

Perelló Roso, Ricardo, Gaspar Muñoz Cosme y Marina Sender Contell

2009 La observación de las ruinas Mayas y su análisis patológico como indicadores de su comportamiento estructural y constructivo. En *XXII Simposio de Investigaciones Arqueológicas en Guatemala, 2008* (editado por J.P. Laporte, B. Arroyo y H. Mejía), pp.206-215. Museo Nacional de Arqueología y Etnología, Guatemala (versión digital).

15

LA OBSERVACIÓN DE LAS RUINAS MAYAS Y SU ANÁLISIS PATOLÓGICO COMO INDICADORES DE SU COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL Y CONSTRUCTIVO

Ricardo Perelló Roso

Gaspar Muñoz Cosme

Marina Sender Contell

Universidad Politécnica de Valencia

ABSTRACT

THE OBSERVATION OF MAYA RUINS AND THEIR PATHOLOGICAL ANALYSIS AS INDICATORS OF CONSTRUCTION TECHNIQUE AND STRUCTURAL BEHAVIOR

Space in Maya architecture takes as its materializing element a physical reality that flows from its construction process. This reality habitually is the fruit of a systematic refining of techniques that, through progressive variations and a learning curve, configures the tectonic knowledge of a culture. Clearly, the examination of construction attempts is only partially datable, given that failed attempts, probably the most illuminating for reconstructing the process of how knowledge advances, have since disappeared. For this reason, one must take advantage of the abundant successful examples that are dated chronologically with precision and that remain standing, whether during their phase of use or over long years of abandonment. With many of these examples, their partial ruin converts them into valuable databases for determining the "built" reality. On the one hand, direct observation of the components of manufacture, joints, dimensions of elements, etc., is possible, aiding the study of the construction systems, and with posterity, the typological classification of these. On the other hand, the pathological study and reconstruction of decay processes can serve to clarify the functioning of these systems and the different elements that form them. Additionally, this approach establishes a model of behavior for these structures, clearly outside the range of conventional analysis of structures and serves as a guide to the development of methods, all with an eye towards restoration and preservation.

El espacio en la arquitectura toma como elemento materializador una realidad física que dimana de un proceso constructivo. Esta realidad habitualmente es fruto de una depuración sistemática de técnicas que con variaciones progresivas y aprendiendo de la alternancia entre aciertos y errores, configura el cuerpo de conocimientos tectónicos de una cultura.

El avance en el conocimiento y en el comportamiento de los elementos constructivos y estructurales en fases pre-científicas se consigue fundamentalmente mediante métodos experimentales basados en la repetición de los aciertos y la eliminación de los modelos fallidos. Un modelo estructural exitoso se repetirá, adaptándolo a las necesidades del edificio concreto e introduciendo pequeñas modificaciones que de resultar positivas, se pueden adoptar como permanentes en el sistema. El avance es, pues, necesariamente lento, las innovaciones que se introducen en el modelo son progresivas y los límites del sistema estructural son difíciles de definir.

Es cierto que el registro de los ensayos constructivos sólo es parcialmente fechable puesto que aquellos ensayos que resultaron fallidos y son probablemente los más esclarecedores para reconstruir el proceso de avance en el conocimiento, han desaparecido. Por ello hay que aprovechar la abundancia de ejemplos exitosos que permanecieron en pie, tanto en su fase de utilización como durante largos años de

abandono y que están fechados cronológicamente con precisión. La forma de comportamiento de los materiales pétreos se adapta bien a este tipo de análisis.

Se trata de estructuras en las que los estados tensionales se encuentran en rangos de valores muy alejados de los que agotan el material, lo que permite el análisis mediante el estudio empírico de modelos a escala de tal manera que la construcción de éstos, representa con buena aproximación el comportamiento de la construcción real. Se define la estabilidad de la estructura a partir de criterios de relaciones dimensionales entre los elementos constructivos y estructurales, por ello se puede hablar de métodos de dimensionado basados en criterios geométricos (Heyman 1995; Mené y Perelló 2006; Muñoz 2006; Perelló 2005; Oñate 1995).

El conocimiento estructural basado en observaciones empíricas es necesariamente incompleto y puede ser erróneo. En el caso de estructuras de fábrica de arcos convencionales los modelos de dimensionado estaban basados en sistemas de “reglas” de proporción, donde la mayor incógnita a resolver era la dimensión de los estribos para garantizar la estabilidad de la estructura. Quienes concibieron y construyeron estas estructuras eran conscientes del hecho de que un arco empuja y sus mayores esfuerzos, como constructores, se dirigieron a diseñar estructuras que fueran capaces de contrarrestar tales esfuerzos.

Si en los sistemas de arcos y bóvedas convencionales la incógnita era la dimensión de los estribos, la incógnita a resolver en el caso de bóvedas por aproximación sería con toda probabilidad, la dimensión de los muros y el volumen del contrapeso que garantizara la estabilidad al vuelco de la cubierta, es decir, la relación entre vuelo y volumen de contrapeso de la bóveda. Por todo ello, en este tipo de estructuras el trasdós toma tanta o mayor importancia que el intradós.

Lamentablemente, un fallo que provoque el colapso de una estructura puede provocar no sólo una paralización en los avances en el refinamiento del modelo estructural, sino retrocesos importantes que conduzcan a los constructores de estos edificios a la adopción de reglas o proporciones mucho más conservadoras que algunas de las ya utilizadas con éxito.

Reproducir el camino de adquisición de conocimientos tectónicos se convierte en una labor prácticamente imposible, sin embargo, sí es posible a partir del análisis patológico y del estudio de los edificios existentes intentar reproducir el proceso de ruina del edificio y a partir de éste, avanzar en la comprensión de su forma de comportamiento. Una buena comprensión del proceso facilitará tanto la toma de decisiones sobre la necesidad o no de una hipotética intervención como el decidir la forma de intervención más adecuada.

Así pues, la ruina parcial de un edificio de estas características se convierte en un banco de datos de gran valor para la determinación de la realidad constructiva. Por una parte posibilita la observación mejor y más directa de los componentes de las fábricas, aparejos, dimensiones de los elementos etc., ayudando al estudio de los sistemas constructivos y con posterioridad a la clasificación tipológica de éstos.

Por otra parte, el estudio patológico y la reconstrucción de los procesos de ruina pueden servir para aclarar el funcionamiento de estos sistemas y de los distintos elementos que lo forman, así como para establecer un modelo de comportamiento de unas estructuras como las bóvedas de aproximación, claramente fuera de los límites del análisis convencional de estructuras y que ha de servir de guía a los procesos de desarrollo de los métodos de cálculo de las mismas.

Una de las características fundamentales aplicables a la piedra como material constructivo es el de la durabilidad. El hecho de tratarse de un elemento de origen geológico sometido a manipulación exclusivamente mecánica favorece la estabilidad frente a alteraciones químicas y frente a ataques de tipo biótico del elemento. Por ello, su permanencia temporal es superior al del resto de materiales de origen vegetal que componen la estructura en muchos casos desaparecidos, y por ello nos encontramos en gran cantidad de casos con estructuras incompletas en las que la falta de estos elementos puede

alterar en gran medida el comportamiento estructural del conjunto, si es que no ha sido el causante directo de la ruina de los mismos.

Un análisis detallado de los restos del sitio de La Blanca tanto de las estructuras exhumadas como de la parte visible de las que permanecen enterradas, puede aportar datos sobre el comportamiento del sistema.

CARACTERIZACIÓN DE LOS EDIFICIOS DE LA ACRÓPOLIS DE LA BLANCA

Se trata de edificios construidos con una gran uniformidad que se refleja en la regularidad de las dimensiones de las estancias (luz de las bóvedas), en el formato similar de los sillares empleados en todo el edificio o en los métodos constructivos empleados.

Todas las estancias participan de las siguientes características en lo que a su estructura se refiere:

- Edificios de un nivel por lo que no existe carga de muros superiores que colaboren en el contrapeso de las bóvedas y en el centrado de la carga.
- Edificios de una crujía. Es por ello que la práctica totalidad de las bóvedas son excéntricas, es decir, apoyadas sobre un muro sin el contrapeso de un vuelo simétrico, sino exclusivamente con el volumen de relleno que gravita sobre el muro.
- Las luces de las bóvedas, definidas por el ancho de las estancias son de 2.90 m en todos los edificios excavados a excepción del Palacio de Oriente (6J1), con una luz de 4 m en las estancias principales (6J1 1, 6J1 3, y previsiblemente, aunque sin excavar, la 6J1 5), y de 2 m las estancias menores (6J1 2, y probablemente, 6J1 4)
- El sistema constructivo es el de muros que soportan bóvedas de vuelos sucesivos de intradós recto. Los muros soporte son de dos hojas exteriores de aproximadamente 0.20 m de grueso, construidos con sillares cuya altura varía entre 0.35 y 0.45 m y que contienen un relleno de mampostería. Para mejorar el comportamiento mecánico del muro, las hojas exteriores se traban al relleno mediante piedras de punta distribuidas a lo largo de la superficie. La potencia de los muros varía entre 1.50 y 1.80 m.
- Los muros se rematan con una hilada que de piedras de punta, preparada para recibir la dovela de arranque de la bóveda. Esta hilada atraviesa todo el muro, estando formada por un sillar más corto sobre el que apoya la bóveda y una gran pieza (de hecho los mayores sillares utilizados en el edificio) que da continuidad a la hilada, atravesando el muro y conformando el vuelo de la cornisa en la parte exterior de los edificios. Sobre esta hilada se disponen las dovelas formadas por piezas trapezoidales que conforman hiladas de alturas similares a las de los muros (Figura 1). El trasdós de la bóveda se contrapesa mediante mampostería. La geometría de las dovelas está bien adaptada a la función estructural que cumplen y al proceso constructivo necesario para su colocación en obra. Por una parte son piezas de mayor canto que ancho lo que les permite mejorar el comportamiento frente a los esfuerzos de flexión y cortadura a los que les someten las dovelas superiores dispuestas en vuelo. Por otra parte el achaflanado de la cara superior de la dovela en la parte del intradós de la bóveda abre el ángulo de corte, reduciendo la concentración de esfuerzos en la zona que recibe el vuelo y permitiendo el ajuste holgado con la colocación del mortero de asiento.
- Sobre la última hilada se encuentra la tapa y sobre ella el relleno.

En las bóvedas en las que los restos permiten observarlos se han encontrado huellas de morillos, dispuestos en tres niveles con distribución ordenada y con los plomos contrapeados. En el caso

de las bóvedas de mayor luz, como la estancia central del Palacio de Oriente (6J1 3) los morillos se duplican.

LA RUINA

El progreso de la ruina es diverso, variando en las diferentes estancias y abarcando desde estructuras que mantienen tres lados completos, hasta estancias que han perdido las bóvedas en su totalidad. Sin embargo, todas ellas presentan una serie de similitudes en la forma que adoptan los restos, que aportan indicaciones sobre el mecanismo de colapso.

Es de gran interés el estado en que se encuentra en la actualidad el Cuarto 5 del Palacio 6J2, quizá la estancia en mejor estado del sitio. En él se mantienen en pie tres de los laterales que lo forman. Además del interés implícito por ser una de las piezas en mejor estado de conservación en cuanto a los elementos estructurales que lo conforman, su estado de ruina parcial puede aportar datos sobre el modo de colapso, y por tanto informar acerca del comportamiento de la estructura (Figura 2).

El lienzo donde se ubicaba el acceso es el que ha colapsado. En estos momentos se encuentra apeado para detener el avance de la ruina. Es evidente que el colapso ha comenzado por el punto más débil de la estructura: el vano. En toda la Acrópolis, los restos de bóveda mejor conservados corresponden a aquellos lienzos soportados por muros carentes de perforaciones. De hecho, todas las bóvedas ubicadas sobre muros con vanos han colapsado. Este efecto es probablemente debido a varias situaciones.

En primer lugar, los dinteles de madera, como material orgánico que son, tienen una durabilidad menor que los elementos líticos. En los vanos en que se ha conservado la altura completa hasta el lugar donde estaba colocado el dintel, las huellas que aparecen marcadas corresponden a dinteles escuadrados, probablemente de chicozapote. A pesar de la calidad de esta madera y a diferencia de otros sitios arqueológicos, no se conserva ninguno de los dinteles. La desaparición de los dinteles altera de forma notable el comportamiento estructural del conjunto, provocando una redistribución de tensiones y cambios profundos en el comportamiento estructural del sistema.

En este caso, parte del lienzo quedó colgada formando un arco de descarga sobre los lienzos laterales del cuarto. Esto parece indicar el proceso de colapso esperable en la fábrica. La desaparición del dintel, elemento que trabaja esencialmente a flexión, provoca la ruina del tramo de fábrica inmediatamente superior al dintel y que apoyaba directamente sobre él. Sin embargo, en general, la fábrica es capaz de generar mecanismos resistentes basados en respuestas de compresión del material, produciéndose arcos de descarga. Similar situación se puede observar en gran parte de la documentación gráfica histórica, aunque quizás sean especialmente llamativas las fotos de Alfred Maudslay en Palenque, donde las estructuras descubiertas carecen prácticamente en su totalidad de dinteles y los arcos de descarga se evidencian sobre todo en los vanos (Figura 3).

Con gran probabilidad el arco de descarga se forma antes de la desaparición de los dinteles, debido a la diferencia de deformación de los materiales intervinientes en el conjunto estructural y fundamentalmente por el fenómeno de fluencia que es el incremento de las deformaciones en situación de carga constante que experimenta la madera sometida a flexión.

La flecha del arco natural de descarga de una fábrica depende esencialmente de la calidad de la misma. Fábricas bien trabadas y aparejadas producen arcos de descarga muy rebajados, aumentando el peralte y por tanto la flecha del arco a medida que disminuye la calidad de la fábrica y de su traba. En el caso de las estructuras Mayas el elemento que forma el arco de descarga cuando los dinteles han desaparecido son las dovelas que forman la bóveda que invierten drásticamente su forma de trabajo, pasando de soportar tensiones de compresión con componente fundamentalmente vertical, a formar un arco de descarga con esfuerzos de compresión que forman un funicular contenido en el plano de la bóveda y con inclinación dependiente de la posición de la dovela en el arco.

Es de prever que en los estados iniciales de ruina con la fábrica sin alterar y en buen estado de conservación los arcos de descarga fueran de pequeña flecha, adoptando configuraciones que no producen alteraciones sustanciales en el conjunto estructural. Sin embargo, la desaparición de las caras exteriores de la fábrica habría dejado sometido a los efectos de la intemperie el relleno interior de peor factura y con resistencias mecánicas más bajas. La disgregación de los morteros de junta y el consiguiente deterioro y debilitamiento de las fábricas probablemente conducen al colapso de estos arcos de descarga y al avance en la ruina de los muros sin dintel.

Por otra parte, las dovelas de las estructuras de La Blanca como se ha indicado con anterioridad, presentan una geometría optimizada para su trabajo como bóveda de vuelos sucesivos y por ello son piezas más altas que anchas, por lo que su capacidad de traba en las hiladas sucesivas es pequeña. Por ello el arco de descarga que se produce al desaparecer los dinteles ha de ser necesariamente poco eficiente, facilitándose la formación de arcos de gran peralte y favoreciendo el colapso de porciones muy importantes de la bóveda.

Es importante resaltar la capacidad de la fábrica para generar arcos a pesar de que los métodos empleados para construirlas son ajenos a esta tecnología. Es decir, la experiencia parece indicar que a pesar del sistema constructivo empleado, la fábrica es capaz al menos en determinadas circunstancias, de utilizar este mecanismo resistente para continuar en pie. Es por ello que el sistema estructural podría comportarse de forma ambivalente en función de la integridad de las fábricas y de las condiciones de apoyo. El proceso de colapso se produciría, en primera instancia, a partir de la pérdida de apoyo de la bóveda sobre el muro y no por vuelco de la semi-bóveda.

ANÁLISIS PATOLÓGICO DE LA BLANCA

En el caso de La Blanca, el análisis de la estabilidad a partir de un comportamiento unidireccional del material de las semi-bóvedas aplicado a la hipotética reconstrucción de los edificios de la Acrópolis, da como resultado una curva de fisuras en el trasdós que aumenta la excentricidad de la resultante. El hecho de que la resultante pase por dentro del muro indica que la bóveda es estable en esta configuración, aunque y en atención a la excentricidad obtenida el margen de seguridad es muy escaso. Una carga horizontal pequeña hubiera producido el vuelco del volumen de la semi-bóveda respecto al punto de encuentro bóveda-muro. No obstante, una gran parte de los colapsos no parece haberse producido de esta manera.

La rotura típica en este caso es similar a la que aparece en las fotografías de Maler y Maudslay del Templo A del Juego de Pelota de Chichén Itzá ó en los grabados de Charnay del mismo sitio, pero en la mayor parte de las estructuras de La Blanca es un proceso de ruina más avanzado. Uno de los laterales de la bóveda se encuentra completamente derruido. En los dos casos el lado correspondiente al muro es débil, es decir, el que está perforado con vanos.

En el otro lado las características de los restos son similares. Las esquinas de la estancia aparecen prácticamente completas, sin embargo, en el centro del muro la bóveda se encuentra completamente colapsada. Es evidente que las esquinas suponen un punto fuerte y que la bóveda puede apoyarse sobre los muros perpendiculares por lo que existe un cierto efecto de arco en el sentido transversal.

La forma más repetida de los restos indica una rotura mediante una fisura en un punto del trasdós mucho más elevado que el que aparece en los análisis realizados en la mitad de la estructura. De hecho, el tramo que sería en este análisis punto de giro está completo en gran parte de las estancias y gran parte de la bóveda que aparece por encima de la fisura obtenida en estos análisis, por lo tanto, de haberse producido el vuelco como sólido rígido debería haber caído, sin embargo, continúa en pie (Figura 4). A esto hay que añadir que aparecen muestras de rotura de las dovelas por cortadura que no concuerdan con los análisis tensionales efectuados.

La explicación a estas diferencias entre el análisis teórico y los restos existentes probablemente sean debidos al proceso de colapso. Si al repetir el análisis se computa la carga del volumen de relleno

que actúa sobre toda la tapa, la excentricidad de la carga inicial aumenta notablemente. En este caso, la fisura situada en el trasdós aparece en una posición mucho más elevada. La concentración de tensiones que se produce en las zonas en que la resultante de cargas se acerca al borde de la sección hace que las tensiones a que se ve sometido el material aumenten de forma notable, pudiéndose alcanzar la rotura de la piedra y la expulsión de la cara exterior de la dovela. Esta rotura en las dovelas aumenta la excentricidad de las cargas, y por tanto el efecto de vuelco.

Otra de las formas de colapso de la estructura parece responder a la separación de las dovelas respecto del relleno de contrapeso. Por los restos existentes, todas las dovelas son de similar longitud. Al contrario de los muros de cierre que soportan las bóvedas no existen piezas que traben el plano formado por las dovelas con el volumen interior de mampostería. En la práctica, parece que se forma una hoja exterior de dovelas con una junta prácticamente continua que facilita la formación de un plano de fisura que separa el volumen conformado por las dovelas y el formado por el relleno. Eliminado el comportamiento solidario entre ambos volúmenes, las dovelas son incapaces de mantener la estabilidad sin el contrapeso de mampostería y vuelcan girando respecto a la primera dovela, manteniéndose en pie gran parte del volumen de relleno del trasdós.

Quizás un avance tecnológico al que no llegaron los Mayas antiguos fue el introducir sistemas de dovelas llave que trabaran el plano de la bóveda con el contrapeso. En los análisis realizados mediante métodos elásticos aparece al considerar el trabajo de la semi-bóveda un punto de máxima tensión de compresión en el arranque de la bóveda en la zona del intradós. Esta concentración de tensión viene originada al considerarse este punto como eje de giro de la semi-bóveda en el caso de vuelco. De la observación de la ruina se puede destacar que prácticamente ninguno de los sillares que conforman este punto se encuentra fracturado (Figura 5).

Con toda probabilidad este hecho se debe a dos circunstancias. Por una parte, en el modelo analizado de comportamiento de semi-bóveda, las tensiones obtenidas, siendo las mayores de toda la sección, no alcanzan las tensiones de rotura a compresión de la piedra que constituye la fábrica. Esto parece confirmar la validez en la hipótesis adoptada para el comportamiento del material (planteamiento de equilibrio con comportamiento unidireccional del material).

Por otra parte, el arranque de la bóveda está construido como un “punto fuerte”. Parece evidente que para los constructores Mayas esta pieza de arranque constituía un punto crítico en la estructura. En todos los muros en el que el derrumbe ha permitido la observación de la sección constructiva de la fábrica, es la única hilada en que la fábrica se traba en continuidad con piezas de punta que unen las dos hojas exteriores de sillares. La solución es siempre la misma, una pieza que penetra hasta la tercera parte del espesor del muro en la cara del intradós sobre la que se apoya la primera dovela de las bóvedas, y una gran pieza que atraviesa las dos terceras partes restantes del espesor del muro y configura la cornisa en la cara exterior del edificio.

En muchos casos sí se ha producido pérdida de sillares en la hoja exterior del intradós del muro por debajo de esta hilada, y la causa en primera instancia pudiera ser una pérdida de estabilidad por deformaciones de segundo de orden esta hoja, la que no parece responder exclusivamente a estados tensionales, ya que el mismo efecto se observa en las caras exteriores, sometidas exclusivamente a sollicitaciones de compresión debidas al peso propio y por tanto, con el efecto del pandeo en la práctica despreciable.

CONCLUSIONES

El estudio de la ruina de un edificio puede aportar gran cantidad de información, tanto del sistema constructivo empleado como del comportamiento estructural del mismo. El proceso de ruina y el análisis patológico del edificio sirven para corroborar o corregir las hipótesis adoptadas para el modelado y cálculo de la estructura, pudiendo convertirse en indicadores de los estados tensionales en el material.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen expresamente el apoyo del Ministerio de Educación y Ciencia, a través del financiamiento del proyecto de investigación con número de referencia BIA2007-66089, cofinanciado con los fondos FEDER, y el patrocinio del Ministerio de Cultura a través de la financiación obtenida por el Proyecto Arqueológico La Blanca dentro del programa de ayudas para proyectos arqueológicos en el exterior de la Dirección General de Bellas Artes y Bienes Culturales, y que ha contribuido determinadamente a hacer posible las investigaciones y la obtención de resultados que se exponen en esta publicación.

REFERENCIAS

Heyman, Jacques.

1995 *Teoría, historia y restauración de Estructuras de Fábrica*. Instituto Juan de Herrera, Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid. Centro de Estudios Históricos de de Obras Públicas y Urbanismo. Centro de estudios y Experimentación de Obras Públicas, Ministerio de Obras Públicas Transporte y Medio Ambiente. Madrid.

Mené Aparicio, Jesús y Ricardo Perelló Roso

2006 *Comportamiento resistente de elementos históricos de fábrica en la arquitectura Maya. Análisis estructural de la Acrópolis de La Blanca*. Trabajo de investigación inédito, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia.

Muñoz Cosme, Gaspar.

2006 *Templo I de Tikal. Arquitectura y restauración*. British Archeological Reports (BAR), Internacional Series, nº 1557, Oxford, Reino Unido.

Perelló Roso, Ricardo

2005 Análisis del comportamiento estructural de elementos históricos de fábrica. El caso de las estructuras de La Blanca. En *La Blanca. Arqueología y desarrollo*, (editado por G. Muñoz y C. Vidal), pp. 93-105, Editorial UPV, Valencia.

Oñate Ibáñez de Navarra, Eugenio

1995 *Cálculo de estructuras por el método de los elementos finitos. Análisis estático y lineal*. C.I.M.N.E, Barcelona.



Figura 1 Sillares de cornisa procedentes del Palacio 6J1



Figura 2 Bóveda del cuarto 5 del Palacio 6J2



Figura 3 Las ruinas de Palenque fotografiadas por A. Maudslay



Figura 4 Restos de la bóveda de la estancia principal del Palacio 6J1



Figura 5 Encuentro de sillares de esquina