

ESTUDIOS DE ESTEREOTOMÍA DIGITALIZADA: ESCANEADO LASER Y MODELOS DIGITALES PARA LA CONSERVACIÓN DE BÓVEDAS NERVADAS DEL SIGLO XVI EN OAXACA, MÉXICO.

IBARRA SEVILLA, Benjamín

University of Minnesota, ibarr002@umn.edu

RESUMEN

La tecnología digital es una herramienta que cada vez nos resulta más común para el registro del patrimonio cultural. Instrumentos como el escáner láser y modelos como las nubes de puntos son muy útiles para documentar los inmuebles con detalle. Aún cuando la tecnología nos facilita el registro del patrimonio inmueble, el reto es utilizar los datos de manera productiva, usándolos para aportar datos técnicos concretos que ayuden a evaluar el estado de conservación y determinar estrategias adecuadas para la salvaguarda de los edificios o monumentos. Esta investigación muestra el uso de la tecnología digital en combinación con los principios de la estereotomía de la piedra y la estabilidad de estructuras de fábrica. Para ello, el autor se ha enfocado en tres bóvedas construidas en el siglo XVI en Oaxaca, México. Esta contribución pretende exponer cómo el uso de la tecnología digital para la documentación, en combinación con técnicas ancestrales de construcción, puede ser útil para evaluar elementos constructivos y establecer estrategias de conservación; especialmente cuando se trata de bóvedas y otras estructuras hechas con piedra.

1. CONTEXTO HISTORICO

Los tres edificios en que se enfoca este estudio se construyeron entre 1535 y 1580 en la región llamada "la Mixteca", y ellos son: Santo Domingo Yanhuitlán, San Juan Bautista Coixtlahuaca y San Pedro y San Pablo Teposcolula. Durante la concepción de las iglesias los constructores hicieron énfasis en las cubiertas, materializando variadas soluciones de bóvedas nervadas cuya traza y ejecución están claramente vinculadas al arte hispano de construir en piedra.

1.1 COIXTLAHUACA, YANHUITLAN Y TEPOSCOLULA; DE SEÑORIOS A VICARIAS Y CONVENTOS

Se puede decir que la conquista de América por los españoles fue una continuación de lo que venía sucediendo en la península ibérica durante finales del siglo XV. Las estrategias de evangelización estaban bien establecidas, y así, frailes de las órdenes mendicantes se dieron a la tarea de orquestar la conversión de los indígenas americanos al cristianismo. Algunos edificios, como las capillas abiertas se inventaron para dar cabida a un gran número de indígenas a cielo abierto mientras el sacerdote celebraba la ceremonia católica debajo de un sitio techado. Iglesias o templos tradicionales también se construyeron para los migrantes de Europa, pensando que no pasaría mucho tiempo para que los indígenas aceptaran entrar y celebrar la ceremonia religiosa dentro de un edificio. Los frailes dominicos llegaron a territorio Mexica hacia 1526, para 1534 ya había frailes repartidos en los principales pueblos de la región

Mixteca y Zapoteca (ahora estado de Oaxaca). Los frailes se desarrollaron dos tipos de conjuntos monásticos, los conventos urbanos y las vicarías de indios. Los conventos fueron grandes centros de educación para españoles y sus hijos, donde también se evangelizaron los indígenas que convivían en las villas españolas. Por otro lado, las vicarías fueron centros de "evangelización rural" que cubrían una zona indígena, delimitada generalmente por cacicazgos establecidos durante el postclásico mesoamericano.

Antes de la llegada de los españoles Coixtlahuaca, Teposcoula y Yanhuitlán constituían tres señoríos importantes de la Mixteca. Cada uno de estos señoríos estaba regido por su propio cacicazgo, la comunidad se componía de más de un asentamiento y su territorio estaba bien delimitado. Los colonizadores tomaron ventaja de esta organización social y negociaron con las autoridades locales, refundaron los pueblos y construyeron grandes iglesias. Coixtlahuaca y Teposcolula eran poblaciones fundamentalmente comerciales, grupos de indígenas se congregaban en ambos lugares para intercambiar productos. Los dominicos decidieron entonces que estas dos comunidades serían vicarías. Por otro lado, Yanhuitlán era un centro religioso mixteco, por lo que se convirtió en un convento con énfasis en los frailes y estudios religiosos. El tamaño de los edificios sugiere que su construcción debió haber representado un enorme esfuerzo, físico y económico, para cada una de estas comunidades mixtecas.

1.2 CARACTERISTICAS ARQUITECTONICAS

Los conjuntos monásticos de San Juan Bautista Coixtlahuaca y Santo Domingo Yanhuitlán son dos edificios distintos que comparten algunas de sus características. Ambos conjuntos se encuentran emplazados sobre grandes atrios-plataformas y en ambos el templo ocupa la parte norte mientras que el monasterio se adosa al sur. La planta de los dos templos dibuja una sola nave, como es común para iglesias del siglo XVI; ambas iglesias están cubiertas con bóvedas nervadas construidas a la manera gótica; es decir, con nervaduras que trabajan estructuralmente (Fig. 1 y 2). Dentro de las iglesias cada una de las bóvedas se desplanta sobre un cuadrado, lo que implica que la nave se divide en partes iguales proporcionando el largo con el ancho en una relación de 4:1 aprox. El culto religioso cristiano, como lo conocemos, es uso al que se destinaron ambos edificios.

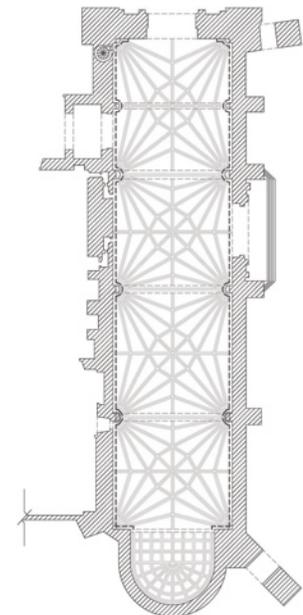
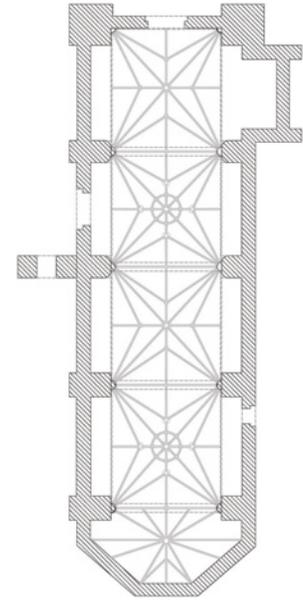


Fig .1 y 2. Plantas de los templos de Coixtlahuaca (arriba) y Yanhuitlán (abajo)

La Capilla Abierta de San Pedro y San Pablo Teposcolula es un edificio único en su tipo que también forma parte de un conjunto que incluye iglesia y monasterio. Muchas de las capillas abiertas en México tuvieron carácter temporal, pero la de Teposcolula se construyó como un monumento con un carácter permanente. Podría decirse que este edificio es también de una sola nave, sin embargo esta nave se abre por el lado largo, como un gran escenario que se contempla desde la distancia (Fig. 3). Siguiendo un esquema simétrico, la capilla aloja una bóveda nervada grandes dimensiones al centro que se desplanta sobre una base hexagonal. Los espacios a cada lado de la bóveda se cubren con un sistema de vigas de madera y techos de terrado. Prácticamente todos los elementos portantes de la capilla son columnas, generando una planta abierta y sólo un muro sólido en la parte posterior sirve como telón de fondo y como refuerzo a la estructura.

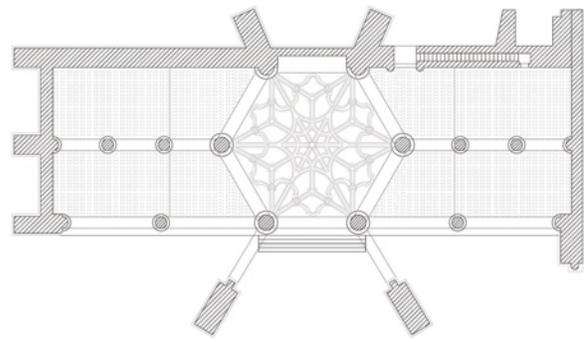


Fig. 3. Planta de la capilla abierta de Teposcolula

El diseño de los edificios revela los preceptos arquitectónicos hispanoamericanos del siglo XVI, los cuales fueron inspirados por ideas vanguardistas del renacimiento. Las bóvedas que los cubren se construyeron siguiendo la tradición del a cantería renacentista española, misma que tiene sus raíces en el gótico europeo (Fig. 4, 5 y 6). Los monumentos son testimonio del momento de contacto entre las dos culturas y de la transmisión de tecnología que se dio en esta región.

2. METODOLOGIA DE DOCUMENTACION Y ANALISIS

Para este estudio se selecciono una bóveda de la iglesia de Yanhuatlán, una de la iglesia de Coixtlahuaca y para Teposcolula, la única existente. Para elegir las bóvedas a estudiar en las iglesias de Yanhuatlán y Coixtlahuaca se usaron tres criterios:

1. acceso visual a la bóveda, tratando de evitar las "sombras"
2. características de la bóveda que incluyeran los elementos necesarios que permitieran el análisis



Fig. 4 y 5 . Bóvedas de Coixtlahuaca (arriba) y Yanhuatlán (abajo).

como bóveda "tipo"

3. aportación de elementos necesarios para evaluar los problemas de conservación

En la inspección inicial se llegó a la conclusión de que las bóvedas fueron construidas usando el sistema que se basa en nervaduras portantes y los espacios entre ellas se llenan con plementería de piedra. Se tomó como premisa que las soluciones constructivas son homogéneas, que los constructores siguieron los mismos métodos y que se adoptaron soluciones similares para cada uno de los problemas constructivos.

Para la documentación de los edificios y sus bóvedas se uso un escaneo láser como punto de partida. Las nubes de puntos obtenidas por el escaneo se procesaron para obtener los datos que fueran útiles para el análisis. Como punto de partida se "limpió" la nube de puntos para visualizar las bóvedas individualmente y se generaron varios tipos de archivos. Posteriormente se procedió a transformar las nubes de puntos para ser leídas en NURBS (*Non-uniform rational basis spline* por sus siglas en inglés) ya que este tipo de software (Rhino) es adecuado para modelar superficies complejas (Fig. 7).

Para leer las nubes de puntos en el ambiente de Rhino se uso 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. Trabajar simultáneamente la nube de puntos y la las nervaduras modeladas en Rhino dio la oportunidad de comprobar la forma de las nervaduras modeladas y sus piezas con la geometría obtenida por la nube de puntos. Las secciones en la nube de puntos permitieron también definir la moldura de las nervaduras y las dimensiones de las claves y otros encuentros de los arcos (fig 8).

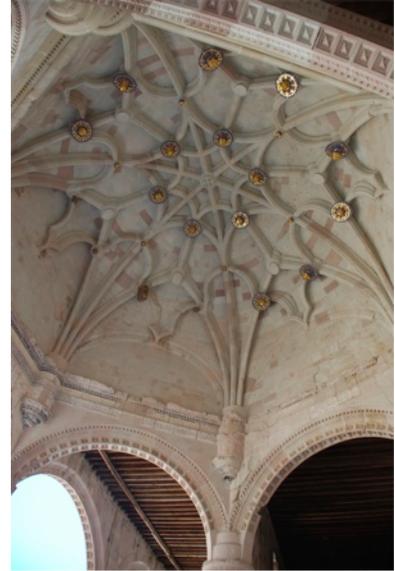


Fig.6. Bóveda de Teposcolula

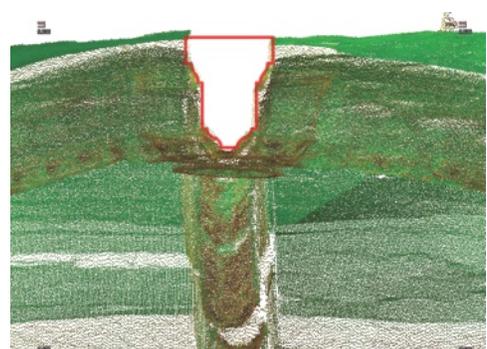
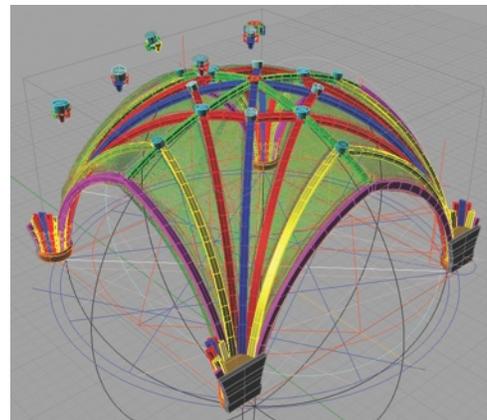


Fig.7. Nube de puntos y modelado en el sistema NURBS.

Fig. 8. Sección de la moldura obtenida a través de la nube de puntos

3 GEOMETRIA DE LAS BOVEDAS Y SOLUCIONES CONSTRUCTIVAS

3.1 TRAZADO HISTORICO DE BOVEDAS

Volviendo a los orígenes de las bóvedas nervadas nos encontramos con varios documentos españoles que nos muestran los procedimientos que se realizaban para su diseño. Jose Carlos Palacios [1] y Enrique Rabasa [2] han demostrado en su riguroso análisis como el dibujo en el manuscrito de Alonso de Vandelvira (1560) traza primero una serie de líneas definiendo la proyección en planta uniendo los vértices de un cuadrado y después, en una proyección vertical, dibuja cada uno de las nervaduras como arcos independientes (Fig. 9). Rabasa y Palacios coinciden en que ésta era procedimiento que los constructores del renacimiento español usaban para diseñar las bóvedas. Estos simples dibujos a base de líneas arrojaban los datos suficientes para iniciar la construcción, después vendría la definición de las piezas y su estereotomía, lo que requería de un proceso relativamente más complejo. Este método de trazado resulta muy útil para entender la geometría que genera la forma.

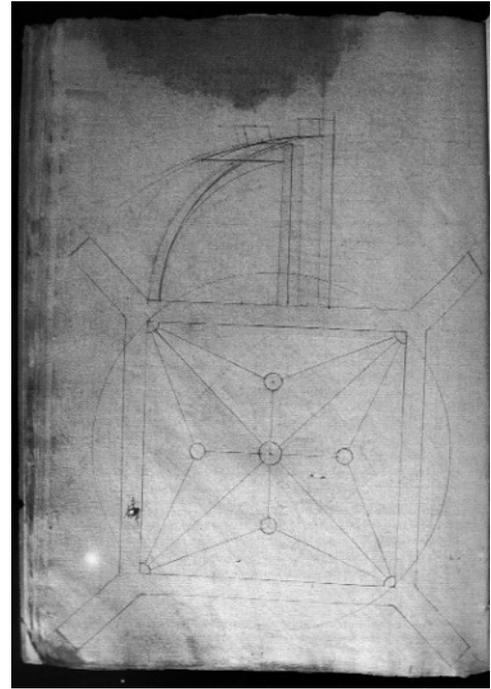


Fig.8. Trazado de una bóveda nervada en el tratado de Jose de Vandelvira. Cortesía de E. Rabasa

3.2 RECONSTRUCCION DEL TRAZADO DE LAS BOVEDAS

Tomando la nube de puntos en planta, se siguió una metodología que recrea el proceso de diseño que debieron haber seguido los maestros constructores de las bóvedas mexicanas. Las nubes de puntos se visualizaron tomando la proyección horizontal (planta) como punto de partida, sobre estas imágenes se tomaron los ejes de las nervaduras. De esta forma se logró obtener los datos necesarios para determinar las líneas rectoras que definen la geometría en planta.

Las soluciones de trazo para Yanhuatlán y Coixtlahuaca se basan en el cuadrado, mientras que la de Teposcolula se basa en el hexágono. Aun cuando cada bóveda es distinta, se puede decir que en general las líneas que van entre los vértices de los polígonos da lugar a los nervios diagonales mientras que las líneas que unen los puntos medios de los catetos de los polígonos definen los rampantes. Tomando estos trazos generales como punto de partida para las bóvedas de planta cuadrada, se tiran líneas que salen de los vértices donde se unen los rampantes con los formeros y perpiaños, formando triángulos que dan lugar a los nervios terceletes. En el caso del la planta hexagonal, los terceletes se forman dibujando líneas entre los vértices próximos (formando la estrella de David). Siguiendo un proceso similar de trazado se obtienen

los nervios combados, para estos nervios el proceso es más refinado en cuanto a la relación entre las líneas y los polígonos (Fig. 10).

Por otro lado la nube de puntos arroja datos sobre los arcos en alzado. Cada uno de los arcos (diagonales, terceletes, perpiaños y formeros) se analizó individualmente haciendo una sección sobre un plano paralelo al arco a analizar, de esta forma se encontraron, por un lado, la geometría de la bóveda y sus particularidades, y por otro, las deformaciones existentes de los arcos.

3.3 CLAVES, NERVADURAS Y PLEMENTERIA

Como se sabe, la tradición gótica labraba las claves verticales, mientras que en el renacimiento las claves se tallan verticales o apuntando hacia el centro del arco en el que se encuentra. Esta práctica renacentista para la geometría de las claves se define dependiendo del tipo de intersección y de la posición de la pieza dentro de las bóvedas. Una constante entre las bóvedas analizadas es que existe una clave para cada una de las articulaciones donde se encuentran las nervaduras. Claves en la intersección del rampante y formero solo existen en Coixtlahuaca. Como se pudo comprobar a través de las secciones en las nubes de puntos, la solución estereotómica de las claves en estas bóvedas varía según la posición de la pieza, según la bóveda y según el tipo de intersección. Los datos arrojados reflejaron lo siguiente:

- Las claves en Coixtlahuaca son fundamentalmente verticales debido a su posición en la bóveda (muy cerca del zenit) y al tipo de intersección que se genera entre las nervaduras.
- Las claves en Yanhuitlán varían, la intersección entre el tercelete bajo y el rampante y la intersección entre el diagonal y el tercelete alto es por medio de una clave cuyo eje se dirige hacia el centro de la bóveda mientras que el resto de las claves son verticales (Fig. 11).
- Las claves en Teposcolula varían: las claves que se encuentran en la intersección de los combados con los terceletes apuntan hacia el centro del arco tercelete

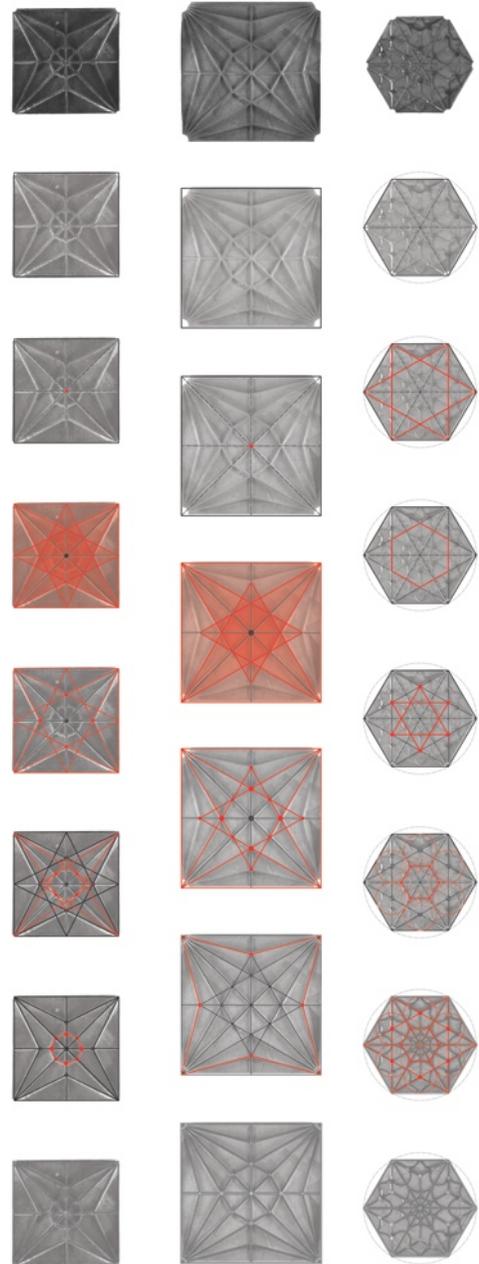


Fig.10. Recreación de los trazos de las bóvedas en planta

mientras que el resto de las claves son verticales (las claves en las intersecciones entre los combados y los diagonales están tan cerca del zenit que no habría mucha diferencia entre una vertical y la clave apuntando al centro del arco diagonal).

La sección de las nervaduras en las tres bóvedas es relativamente semejante (Fig. 12). Las secciones tienen entre 30 y 45cm de peralte sin contar la cola. Generalmente se distingue entre la nervadura diagonal o rampante y la nervadura de los terceletes por su sección, siendo las primeras mas peraltadas que las segundas.

La plementería de las bóvedas de Yanhuítlán y Coixtlahuaca está hecha con sillares de piedra de pequeñas dimensiones. Las hiladas viajan perpendiculares a la bisectriz entre las dos nervaduras que las soportan, es decir, casi perpendiculares a las nervaduras. En el caso de Teposcolula, la plementería sigue una disposición similar, semejante a la de una cúpula, debido a que las nervaduras prácticamente dibujan una esfera al intradós.

4. ANALISIS DE ALTERACIONES EN LA GEOMETRIA DE LOS ARCOS

La bóveda de la iglesia de Coixtlahuaca que se utilizo para este estudio muestra que los arcos diagonales y terceletes presentan ligeras distorsiones en su forma. Por otro lado, las secciones por los arcos perpiaños demuestran que su geometría se ha transformado a través del tiempo, observando que la zona alta del arco dibuja una circunferencia discontinua (Fig. 13). Como se nota en el perfil de la sección del arco, se presenta unas dovelas se han "saltado", lo que significa que han desalineado de la circunferencia ligeramente (Fig. 14).

La bóveda analizada para la iglesia de Yanhuítlán muestra arcos con deformaciones mínimas, sobre todo en los diagonales y terceletes. Nuevamente, la información obtenida por las secciones hechas en la nube de puntos demuestra que los arcos perpiaños son los que más distorsiones tienen en su geometría. Haciendo un análisis comparativo de las secciones de los arcos formeros y los arcos perpiaños (dando por entendido que siguen la misma geometría) se puede distinguir que los últimos han sufrido de movimientos. Independientemente de estos arcos, las distintas secciones sobre las nervaduras no muestran deformaciones significantes (Fig. 15).

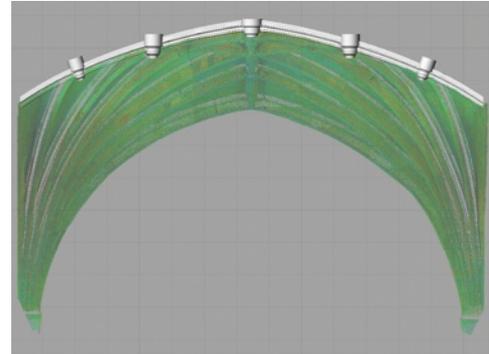


Fig.11. Definición de las posiciones de las claves por la nube de puntos y NURBS

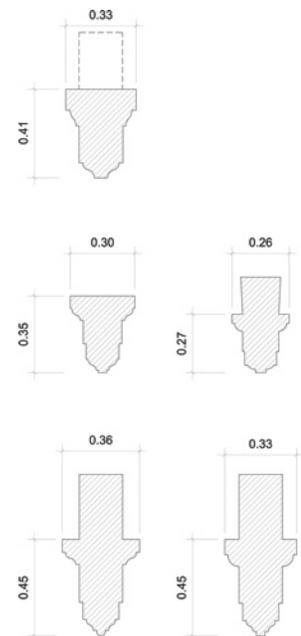


Fig.12. Molduras de las nervaduras, de arriba a abajo: Coixtlahuaca, Yanhuítlán y Teposcolula

Las secciones hechas en la nube de puntos de la bóveda Teposcolula muestran deformaciones mínimas en los arcos diagonales, terceletes y rampantes (Fig. 16). Las condiciones son distintas comparándose con las dos iglesias mencionadas anteriormente, en esta bóveda no hay arcos perpiaños, todos los arcos perimetrales son formeros soportados por los tímpanos, lo que minimiza su trabajo estructural ya que no están cubriendo ningún claro. En este caso los arcos diagonales son los que cubren el claro de la bóveda y son los que estarían más susceptibles a movimientos o deformaciones, sin embargo los arcos tienen una geometría bien definida.

5. EVALUACION DEL ESTADO DE CONSERVACION

5.1 MARCO TEORICO

Según la teoría del análisis límite de estructuras de mampostería propuesto por Jacques Heyman [3] y revisado por Santiago Huerta [4] los elementos de las bóvedas se deben considerar como bloques indeformables en contacto seco y directo que se sostienen por su propio peso. En esta teoría los materiales de estas estructuras son rígidos, resistentes a compresión y no a tensión, también asume que el rozamiento entre las piedras es suficientemente alto como para impedir el deslizamiento. Según Huerta [5], los principios de este análisis se resumen de la siguiente manera:

- la mampostería presenta una resistencia a compresión infinita
- la mampostería no tiene ninguna resistencia a tensión
- el fallo por deslizamiento es imposible

Los criterios de diseño de cualquier estructura se basan en la resistencia, la rigidez y la estabilidad. En una estructura de mampostería, como lo son las bóvedas de este estudio, el problema se reduce a estabilidad ya que las tensiones son muy bajas y las deformaciones son mínimas. El criterio de la estabilidad pone en primer plano la geometría de los elementos que conforman la estructura de mampostería, es esta misma geometría la que viabiliza la trayectoria de los esfuerzos dentro de los límites del elemento estructural. De acuerdo con esta forma de analizar las estructuras de mampostería los

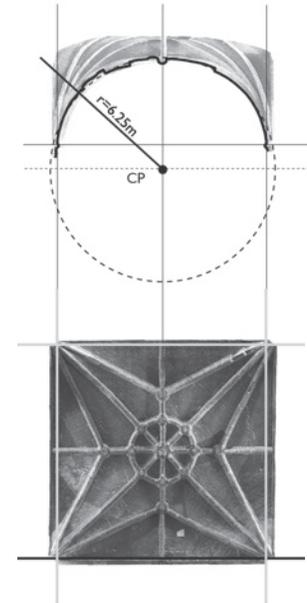


Fig. 13. Bóveda de Coixtalhuaca, deformación del arco perpiaño.

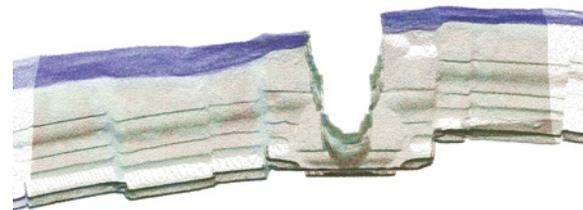


Fig.14. Nube de puntos bóveda de Coixtalhuaca, "saltado" de dovelas en arco perpiaño.

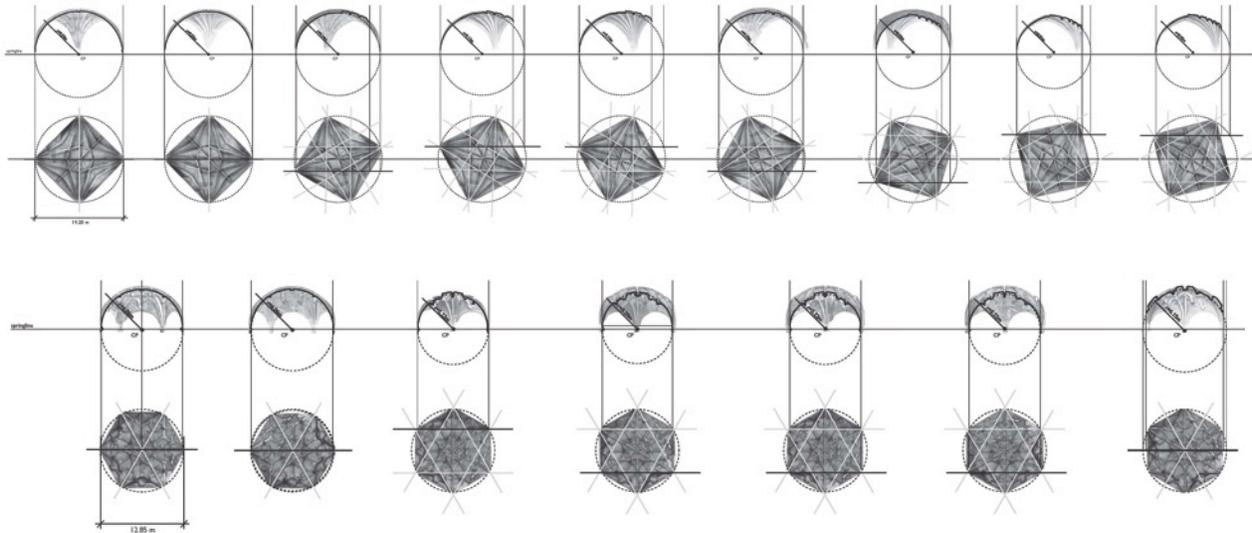


Fig. 15 y 16. Secciones de los arcos para las bóvedas de Yanhuitlan (arriba) y Teposcolula (abajo).

agrietamientos y movimientos son naturales en materiales puesto que no resisten tensiones y no se pueden deformar. Aun cuando existan grietas y deformaciones en las bóvedas las líneas de empuje o esfuerzos se mantienen dentro de los límites del elemento y por lo tanto su estabilidad está asegurada.

5.2 EVALUACION DEL ESTADO DE CONSERVACION

De acuerdo con la teoría del análisis límite de las estructuras de mampostería la forma de los elementos estructurales es fundamental para la garantizar la estabilidad de los edificios. Tomando como punto de partida esta teoría se puede entonces analizar las condiciones de estabilidad de las bóvedas de Coixtlahuaca, Yanhuitlán y Teposcolula. Para poder comenzar con las evaluaciones del estado de conservación de las bóvedas desde el punto de vista forma-estructura es necesario asumir que los muros y los contrafuertes mantienen tanto su sección como su integridad estructural, siendo capaces de soportar los empujes de las bóvedas y llevar las líneas de esfuerzos a la vertical para luego descargarlas en el terreno.

Si se unifican la teoría del análisis límite (que se fía de la estabilidad) y la geometría de los arcos analizados (capaces de contener la líneas de esfuerzos dentro de sus limites) se puede afirmar que las bóvedas son estables y que su estado de conservación es bueno. Como se ha demostrado anteriormente al analizar las secciones obtenidas de las nubes de puntos de las bóvedas, la relación entre la geometría de trazado y la geometría de los elementos en su actual estado de conservación no son muy diferentes. En general se puede observar que los nervios diagonales preservan su forma lo mismo que los nervios terceletes, las secciones muestran ciertas deformaciones que nos significativas cuando se analizan en el contexto de la bóveda y la luz que cubren los arcos.

Los arcos perpiaños mostraron en general mayores deformaciones en ambas iglesias y una evaluación superficial podría proponer que se encuentran en riesgo. Como se pudo observar, cuando se seccionan estos arcos la línea que define su curvatura por lo general no es continua. Lo que estas deformaciones hacen suponer es que el impacto de movimientos telúricos ha afectado estos arcos principalmente. Una razón puede ser la proporción de la nave (4:1 aprox.), que la hace más resistente a fuerzas horizontales en el sentido longitudinal que en el transversal aun cuando hay contrafuertes. Es muy probable que los arcos se hayan tenido que deformar para adaptarse a estos movimientos y como no son elásticos no recuperaron su forma original. No obstante esta deformación, la geometría de los arcos es suficiente para que la línea de esfuerzos se mantenga dentro de los límites de la sección de las dovelas garantizando la estabilidad del arco mismo y por lo ende las bóvedas que soporta.

6. ESTRATEGIAS DE CONSERVACION

Con en análisis elaborado a las bóvedas se deduce que se encuentran en buen estado de conservación. Las bóvedas de Teposcolula y Yanhuitlán han sido restauradas y consolidadas recientemente. Mirando las bóvedas de Coixtlahuaca se pudo observar que las bóvedas han sido consolidadas años atrás pero no han tenido ninguna intervención reciente. La inspección visual permite comprobar que ninguna de las bóvedas presenta algún tipo de filtraciones de agua por lo que se considera que la cubiertas son impermeables .

Las recomendaciones a seguir para salvaguardar la estabilidad de las bóvedas es la siguiente:

- I. Mantener en buen estado el extradós de las bóvedas con una capa impermeable y mantener los sistemas de drenaje de aguas pluviales.
- II. Mantener en buen estado la impermeabilidad de los muros y contrafuertes.
- III. Hacer inspecciones visuales de las bóvedas cada dos años o después de un sismo de magnitudes considerables verificando:
 - a. Perdida o "salteado" de piezas en los arcos y nervaduras
 - b. Perdida de piezas de la plementería que demuestren ser debido a perdida o deformaciones sustanciales en las nervaduras.
 - c. La verticalidad de los muros
- IV. En caso de que se pierdan piezas en los arcos de las nervaduras será necesario:
 - a. Si las piezas tienen "cola" y esta cola permanece dentro de la plementería entonces la bóveda no está en riesgo mayor, (hay numerosos casos en que se pierde la sección baja de la nervadura si que se afecte su estabilidad) pues el arco sigue trabajando y la plementería está ayudando. Sin embargo se recomienda hacer un "injerto" en la nervadura de modo que se restituya la sección total del arco.
 - b. Si la pieza no tiene "cola" entonces el arco de la nervadura puede estar en riesgo aunque no necesariamente la bóveda en su totalidad. Esto se debe a que la plementería que pasa por arriba de la nervadura es continua y está trabajando estructuralmente. Se recomienda restituir la nervadura lo más

- pronto posible para recuperar la continuidad del arco y evitar su posible colapso.
- c. Si la pieza que se ha perdido tenía cola y se ha perdido en su totalidad la bóveda no estará en riesgo amenazador pero su reparación es inminente. El trabajo de restitución aquí será más laborioso puesto que un apuntalamiento de seguridad es necesario.
 - d. Como nota general: en caso de que surja cualquiera de las fallas anteriores y sea necesario restituir piezas, se sugiere que la cantera sea de la región y que la pieza se labre un poco sobrada para que se hagan los cortes a la medida al momento de su instalación.
- V. En caso de que se noten grietas en la plementería será necesario inspeccionar los arcos que hayan producido el movimiento y evaluar que ocasionó la pérdida. Vale la pena recordar que las bóvedas de mampostería presentan grietas invariablemente como consecuencias de asentamientos y como consecuencia de la disipación de energía generada por movimientos sísmicos. Las grietas no significan necesariamente que las bóvedas hayan perdido su integridad estructural. Por otro lado, en caso de pérdidas en la plementería, habrá que evaluar la magnitud de la pérdida en relación con la superficie de la bóveda. Un orificio pequeño no pone en riesgo de colapso la estructura. Y aun cuando se pierda una cantidad grande de plementería las nervaduras seguirán en pie, pero el riesgo de seguir perdiendo plementería estará presente hasta que no se repare el daño.
- VI. En caso de que se note un desplazamiento en los muros de manera que hayan perdido su verticalidad y por lo tanto el claro a cubrir por los arcos se de las bóvedas se haya hecho más grande, entonces la estabilidad de la estructura está en riesgo. En esta situación se sugiere hacer una evaluación y, en caso de que sea posible, corregir los daños a la brevedad. Esta situación presentaría un trabajo mayor de restauración.

CONCLUSIONES

Las nube de puntos de las diferentes bóvedas analizadas en este proyecto muestran dos tipos de información. Por un lado información sobre su construcción y por otro lado información sobre su geometría que es, por ende, la evidencia de su estado de conservación. Después de hacer una revisión del manuscrito de Vandelvira aplicando los procedimientos para el trazado de bóvedas en el siglo XVI, podemos confirmar que estas bóvedas Mexicanas siguieron lineamientos de diseño distintos, gravitando en el conocimiento técnico generado durante siglos en Europa. Las soluciones a nivel de estereotomía de la piedra aplicadas en estas bóvedas son consistentes con las europeas a pesar de los cambios sociales y económicos generados por el encuentro entre dos culturas. Sin embargo, la transmisión de tecnología de Europa a México creo nuevas formas de entender la disciplina del labrado de piedra, creando variantes en los arquetipos y desarrollando complejas soluciones relacionadas a la geografía y al momento histórico. Por otro lado, la información que las nubes de puntos arrojan sobre la construcción de las bóvedas nos ha permitido discernir que son considerablemente diferentes entre sí, aún cuando se construyeron en una misma zona, dentro de un

mismo contexto histórico, usando la misma tecnología y por los mismos constructores.

La comparación, entre la geometría ideal y la geometría real, ha permitido encontrar los puntos y zonas donde las bóvedas han sufrido transformaciones. Estas deformaciones se encuentran dentro de los límites necesarios para que geometría pueda envolver las líneas de esfuerzos, por lo tanto se puede afirmar que la integridad estructural de las bóvedas se ha conservado. Esto demuestra, por un lado, la calidad en la ejecución de las obras por los constructores indígenas y por otro la resistencia de este tipo de construcción a movimientos sísmicos y otros agentes agresivos a la fábrica, incluyendo algunas intervenciones. Esta es quizás la conclusión más productiva, que nos indica el camino a seguir para mantener estas joyas arquitectónicas en pie. La historia nos muestra que estos edificios han resistido años de incuria y agresiones del medio ambiente debido a la calidad de su construcción. Para garantizar su conservación habrá que aprender de la historia de la construcción y respetar integridad del sistema constructivo alejándose, en todo momento, de elementos extraños a la fábrica original que pudieran alterar sustancialmente el comportamiento físico de los materiales y la estructura.

Con respecto al uso de la tecnología digital en la creación de estrategias de conservación se puede concluir que es una herramienta que facilita la obtención una serie de datos útiles. En este caso, datos de la geometría de elementos portantes en estructuras de piedra que trabajan a compresión. Es necesario mencionar que para que estas herramientas del siglo XXI sean efectivas en desarrollo de estrategias de conservación de patrimonio histórico, se deben usar bajo la luz de la historia de la construcción, reconociendo los principios de diseño y la interrelación de los sistemas que actúan en la integridad estructural de los edificios. Por otro lado, es necesario reconocer que estas herramientas ofrecen mucha precisión, y es justamente esta precisión la que puede entorpecer el proceso de investigación, especialmente cuando se trata de este tipo de estructuras que se realizaron de una manera "artesanal" y que contienen muchas imperfecciones. Las limitaciones de estas herramientas digitales se deben de considerar al momento de desarrollar el trabajo de evaluación y/o investigación considerando cierta "tolerancia" entre la digitalización y del objeto patrimonial a estudiar.

REFERENCIAS

- [1] José Carlos Palacios, 2009, "La Cantería Medieval en Piedra", pp 93-96
- [2] Enrique Rabasa Díaz, 2000, "Forma y Construcción en Piedra, de la Cantería Medieval a la Estereotomía del Siglo XIX, pp 183-192.
- [3] Jacques Heyman, 1995, "The Stone Skeleton", pp 12-26.
- [4] Santiago Huerta Fernández, 2001, "Mechanics of masonry vaults: The equilibrium approach", Proceedings of the 3rd. International Seminar. Guimaraes 7-9 November, pp. 47-69.
- [5] Santiago Huerta Fernández, 2004, "Arcos, bóvedas y cúpulas. Geometría y equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica", pp. 29-34