

Líneas y entramados estructurales; geometría de trazo para las bóvedas mixtecas renacentistas de Coixtlahuaca, Yanhuitlán y Teposcolula en Oaxaca

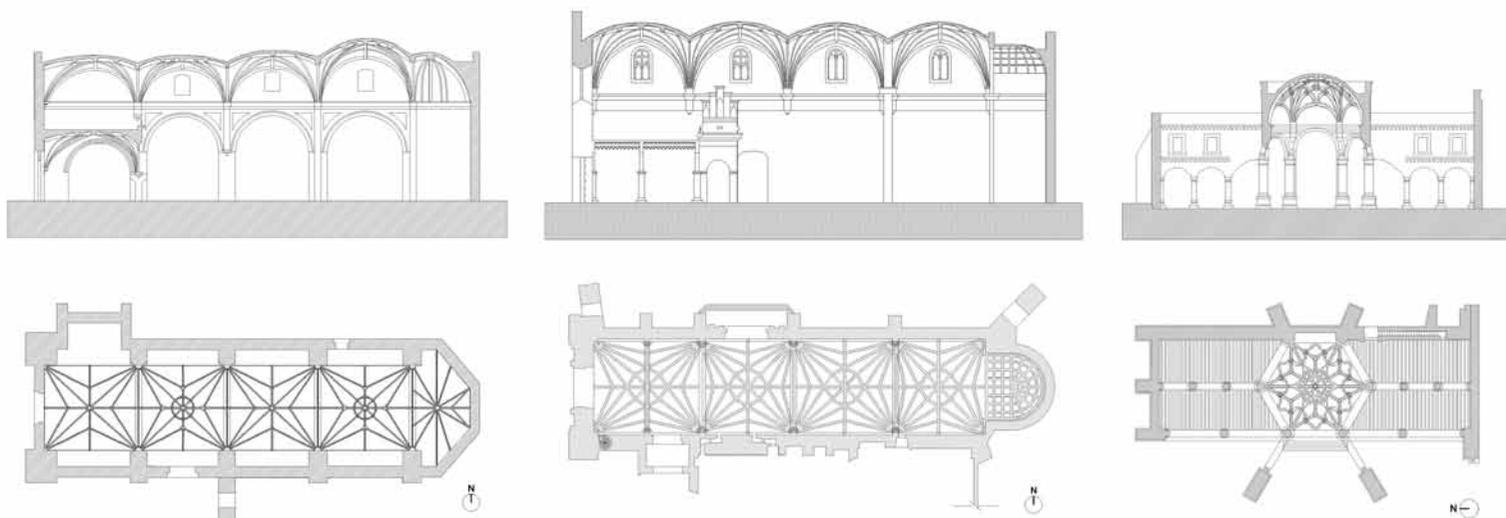
Benjamín Ibarra-Sevilla

Maestro en arquitectura y profesor de arquitectura
en la Universidad de Minnesota, EUA

La construcción de bóvedas nervadas renacentistas en el continente americano se llevó a cabo fundamentalmente durante el siglo XVI. El control de la geometría en estas cubiertas es muy importante, ya que este tipo de estructuras trabajan únicamente a compresión y su estabilidad depende de su forma. Los arquitectos de aquella época tenían claro que el cuidado de la forma construida era fundamental para garantizar que la línea de esfuerzos se mantuviera dentro del espesor de los elementos soportantes. Este necesario manejo de la forma obligó a que los arquitectos desarrollaran sus proyectos basándose en las relaciones entre el diseño, la geometría y la estructura. Algunas de estas bóvedas que se construyeron durante el renacimiento son muy sencillas recordándonos su ascendencia gótica, mientras que otras muestran el dominio de la tecnología constructiva a través de exuberantes y elaborados tejidos de nervaduras. La construcción de este tipo de cubiertas no fue muy común en el territorio mexicano; aún cuando se construyeron cientos de edificios religiosos durante siglo XVI, pocos tienen bóvedas nervadas con un empleo detallado de la estereotomía de la piedra.¹ Los retos que presentaban este tipo de cubiertas hicieron considerar este tipo de bóvedas como un lujo. Sin embargo, los templos de San Juan Bautista Coixtlahuaca, Santo Domingo Yanhuitlán y San Pedro y San Pablo Teposcolula muestran bóvedas nervadas de sofisticada elaboración. Son estructuras complejas que sirven como testimonio de la destreza indígena en el labrado de piedra. Este estudio se dedica a analizar los principios de trazo geométrico utilizados en estas bóvedas de la Mixteca oaxaqueña usando herramientas que ofrece la tecnología digital. El hilo conductor de este texto se basa en las relaciones entre el diseño, la geometría y la estructura que tanto preocupaban a los arquitectos del siglo XVI. Palabras clave: geometría, estereotomía, cantería, bóvedas nervadas

La volumetría de una bóveda nervada se define por la geometría que rige el trazo de los arcos que la componen. El estudio de esta geometría de trazo es el punto de partida para comprender sus características formales y estructurales. Esta forma de abordar las bóvedas se refiere a los orígenes de las mismas. Hay abundantes estudios que proponen la manera en que se realizaban los trazos para su diseño y construcción.² En general, los estudiosos del tema coinciden en que la volumetría de las bóvedas en el gótico era una consecuencia del proceso constructivo, y que en el Renacimiento los arquitectos tenían la habilidad de visualizar una forma preestablecida y llevarla a su culminación en la obra arquitectónica. Durante el Renacimiento la tecnología de la construcción dio pasos sustanciales, la estereotomía de la piedra ofrecía procedimientos que permitían construir esas formas preconcebidas. Estas relaciones entre la forma y lo constructivo son el eje creador que motivó la materialización de las bóvedas mixtecas de Oaxaca.

En términos prácticos las bóvedas nervadas renacentistas se distinguen una de otra por la manera en que se trazaron los arcos terceletes, ya que los arcos diagonales simplemente cruzan diagonalmente de arista a arista en el polígono que las contiene.³ Los arcos rampan-



Planta arquitectónica de las iglesias de Coixtlahuaca, Yanhuitlán y Teposcolula

tes siempre son perpendiculares a los lados de este polígono mientras que los arcos formeros y perpiaños son los lados del polígono mismo. Como ejemplo de esta organización de los arcos tenemos el bien conocido diagrama que se atribuye Rodrigo Gil de Hontañón que utiliza la mano como guía para definir los espesores de los diferentes arcos que componen la bóveda. Este dibujo asigna el pulgar a los arcos perpiaños, puesto sobre ellos descansan las bóvedas y requieren ser los más sustanciosos, mientras que el meñique corresponde a los arcos formeros que son embebidos en los tímpanos y por lo tanto más delgados. Para terminar de enumerar los arcos que componen una bóveda nervada tenemos los combados, que son variantes, no tienen un origen tan riguroso como el resto de los arcos de las bóvedas. En muchos casos, estos segmentos de nervadura surgen como un alarde del maestro constructor que demuestra su destreza en las artes de la construcción.

Documentos antiguos como los manuscritos españoles de Alonso de Vandelvira (1580) y Hernán Ruiz (1560) nos muestran una aproximación a los procedimientos que se realizaban para definir la geometría de las nervaduras de las bóvedas. José Carlos Palacios⁴ y Enrique Rabasa⁵ explican con claridad cómo los dibujos de estos manuscritos trazan primero una serie de líneas que definen la bóveda en su proyección en planta, y después se dibujan cada una de las nervaduras como arcos independientes que se proyectan sobre un mismo plano traslapándose uno con otro. Estos simples dibujos con base en líneas arrojaban los suficientes datos para iniciar la construcción de la bóveda; después vendría la definición de las piezas y su estereotomía, lo que requería de un proceso más detallado y de relativa complejidad.⁶

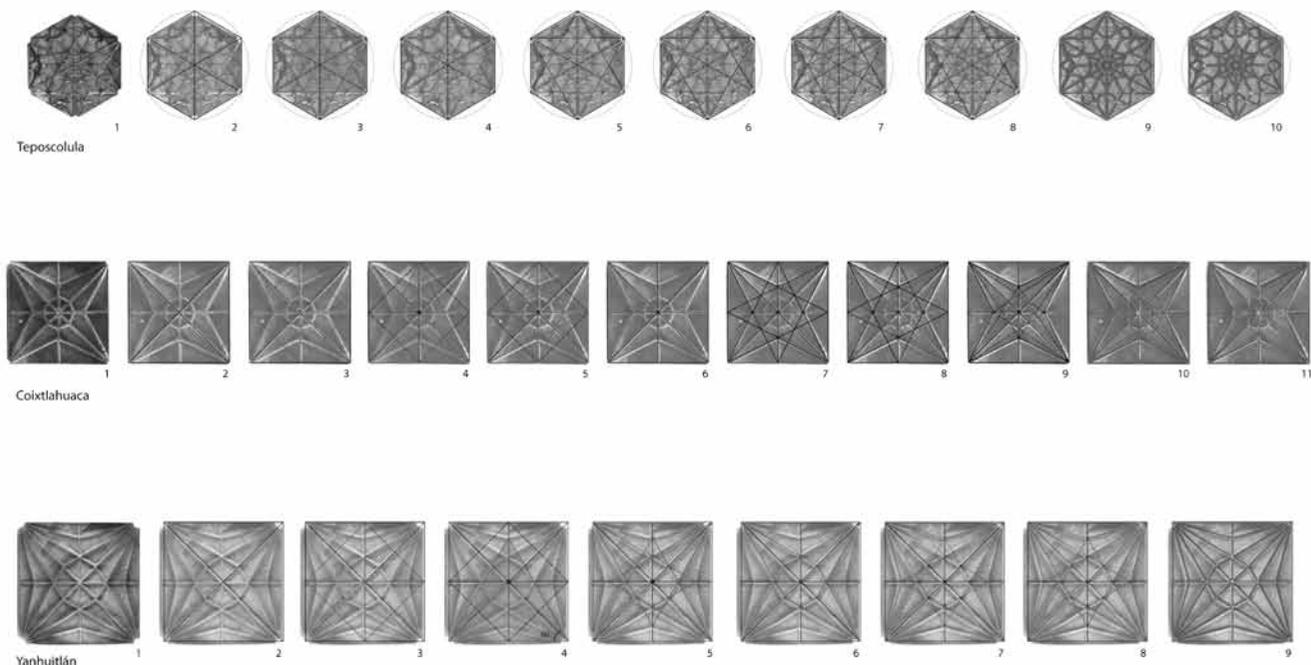
Las geometrías de trazo de las bóvedas renacentistas de la Mixteca Alta de Oaxaca

Los edificios de la Mixteca Alta de Oaxaca fueron construidos entre 1535 y 1580 con la tecnología más avanzada en su momento. Estos edificios monumentales fueron cubiertos con refinadas bóvedas "modernas", es decir, bóvedas nervadas renacentistas.⁷ Para elaborar el estudio que aquí se presenta se hizo un registro de las bóvedas utilizando un escáner láser. Las nubes de puntos que arrojó el escaneó se procesaron para poder ser leídas en el programa computacional Rhinoceros 3D

donde se realizaron todas las manipulaciones para el análisis.⁸ De esta manera se obtuvo que las bóvedas de las iglesias en Coixtlahuaca y Yanhuitlán son de planta cuadrada y cubren un claro de 12.5 y 14 metros respectivamente. La capilla abierta de Teposcolula aloja al centro una bóveda nervada de 12 metros de luz (arco diagonal) que se desplanta sobre una base hexagonal.

La volumetría de la bóveda de San Juan Bautista Coixtlahuaca proviene de un principio muy simple: cada uno de sus arcos se trazó de manera individual tomando como consideración su cenit plano. Pero veamos a la bóveda primero en su proyección horizontal, como lo hacen los tratados de construcción antiguos. Sobre esta proyección se deduce que los terceletes se trazaron tirando una línea que va de dos vértices de uno de los lados del cuadrado, al punto medio de su lado opuesto. El punto de intersección de los terceletes con el arco rampante se toma como vértice de un nuevo triángulo cuya base está formada por el lado del cuadrado de origen, los lados de este triángulo más pequeño son tangentes al círculo que forma del anillo al cenit de la bóveda. Los arcos de esta bóveda en sección son escarzanos, sus centros están localizados aproximadamente a

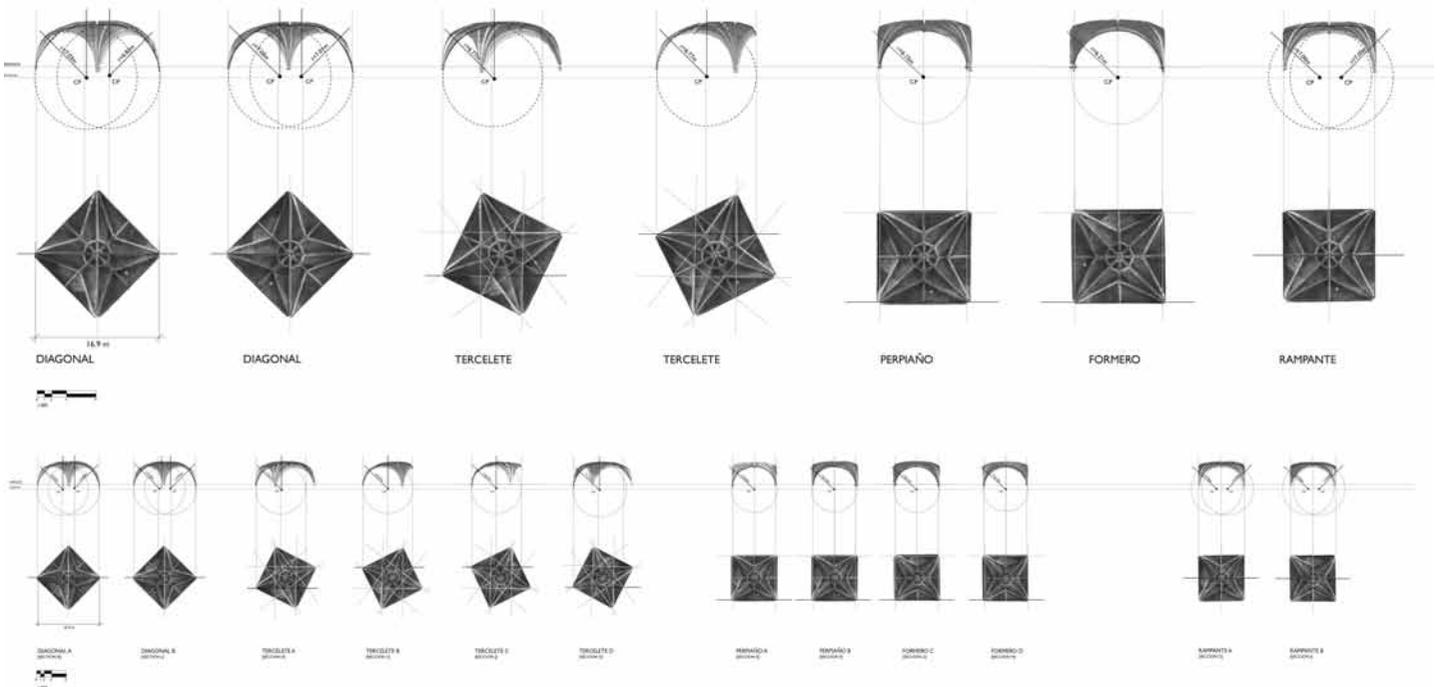
Es evidente que estas bóvedas mixtecas siguieron lineamientos de diseño que gravitaron alrededor del conocimiento técnico generado durante siglos en Europa



Trazos en proyección horizontal de las bóvedas de Coixtlahuaca, Yanhuitlán y Teposcolula usando la nube de puntos como base

1.5 m debajo del nivel de imposta para decrecer la altura de la bóveda.⁹ En esta misma proyección vertical se puede observar en la nube de puntos que los segmentos de nervadura entre el anillo y la clave describen una línea horizontal. De esta forma los arcos diagonales se trazaron dibujando un segmento de círculo que va desde el enjarje hasta su intersección con el anillo, cuyo radio es de 7 m. Los arcos terceletes describen una fracción de circunferencia de 6.75 m desde el enjarje hasta el punto donde se encuentra con el otro tercelete y el rampante, mientras que los arcos perpiaños y los formeros son casi de medio punto cuyo diámetro va de enjarje a enjarje (12.5 m). Los arcos rampantes simplemente unen los puntos obtenidos por los trazos elaborados anteriormente. El anillo al centro recuerda la bóveda propuesta por Vandelvira en su manuscrito, aunque este es posterior al momento cuando se concibieron y comenzaron a construir las bóvedas aquí estudiadas.

La nube de puntos arrojó información que muestra que los arcos de las bóvedas en Santo Domingo Yanhuitlán fueron concebidos como secciones de una superficie esférica. A simple vista se puede notar que los arcos perpiaños son apuntados y esto puede ser un poco engañoso, por otro lado, la presencia de la esfera podría sugerir que es una bóveda vaída. Veamos cuál es su geometría comenzando por la proyección horizontal. Esta bóveda también se emplaza sobre una planta cuadrada y tiene dos terceletes en cada paño.¹⁰ Comenzando con los terceletes más cercanos a los arcos diagonales (terceletes altos) encontramos que para trazar estos arcos en la proyección horizontal se dibuja un triángulo equilátero cuyos lados sean iguales a los del cuadrado que forma la base de la bóveda. Posteriormente, de este triángulo equilátero se toma el vértice que intersecta con el arco rampante y este punto define la posición de la clave que une el rampante con los terceletes bajos. Una característica importante es que el tercelete alto se continúa hasta que se encuentra con el diagonal y al hacer esto con cada tercelete se forma una especie de anillo con segmentos rectos alrededor de la clave. Viendo esta bóveda desde una proyección vertical (sección) se puede observar que la geometría de los arcos diagonales y terceletes responde a secciones verticales en una superficie esférica. De esta forma, los cruceros de 9.5 m de radio en su intradós dan dimensión a la esfera. Los terceletes altos tienen 9.14 m de radio y los terceletes bajos tienen 8 m. Los arcos formeros y perpiaños que son apuntados provienen de un recurso de trazo llamado "a la buelta de la diagonal", que era muy común en las bóvedas góticas.¹¹ Este procedimiento consiste en abatir uno de los arcos (diagonales o terceletes) hasta un plano paralelo o perpendicular a la nave. En Yanhuitlán el tercelete bajo se toma para generar la "buelta de la diagonal" y produce que los arcos perpiaños y formeros sean apuntados. El rampante simplemente une los puntos donde se fueron encontrando los arcos al intradós de la bóveda. La bóveda de Yanhuitlán podría considerarse de rampante llano que hereda su forma de la escuela toledana debido a sus nervaduras y ligaduras rectas. Los perpiaños y formeros apuntados muestran una solución más cercana al gótico clásico y es un recurso parecido al que sugiere Hernán Ruiz en su dibujo.¹²

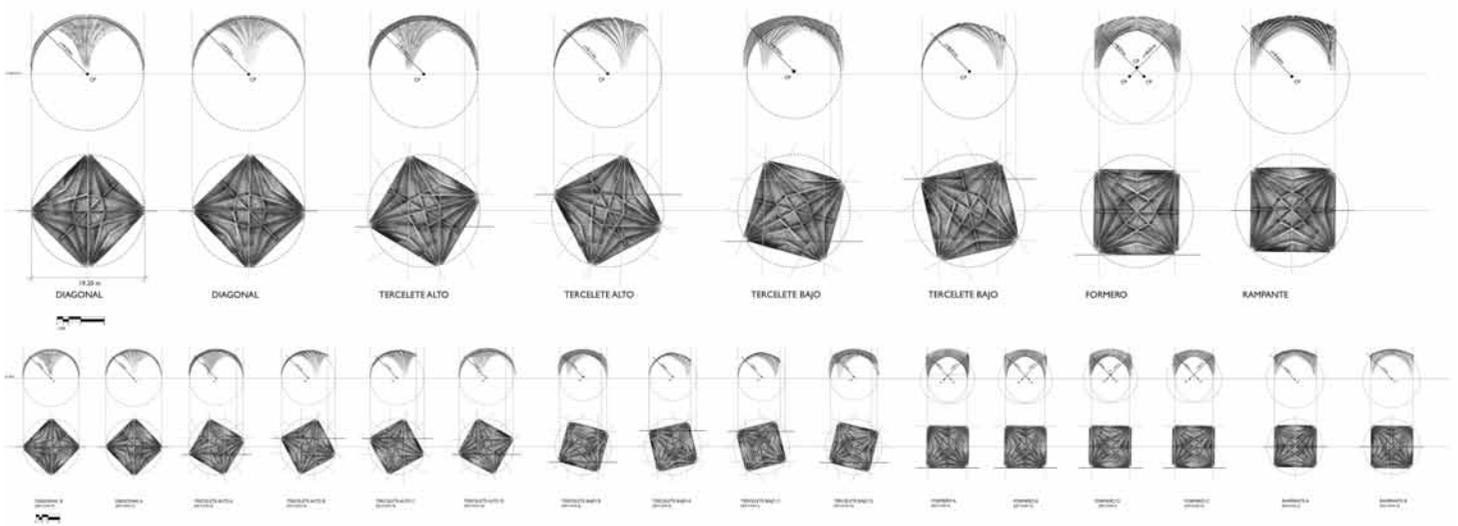


Sección de una de la bóvedas de la iglesia de Coixtlahuaca usando la nube de puntos. Los centros de los arcos se ubican a 1.5 cm debajo del nivel de imposta

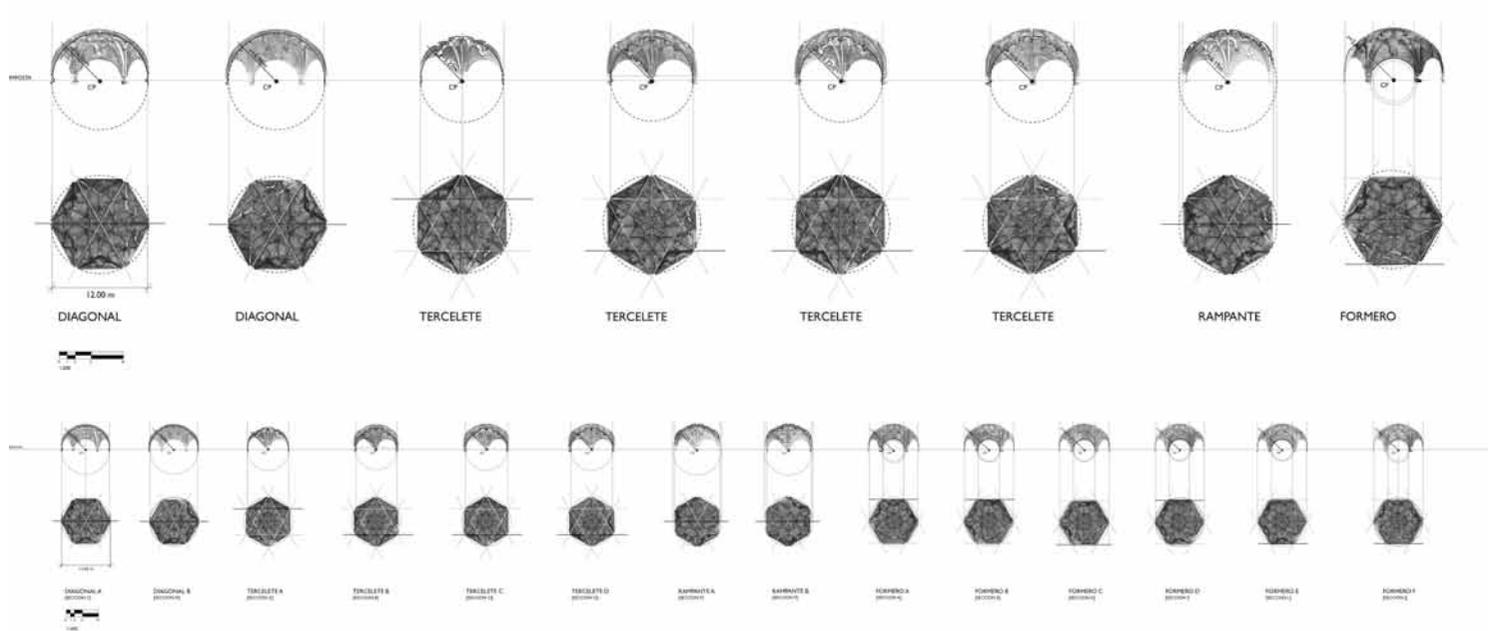
La bóveda de la capilla abierta en San Pedro y San Pablo Teposcolula fue concebida como una cúpula o como una vaída de seis tímpanos. La bóveda tiene un exuberante juego de nervios combados con cuadrifolios de conopeos que la vuelven muy semejante a la de la capilla del Santo Cristo de las Batallas de la catedral de Salamanca. Ambas bóvedas son contemporáneas, son esféricas, su mayor diferencia está en el número de lados que tiene el polígono sobre el que se desplantan. La planta hexagonal de la bóveda de Teposcolula la vuelve única en su tipo; hasta ahora no se ha encontrado otra en Iberoamérica. Los seis vértices definen tres arcos diagonales, tres rampantes y seis juegos de terceletes que se dibujan en la proyección horizontal tirando líneas entre los vértices del hexágono formando la estrella de David. Al ver la bóveda en la proyección vertical se deduce que los arcos diagonales son de medio punto con un radio de 6 m y definen en su intradós el radio de la superficie esférica donde se van a

desarrollar el resto de los arcos. De esta manera los rampantes son de 6 m de radio como los diagonales pues seccionan a la esfera pasando por el centro, y los arcos terceletes de 5.2 m de radio son resultado de la sección vertical de la esfera sobre el plano donde se desarrollan.

Una de las características más relevantes de esta bóveda en Teposcolula es el juego elaborado de nervios combados. Este tipo de ligaduras entre arcos es más decorativo que estructural, y como se ha dicho este recurso se intensifica en las bóvedas renacentistas cuando ya se tenía un dominio profundo de la técnica constructiva y de la labra de la piedra. Los métodos que utilizaban los maestros constructores del XVI para trazar arcos combados están aún por definirse con más claridad, pues los manuscritos no proveen mucha información al respecto. Sin embargo, se puede discernir que en la bóveda de Teposcolula hay dos tipos de trazo: combados que se obtienen con relativa facilidad desde el trazo en la proyección horizontal, y combados



Sección de una de las bóvedas de la iglesia de Yanhuatlán usando la nube de puntos. El radio del arco tercelete bajo y el formero son iguales



Sección de la bóveda de la capilla de Teposcolula usando la nube de puntos. La bóveda tiene una volumetría cupular

que se obtienen desde proyecciones verticales y oblicuas que son relativamente más complejos de trazar. Los combados que se definen en proyecciones oblicuas se deducen al encontrar puntos al intradós de la bóveda que definen planos donde se pueden trazar como segmentos de una circunferencia; su explicación detallada tendrá que esperar a un texto futuro.¹³ Los combados que se definen en la planta son dos: los que ligan los diagonales cruzando el rampante, y más cerca de la clave los que ligan los rampantes cruzando los diagonales. Para los primeros se traza un círculo tangente a la línea de los diagonales, que toma como centro el punto donde se encuentran los terceletes. Para los segundos se usa un método similar al anterior; el círculo que los define se encuentra al dibujar dos triángulos cuyos vértices coinciden con el punto donde se encuentran los terceletes; estos dos triángulos forman un hexágono más pequeño al interior. Los vértices de este hexágono más chico se usan como centros para trazar los círculos que a su vez son tangentes a las líneas que definen los rampantes.

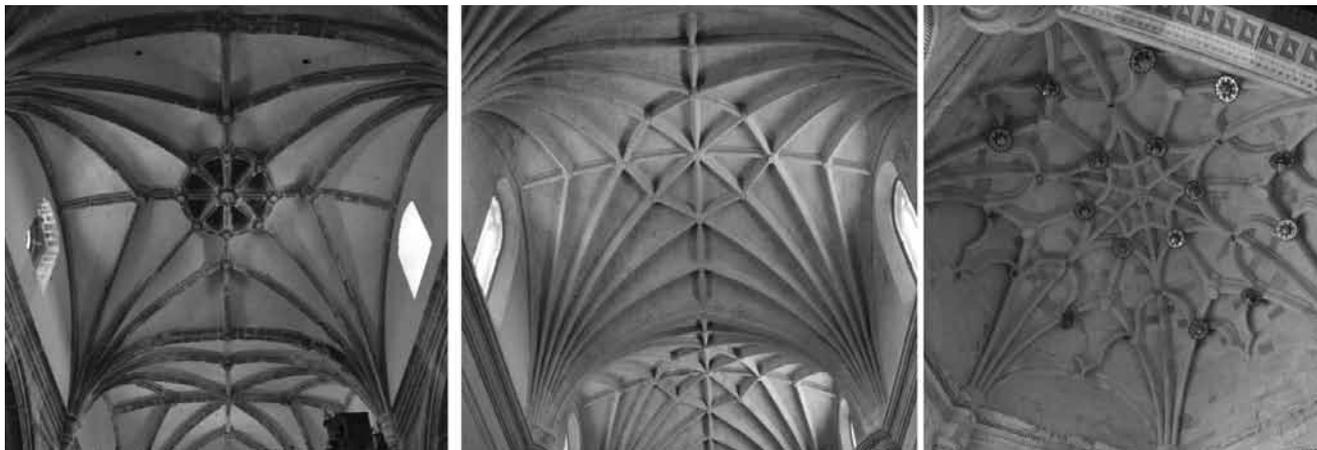
Conclusiones

Después de hacer una revisión de la volumetría se puede confirmar que existen diferencias sustanciales en las soluciones de trazo de cada una de las bóvedas. ¿Y esto a que nos lleva? Una de las conclusiones es que estas diferencias nos permiten deducir que aun con la proximidad geográfica e histórica que hay entre estos tres edificios, cada uno tuvo un arquitecto distinto, y no como se venía pensando que había sido uno solo

quien concibió los tres conjuntos monásticos.¹⁴ Otro aspecto importante es que este proceso de análisis ha hecho que los edificios mismos revelen, a través de su tecnología de la construcción, elementos que permiten inducir hechos históricos que tal vez jamás serán encontrados en los documentos de los archivos. Como si se hiciera un estudio forense, segmentos de circunferencia y superficies esféricas nos permiten concluir quiénes fueron los principales actores en la construcción de estas bóvedas mixtecas. Además, como buenos aprendices de este oficio, este análisis nos da una lección de cómo simples trazos pueden dar lugar a complejos entramados de elementos que además tienen propiedades estructurales.

Para finalizar, es evidente que estas bóvedas mixtecas siguieron lineamientos de diseño que gravitaron alrededor del conocimiento técnico generado durante siglos en Europa. Sin embargo, es muy importante recordar que los constructores de estas estructuras fueron los indígenas mixtecos que absorbieron la técnica y lograron manipularla con maestría en un periodo de tiempo relativamente corto. Esta transmisión de tecnología de Europa a México sugiere que en el siglo XVI se crearon nuevas formas de entender la disciplina del labrado de piedra, estableciendo variantes en los arquetipos y desarrollando complejas soluciones relacionadas a la geografía y al momento histórico. ■

Como si se hiciera un estudio forense, segmentos de circunferencias y superficies esféricas nos permiten concluir quiénes fueron los principales actores en la construcción de estas bóvedas mixtecas



Imágenes de las bóvedas de Coixtlahuaca, Yanhuitlán y Teposcolula

Notas

- George Kubler, *Arquitectura Mexicana del Siglo XVI*, México, Fondo de Cultura Económica, 1983, p. 268. Kubler menciona que en su investigación sólo pudo encontrar 15 templos en México construidos con bóvedas nervadas. También menciona que otros templos que en documentos históricos se describen con bóvedas de lacería no mostraron cubiertas de este tipo al momento de su investigación. Kubler sugiere que estos edificios sufrieron transformaciones debido a reparaciones y derrumbes originados por movimientos sísmicos.
- Entre los más conocidos están los trabajos de Eugène Viollet-le-Duc, John Fitchen, Robert Willis, Roland Bechman, entre otros.
- Jose Carlos Palacios, *La Cantería Medieval, La Construcción de la Bóveda Gótica Española*, Madrid, Munillalera, 2009, pp. 77-87. En este trabajo se presenta una reseña de los métodos de trazo de las crucerías.
- Jose Carlos Palacios, *Trazas y Cortes de Cantería en el Renacimiento Español*, Madrid, Munillalera, 2003, pp. 287-321.
- Enrique Rabasa, *Forma y Construcción en Piedra, de la Cantería Medieval a la Estereotomía del Siglo XIX*, Madrid, Akal, 2000, pp. 183-188.
- Con respecto a la sección de las nervaduras y arcos, las tres bóvedas siguen en general las recomendaciones de Rodrigo Gil de Hontañón dando diferente peralte a las nervaduras y mayor espesor a los perpiaños. Coixtlahuaca se desprende un poco y sigue los preceptos de Juan de Ávala usando la misma sección en todos los nervios, aunque el perpiaño es más grueso. En cuanto al trazo de los arcos, en cada una de las bóvedas varía, mientras Teposcolula tiene todos los centros en la línea de las impostas, Coixtlahuaca los mueve hacia abajo y Yanhuitlán sólo usa este artificio para los perpiaños.
- Palacios, *op. cit.*, pp. 69-76.
- Para este estudio se seleccionó una bóveda de la iglesia de Yanhuitlán, una de la iglesia de Coixtlahuaca y para Teposcolula, la única existente. Para el registro se usó un escaneo láser. Las nubes de puntos obtenidas por el escaneo se procesaron para obtener los datos que fueran útiles para el análisis, de este modo, las nubes de puntos se transformaron para ser leídas en el programa Rhinoceros 3D usando un *plug-in* llamado *pointools for Rhino*. Este tipo de *software* permitió manipular las nubes de puntos haciendo secciones a través de las bóvedas y las nervaduras dando la oportunidad de encontrar la forma de los arcos. La moldura de las nervaduras y las geometrías de claves y dedales también se obtuvieron por estos modelos digitales. Su explicación detallada excede los alcances del presente texto. Las nubes de puntos se visualizaron tomando la proyección horizontal, sobre estas imágenes se tomaron los ejes de las nervaduras y se logró obtener los datos necesarios para determinar las líneas rectoras que definen la geometría en planta. Los trazos se realizaron en el intradós pues se notó que los enjarjes están consistentemente circunscritos en un círculo. Posteriormente se hicieron múltiples secciones verticales sobre las nubes de puntos encontrar la geometría de cada uno de los arcos.
- En la sección del edificio dibujada a través de la información obtenida por la nube de puntos se muestra que la bóveda que precede el altar es más alta que las demás, seguramente este fue el motivo por el cual se decidió construir el resto de las bóvedas de la nave con arcos escarzanos.
- Como se distinguió es una bóveda de doble tercelete en una planta cuadrada, lo que resulta curioso pues la mayoría de las bóvedas de doble tercelete son de planta rectangular y el doble tercelete se usa con el fin de dividir el paño más largo de plementería por razones estructurales.
- Palacios, *op. cit.*, p. 100.
- Enrique Rabasa, *Actas del Primer Congreso Nacional de Historia de la Construcción*, Madrid, 1996, p. 427.
- Como se ha notado anteriormente los nervios combados que ligan las claves de los terceletes con los cruceros y los que ligan las mismas claves con la clave del formero encuentran su solución en el alzado. Sin embargo, se puede mencionar de manera general que para trazarlos se requiere encontrar los dos puntos donde parten (clave del tercelete) y el punto donde cruzan con los arcos (cruceros o formeros) estos tres puntos definen planos inclinados sobre los que se pueden trazar segmentos de circunferencia. Estos arcos que se desarrollan sobre los planos inclinados dan forma a los combados. También es necesario mencionar que se encontró que la sección de estos combados es de molde revirado sin que lleguen a ser completamente verticales ni tampoco perpendiculares al plano donde se desarrollan.
- Inclusive otros estudios realizados por el autor y que se concentran en la estereotomía de la piedra arrojan conclusiones similares. Robert J. Mullen, *La arquitectura y la escultura de Oaxaca, 1530's a 1580's*, México, 1994. Mullen propone que Fray Francisco Marin estuvo a cargo de la construcción de los tres conjuntos monásticos de la Mixteca.