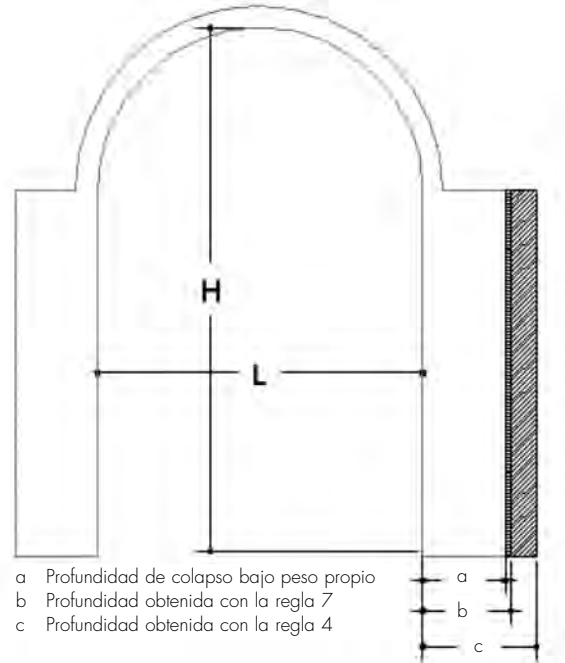


Figura 8. Sección transversal de una nave que muestra las profundidades de contrafuerte.

la tabla 3, incluida en la figura 8, se presentan los resultados de aplicar estas dos reglas, así como la profundidad de contrafuerte con que la nave sólo soporta su peso propio ( $a =$  profundidad de colapso bajo peso propio). Se observa que existe poca diferencia entre la profundidad obtenida con la regla 7 y la profundidad de colapso bajo peso propio, sobre todo cuando la relación de aspecto es de 1.5. Esto no sucede con la regla 4, la cual está más alejada de la profundidad "a" y, a diferencia de la regla 7, sí considera la altura de la nave. Es decir, los resultados de las reglas dependen de las características geométricas que se toman en consideración para obtener el contrafuerte.

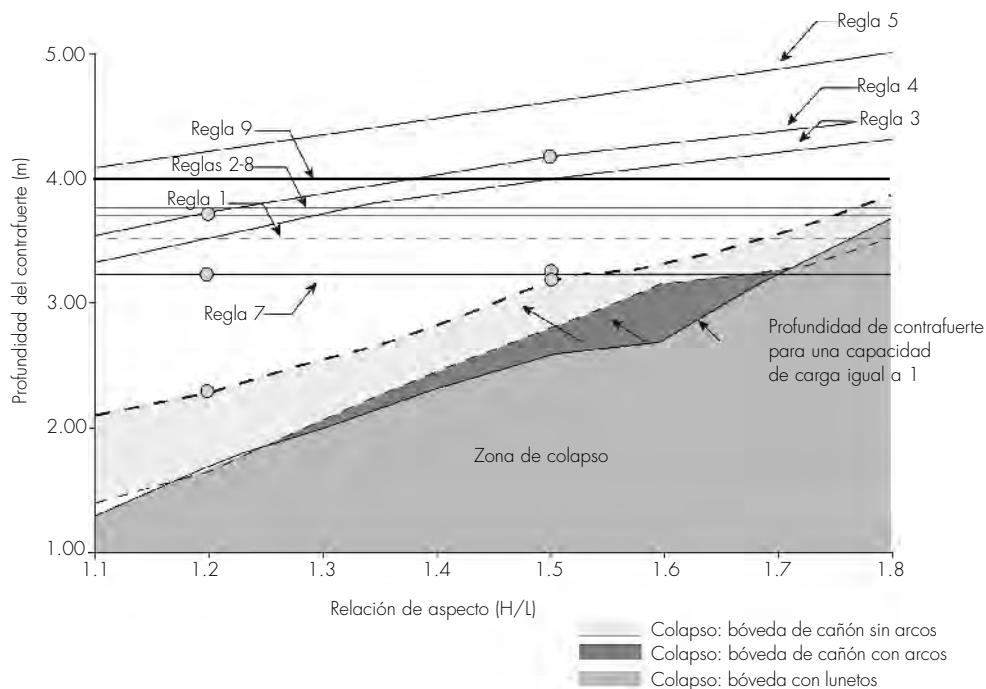


Figura 9. Profundidad de contrafuerte (incluye espesor del muro) para cada regla histórica. Zona de colapso de naves con tres tipos de bóveda.

El comportamiento de las dos reglas, descrito anteriormente, puede generalizarse para las reglas restantes, como se muestra en la figura 9. En ella se indica la profundidad de colapso para diferentes relaciones de aspecto de la nave. El contrafuerte de colapso se indica con las tres curvas que delimitan la zona sombreada que aparece en la figura; cada una de las curvas corresponde a un tipo de bóveda. Las profundidades incluidas en esta zona sombreada teóricamente llevan al colapso de la estructura bajo peso propio, es decir, corresponde al contrafuerte “a” que aparece en la figura 8.

En la figura 9 se observa también la profundidad de contrafuerte obtenida con ocho de las reglas que se mostraron en la figura 5, considerando diferentes relaciones de aspecto. Se observa que las que no toman en cuenta la altura de la nave forman cuatro líneas horizontales (reglas 1, 2, 7, 8 y 9); entre ellas, sólo la regla 9 está fuera de la zona de colapso para cualquiera de las rela-

ciones de aspecto que se contemplan en este estudio; las reglas 2 y 8 forman una misma línea. Por su parte, la regla 7, de manera particular, es la más desfavorable al no garantizar teóricamente la estabilidad de naves con bóveda de cañón, para  $H/L > 1.5$ . Las reglas 3, 4 y 5, cuya formulación toma en consideración la altura de la nave, se encuentran uniformemente distantes de la zona de colapso de la estructura. Estas tres reglas dan seguridad más uniforme y mayor en las naves con los tres tipos de bóvedas estudiadas aquí, incluso para las de mayor altura. Como auxiliar, para una mejor comprensión de esta gráfica, se marcan con círculos negros los datos que se presentaron en la tabla 3, esto es, los contrafuertes obtenidos con las reglas 4 y 7, con sus correspondientes contrafuertes de colapso.

Otro aspecto de interés que se observa en la figura 9 es que las naves con bóvedas de arcos o lunetos tienen una capacidad de carga más grande que las de cañón corrido sin arcos, debido a

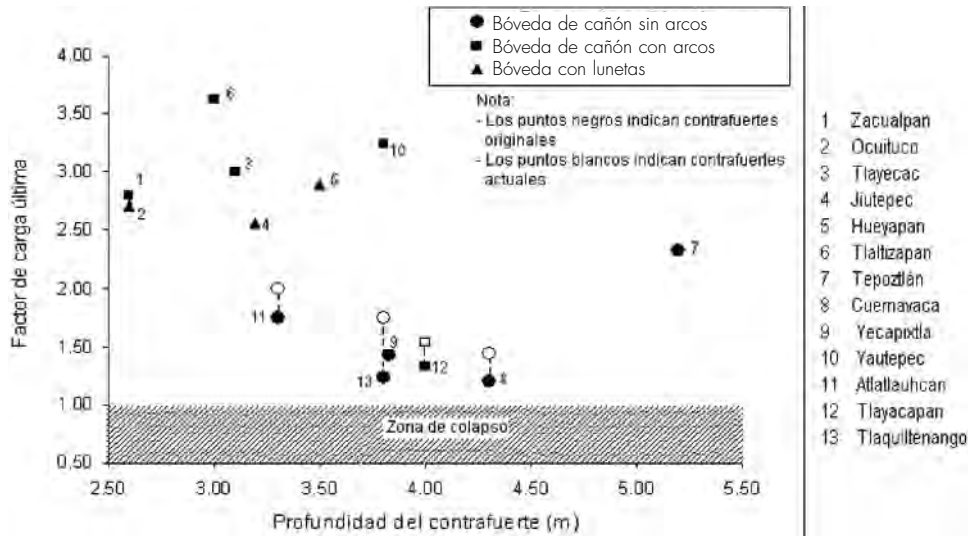


Figura 10. Factores de carga última de los templos de la zona de estudio.

que el tamaño de la zona de colapso es menor en estos casos. Esto se debe a que la adición de arcos o lunetos en la bóveda proporciona mayor rigidez y resistencia a la nave. La figura 9 nos permite hacer una primera evaluación de la consistencia o uniformidad de las reglas históricas, así como de las que son más desfavorables, según sea la relación de aspecto de la nave.

### Estimación de la seguridad de los templos conventuales morelenses

Adicionalmente se desarrollaron modelos y análisis similares a los descritos en la sección anterior para trece templos de los conjuntos conventuales morelenses, con el fin de evaluar si existe uniformidad en la capacidad de carga de las naves. Es importante señalar que no se pretende valorar la seguridad real de edificios específicos, ya que cada uno de ellos tiene una problemática particular de gran complejidad. En cuatro de estos templos se tomaron en cuenta las etapas constructivas en las que se adicionó o incrementó la sección de los contrafuertes; es decir, se realizó un modelo considerando los contrafuertes

iniciales y otro del mismo templo al que se agregaron los contrafuertes de una etapa de construcción posterior.

Los factores de carga última de los templos se grafican en la figura 10. Los modelos estudiados corresponden a las iglesias de la tabla 1, aquellas en las que fue posible medir el espesor de la bóveda; en tres de ellas, el espesor se obtuvo a partir de medidas indirectas, mediante la altura interior y exterior de la nave. Los modelos son semejantes a los descritos en la sección precedente, que consiste en una sección de nave, pero ahora con las características geométricas de cada templo. Cuando fue necesario se incrementó la longitud del modelo para poder tomar en cuenta los contrafuertes adicionales.

Se observa que todas las iglesias están fuera de la zona de colapso, y que el tipo de bóveda tiene influencia relevante en su capacidad de carga. Las naves con bóveda de cañón con arcos y bóveda de lunetos, tienen los factores de carga última de mayor magnitud, ya que en general son construcciones de menor altura. Por su parte, los templos con menor capacidad están cubiertos con bóveda de cañón corrido sin arcos. Estos edifi-

cios, más desfavorables, tienen naves con relación de aspecto mayor que la usual, de  $H/L > 1.7$ ; tienen contrafuertes adicionales o incrementos en su sección, realizados en periodos de construcción posteriores, que proporcionan mayor resistencia a la estructura. Como puede apreciarse esta resistencia adicional no es tan significativa en la mayoría de ellos. Esto se debe a que los cambios en los contrafuertes se dieron próximos al arco triunfal, cerca del presbiterio, y en el coro, pero no a lo largo de la nave; es decir, tal vez estas adiciones no se debieron a problemas por cargas gravitacionales, sino quizá en respuesta a asentamientos diferenciales, deslizamientos del suelo o acciones sísmicas. Uno de estos templos es el de Tlayacapan, que tiene contrafuertes robustos debido al incremento en su sección, en forma de grandes rampas, cuya profundidad es de poco más de 15 m. El aumento de la sección se da sólo en los contrafuertes del presbiterio y del coro. Esta iglesia es la única con bóveda de cañón con arcos que tiene bajos niveles en su capacidad de carga y que, originalmente, su bóveda tal vez era de cañón sin arcos.

### Conclusiones

El estudio de las características geométricas de los templos morelenses permitió identificar algunos patrones que sugieren la adopción de ciertas proporciones para dimensionar los elementos estructurales de la nave. Algunos de ellos están relacionados con el tipo de bóveda, la altura de la nave o la relación entre el espesor y el claro de la bóveda. El gran espesor de las bóvedas de cañón sugiere que fueron de las primeras que se cons-

truyeron para cubrir las naves, y que tal vez algunas sustituyeron a las cubiertas de madera originales. Las bóvedas renacentistas de lunetos son posteriores y es frecuente que se construyeran para sustituir bóvedas anteriores, dañadas por sismos, o para reemplazar cubiertas de madera, por considerarlas de menor calidad arquitectónica, o porque habían sido destruidas por incendios. Por otra parte, aunque no es posible determinar con certidumbre si se aplicaron reglas estructurales para determinar la profundidad de los contrafuertes, hay evidencia de su posible uso en la mayoría de los edificios bajo estudio. Resalta que los templos agustinos y algunos franciscanos sean los que más se aproximan a las reglas, aunque ninguno de manera consistente. Por otra parte, si bien todos los templos conventuales están del lado de la seguridad, hay algunos que son más desfavorables; casi todos estos últimos tienen contrafuertes de grandes dimensiones adicionales construidos en periodos posteriores a la terminación del templo, que dan mayor resistencia a la nave, aunque este incremento no es relevante porque los contrafuertes añadidos están ubicados sólo en algunos ejes y dejan desprotegidos otros que rigen la capacidad de la nave ante cargas verticales.

### Agradecimientos

Natalia García agradece la ayuda escolar del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología y la valiosa ayuda de Fernando Peña y Marcos Chávez, del Instituto de Ingeniería de la UNAM; de los arquitectos Rubén Rocha Martínez, Rafael Gutiérrez Yáñez y Alfonso Toussaint.

