



La doble medida en la arquitectura del pasado: El Palacio de Onda y su planta antropométrica

The Double Measurement in Architecture of the Past: The Palace of Onda and His Anthropometric Plan

Francisco Javier Roldán Medina

UGR (Universidad de Granada). LAAC (Laboratorio de Arqueología y Arquitectura de la Ciudad)
e-mail: foldan@ugr.es

RESUMEN

Se describe en este artículo el proceso metodológico para reconstruir el diseño modular del palacio fortificado de Onda (Castellón) a partir de su planta arqueológica, aplicando los principios metroológicos desentrañados en las investigaciones previas del autor en este campo. Módulo, ejes, tamaños y esquema geométrico general quedan identificados sobre la planta base con precisión digital. Se clasifican los diferentes espesores de muros detectados. Se realizan comprobaciones mediante mediciones directas. En esta obra resalta la continua utilización de modulaciones dinámicas, tanto en la rotunda y caracterizadora geometría de su planta general, como en cada una de las partes. Destaca también la variedad de espesores de muro, los desplazamientos de ejes, y el correcto replanteo de la fortaleza. El conocimiento de un sistema común de proporciones en los usos del pasado puede representar un nuevo paradigma en el estudio y conservación de nuestro patrimonio histórico y cultural.

Palabras clave: metrología; arqueología; geometría; proporción; módulo; construcción modular; historia; universal.

ABSTRACT

Described in this paper, is the methodological process to reconstruct the modular design of the fortified palace of Onda (Castellon) Spain, through its anthropologic plan, and applying the Metrologic Principles unravelled in previous research of the author in this field. Module, axis, size and geometric scheme are identified on the base plan, with digital precision. Different thicknesses of the walls are detected and classified. Verifications are carried out via direct measurements. In this building, the continuous utilization of dynamic modulations are highlighted in the decisive and characteristic geometry of the general floor, as in each of the parts. The variety of the thickness of the walls, the displacements of the axis and the correct tracing of the fortress, also stand out. The knowledge of a common system of proportions used in the past could represent a new paradigm in the study and the conservation of our historical and cultural heritage.

Keywords: metrology; archaeology; geometry; proportion; module; modular construction; history; universal.

Recibido: 09-09-2014. Aceptado: 29-05-2015.

Cómo citar este artículo / Citation

Roldán Medina, F. J. 2015: "La doble medida en la arquitectura del pasado: El Palacio de Onda y su planta antropométrica", *Arqueología de la Arquitectura*, 12: e023. doi: <http://dx.doi.org/10.3989/arq.arqt.2015.005>

Copyright

© 2015 CSIC. Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Attribution-Non Commercial (by-nc) Spain 3.0.

INTRODUCCIÓN

Hace siglos que existe interés por cuantificar las proporciones de las arquitecturas del pasado. Ya en el Renacimiento tanto Francois Blondel (1618-1686) como Giuseppe Ercolani (1672-1759) plantearon esquemas lógicos y leyes para expresar numéricamente algunos ejemplos de obras clásicas. Desde entonces se han formulado muy diversas propuestas e hipótesis encaminadas a justificar las medidas y proporciones de estas emblemáticas obras. Además de las cuadrículas racionales defendidas por la llamada Escuela Numérica, se han planteado distintas geometrías basadas en la proporción áurea (divina), en la proporción plateada (sagrada), la proporción cordobesa, triángulos de diversos tipos, series numéricas derivadas de estas razones clásicas, armonías musicales, trazados reguladores o proporcionales, correcciones ópticas...

En cualquier caso sobre el tema existe una bibliografía muy variada, tanto histórica como contemporánea. Comenzando por el mítico texto de Vitruvio (2007), los sucesivos tratados surgidos a partir del Renacimiento (Evers y Thoenes 2011), y las más conocidas de las numerosas hipótesis que sobre la cuestión se han formulado.

Entre los textos que analizan o recopilan teorías sobre la proporción en arquitectura destacamos los trabajos de Wittkower (1968), Moya (1981), Ruiz de la Rosa (1987) o Fernández Gómez (1999).

Otros autores han tratado el tema de los antiguos sistemas de medidas (Nissen 1892; Klein 1974; Fernie 1978; Kula 1980; Michell 1981; González 1998; Rottländer 1993; Escalona 2009; Suárez 2009).

La arquitectura y decoración islámica también han sido objeto de estudios de proporciones (Ecochard 1977; Creswell 1979; Wisshak 1983; Ewert 1986), y predomina actualmente la idea de que estas geometrías carecen de unidades de medida (El-Said y Parman 1976; Aljazairi 2012). En concreto sobre metrología y proporción hispano-musulmana se conocen varias aportaciones que han tenido gran repercusión en trabajos posteriores (Camps 1953; Hernández 1961; Vallvé 1976; Hoz 2002; Merino de Cáceres 1985; Fernández Puertas 1975, 2000).

A pesar de la extensa bibliografía disponible, aún existen grandes lagunas de conocimiento sobre la cuestión de la medida en la arquitectura del pasado, y hasta el momento no se han podido dilucidar con exactitud las reglas metroológicas que se usaron para construir tan magníficos edificios.

Pero a nadie escapa que nuestra capacidad para preservar en el futuro el patrimonio arquitectónico heredado depende, en buena medida, de nuestra capacidad de entender cómo fueron construidos estos edificios. Y esto significa conocer exactamente en qué consistían estas reglas.

Dado que el material escrito y las teorías de la proporción formuladas son confusas y poco prácticas, consideramos que lo más acertado para afrontar la cuestión sería volver a la propia fuente (la obra arquitectónica, o sus restos) para estudiar sus dimensiones con los nuevos avances científicos disponibles.

El reciente hallazgo de una fortaleza estatal y su palacio en la alcazaba de Onda (Navarro 2012) ha puesto al descubierto que esta construcción —de forma rectangular, flanqueada con torres circulares y situada en la parte más alta del cerro— contó en su interior primero con un palacio andalusí, que después se sustituyó por otro gótico. Los trabajos arqueológicos han documentado estos tres edificios diferenciados construidos a lo largo de los siglos XI al XIV.

Se ha contado con el levantamiento realizado y facilitado por Julio Navarro Palazón (fig. 1). Esta planta arqueológica —que representa los restos de apenas 40 cm de altura que se han conservado del palacio— constituye en este caso la única base de referencia, la

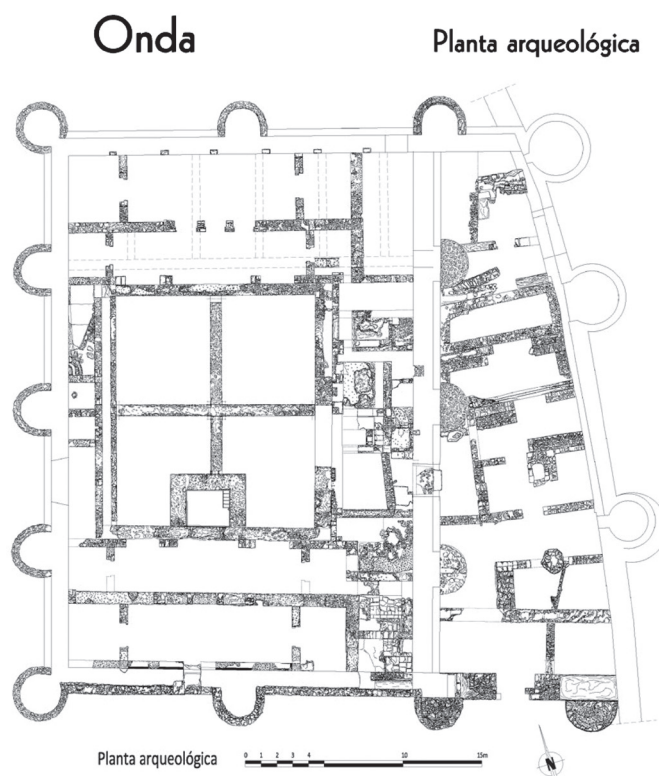


Figura 1. Planta arqueológica del Palacio de Onda (Navarro 2012).

única fuente necesaria para realizar el análisis, y para permitir contrastar los resultados en la obra real.

Se presenta aquí el proceso y parte de los resultados obtenidos en el estudio antropométrico de dicha planta, con objeto de explicar el mecanismo de la doble medida y la metodología de análisis empleada, aplicada a este espléndido ejemplo del palacio andalusí de Onda.

METODOLOGÍA

Teniendo en cuenta los antecedentes, el utilizar levantamientos de suficiente calidad para permitir el análisis dimensional de una obra arquitectónica, con la precisión que brinda la actual tecnología digital asistida, parecía ser el mejor abordaje para investigar científicamente la cuestión.

La posibilidad de disponer del levantamiento fotogramétrico de la qubba nazarí del Cuarto Real de Santo Domingo de Granada, realizado por Antonio Almagro y Antonio Orihuela (1997), permitió su estudio pormenorizado (Roldán 2011). En él se detectó que un curioso y práctico principio modular justificaba todas las dimensiones (fig. 2). Se trata de utilizar, además de una gama de medidas de base duodecimal —las unidades antropométricas conocidas como brazas, varas, codos, cuartas, palmos...—, otra serie proporcional de valor la diagonal del cuadrado ($\sqrt{2}$) cuyo lado corresponde con cada una de las medidas antropométricas (fig. 2a).

Así resultó que con un cuadrado (o con su mitad la escuadra) como único patrón geométrico se pueden componer y acotar correctamente todos los diseños *Ad Quadratum* de este edificio Nazarí, que están basados en la geometría del octógono. Y además se pueden generar otros tipos de tramas modulares compuestas por cuadrados, rectángulos $\sqrt{2}$ y rectángulos de plata, así como los triángulos que los componen, a las que se ajustan con suma precisión el resto de elementos y diseños (Roldán 2012a).

Utilizar conjuntamente dos escalas duodecimales proporcionadas según el lado y la diagonal del cuadrado constituye un sistema modular altamente eficiente. Se aprovechan numerosos recursos matemáticos y geométricos, y proporciona unas posibilidades de diseño prácticamente ilimitadas.

Estas dos escalas armónicas se pueden utilizar independientemente para generar cuadrículas en diseño estático, o bien se usan combinadamente produciendo tramas dinámicas bi-escalares (fig. 2d). En particular es práctico para generar composiciones de polígonos

cordobeses derivados de la división canónica del octógono (Redondo y Reyes 2008; Roldán 2014a).

Además de las aproximaciones fraccionarias a la proporción $\sqrt{2}$, conocidas y aprovechadas desde antiguo para relacionar ambas escalas (7/5, 10/7, 17/12...), las combinaciones dinámicas permiten obtener muy buenas aproximaciones a fracciones no presentes en el sistema duodecimal (1/5, 1/7...), y a otros valores irracionales usados en arquitectura como $\sqrt{3}$, $\sqrt{5}$, el número de oro o π (fig. 2e). Los errores cometidos serán casi siempre menores que si se usa cualquier aproximación fraccionaria. Y lo más importante es que utilizando una simple escuadra se elimina por completo la necesidad de realizar cálculo aritmético alguno.

Estas combinaciones dinámicas posibilitan igualmente aproximarse a unas dimensiones totales determinadas por otro procedimiento modular distinto. Las diferencias o restos irracionales —los residuos a los que se refiere Luca Pacioli en *La divina proporción* (1987: 46)— se aprovechan constructivamente para proporcionar las holguras necesarias entre piezas, absorber el espesor de los recubrimientos, o se acumulan simétricamente en los extremos formalizando un marco liso. De esta manera se pueden integrar en cada porción de la trama principal de una obra otras tramas geoméricamente no compatibles, con tal de que utilicen el mismo patrón y el sistema dual de unidades lado-diagonal (Roldán 2012b).

Al ser analizadas con la misma metodología se ha podido comprobar con asombro que el mismo principio de proporcionalidad del palacio Nazarí se manifiesta en otras numerosas obras construidas desde la protohistoria. Sorprendentemente, todos los resultados apuntan hacia una posible validez universal de este principio de proporcionalidad (Roldán 2014b).

Comparando los resultados obtenidos en las distintas obras arquitectónicas analizadas ha sido posible deducir otras reglas y normas comunes para la modulación de edificios, que podrían haberse usado desde la antigüedad. Lo más significativo es el principio de jerarquía, o reglas funcionales según el destino de la arquitectura, y que implica una disposición concreta de las medidas de la serie diagonal en las trazas generales del edificio (fig. 2f).

RESULTADOS

Una vez que se dispone de al menos una base con suficiente calidad, como en este caso la planta arqueológica del palacio de Onda, se aprovecha la capacidad de llevar a cabo el control dimensional de las obras mediante

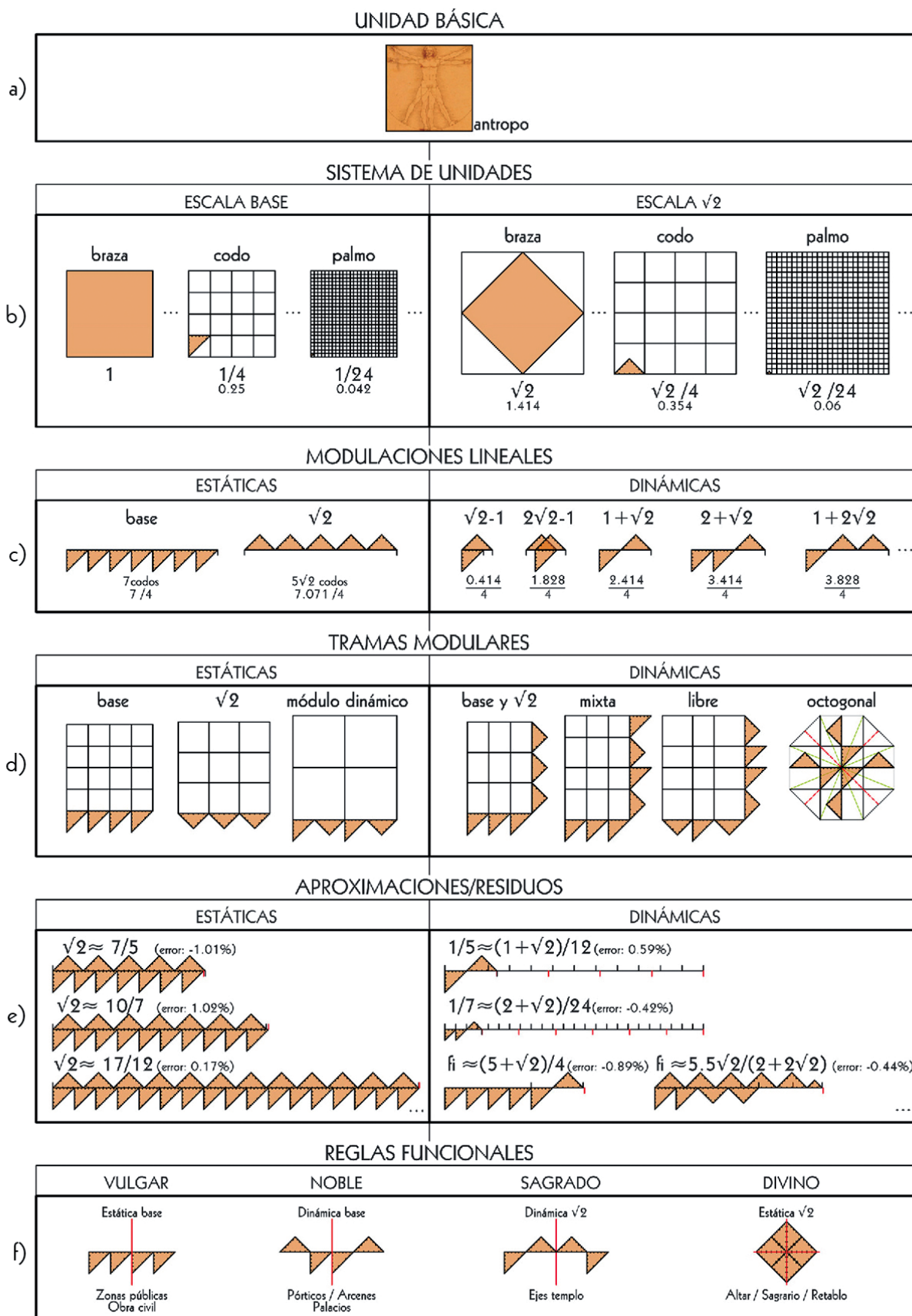


Figura 2. Sistema modular de escala dual lado-diagonal.

simples cuadrados o escuadras, en proporción antropométrica, para representar gráficamente las distintas dimensiones. Las frecuentes modulaciones dinámicas requieren para su correcta cuantificación y expresión numérica de pares de valores enteros, binomios del tipo $(a+b\sqrt{2})$, donde a y b son números naturales.

1. La justa proporción de las tróforas

El proceso de análisis va produciendo resultados desde un inicio, y la investigación puede extenderse a nivel de detalle de cada elemento.

En un principio es fundamental establecer relaciones antropométricas entre las dimensiones de elementos que se repitan rítmicamente. Como el módulo ha de ser humano, las proporciones que buscamos rara vez las encontraremos en las dimensiones generales del edificio, aunque este caso podría haber sido una excepción. En general para llegar a ellas debemos partir de tamaños del sistema antropométrico —brazas, varas, codos, pies, palmos...— que justifiquen tanto las proporciones de una parte de la obra como su posición con respecto a otros elementos cercanos.

En este caso la búsqueda de la justa proporción¹ se inició en las trazas de los pilares en forma de T de los accesos tripartitos (tróforas) a las salas principales del palacio andalusí de Onda, aparentemente iguales y simétricas. El grueso interior del pilar (fig. 3a) coincide con la profundidad hasta el retallo (unos 42 cm), pero este módulo no justifica racionalmente ni el espesor total del pilar, ni su frente, ni su separación a otros soportes.

Si identificamos este tamaño con el codo del sistema ($M/4$), la unidad o módulo básico de referencia sería una braza de aproximadamente $M=168$ cm. Utilizando combinaciones dinámicas de escuadras con este tamaño $M/4$ de lado se observa que el frente exterior del pilar se adapta a $\sqrt{2}/4$ (60 cm aprox.), la profundidad del retallo lo hace a la mitad, y la separación interior entre soportes de unos 144 cm (fig. 3b) coincide con $(2+\sqrt{2})/4$. Los 72 cm del espesor total del muro de la tróforas responden a la mitad de este valor, es decir $(2+\sqrt{2})/8$.

¹ En la historiografía consultada, a las proporciones $\sqrt{2}$ derivadas del procedimiento *Ad Quadratum* (los cuadrados girados e inscritos) algunos autores las denominan así. Alberto Durero en su tratado *De la Medida* de 1525 propone un complicado instrumento para trazar una línea serpentina, formado por una serie de varillas articuladas y ruedas de distinto tamaño conforme a la “justa medida” o “justa proporción” (Durero 2000: 174). A los diseños “en cuadratura” se les solía identificar con la tradición geométrica medieval, y comúnmente los autores se refieren a la proporción utilizando fracciones simples aproximadas como $7/5$. También es conocida como sección o proporción diágon, sagrada, de plata, o plateada, por ser $1+\sqrt{2}$ el número de plata.

Los resultados previos de esta investigación apuntan a que la determinación dinámica de espesores de muro era una pauta común en obras de la Antigüedad, y una costumbre arraigada en la tradición andalusí que aquí veremos usar en abundancia.

Evidentemente también es dinámico el ancho total de las tróforas $(8+3\sqrt{2})/4$, como lo será la mayoría del resto de medidas.

En la alberca (fig. 3c) los muros se justifican con $(1+\sqrt{2})/4$ de espesor (102 cm) separados $(5+\sqrt{2})/4$ (271 cm), y la escalera con un ancho de $1/4$. Responden a la misma combinación de módulos que las tróforas, y se alinean con la del salón sur.

Este mismo espesor de $(1+\sqrt{2})/4$ presentan los andenes laterales del patio. Sin embargo, el resto de andenes son distintos. El sur mide $1/2$ de espesor (84,5 cm) y es también muro de la alberca, mientras que el norte y los centrales en cruz repiten los 72 cm de $(2+\sqrt{2})/8$.

Adosados a los andenes de los salones se levantaban los pórticos. En ambos casos el ancho del hueco central es de 3 (507 cm), los soportes son de $(2+\sqrt{2})/8$, y los huecos laterales tienen $5/4$ (211 cm). Así mismo el espesor de sus fábricas es de $(1+\sqrt{2})/8$ (51 cm).

2. El principio de proporcionalidad de las partes

El procedimiento de análisis consiste en un continuo tanteo, tratando de detectar la justa proporción en el resto de elementos secundarios hasta completar la mayor dimensión posible. Se puede saltar de zona analizada si se desea, o si los resultados de alguna dimensión no son convincentes. Se pueden iniciar varios focos aislados y recorrer distintos caminos para completar y comprobar las dimensiones parciales y totales. Pero siempre utilizando el mismo módulo.

En este caso concreto el ancho de las naves de los pórticos no coincide con ninguna combinación sencilla, por lo que no fue posible en principio establecer su modulación. El ancho de los salones se ajusta a $10/4$ (423 cm). Las alcobas se separan con muros del mismo espesor que los del pórtico, y el ancho de sus puertas responde a distintas combinaciones de módulos.

Las combinaciones dinámicas dominan también en la crujía oriental, mientras que en la estrecha crujía occidental tanto muros como espacios se adaptan casi a una cuadrícula $1/4$. En la plataforma inferior del palacio —en el exterior de la fortaleza— se repiten gruesos de muros, y se añaden otros que tienen $\sqrt{2}/4$ de espesor dispuestos en paralelo entre la muralla de la fortaleza y la de la alcazaba, la cual presenta un espesor de $(2+\sqrt{2})/4$ (fig. 4).

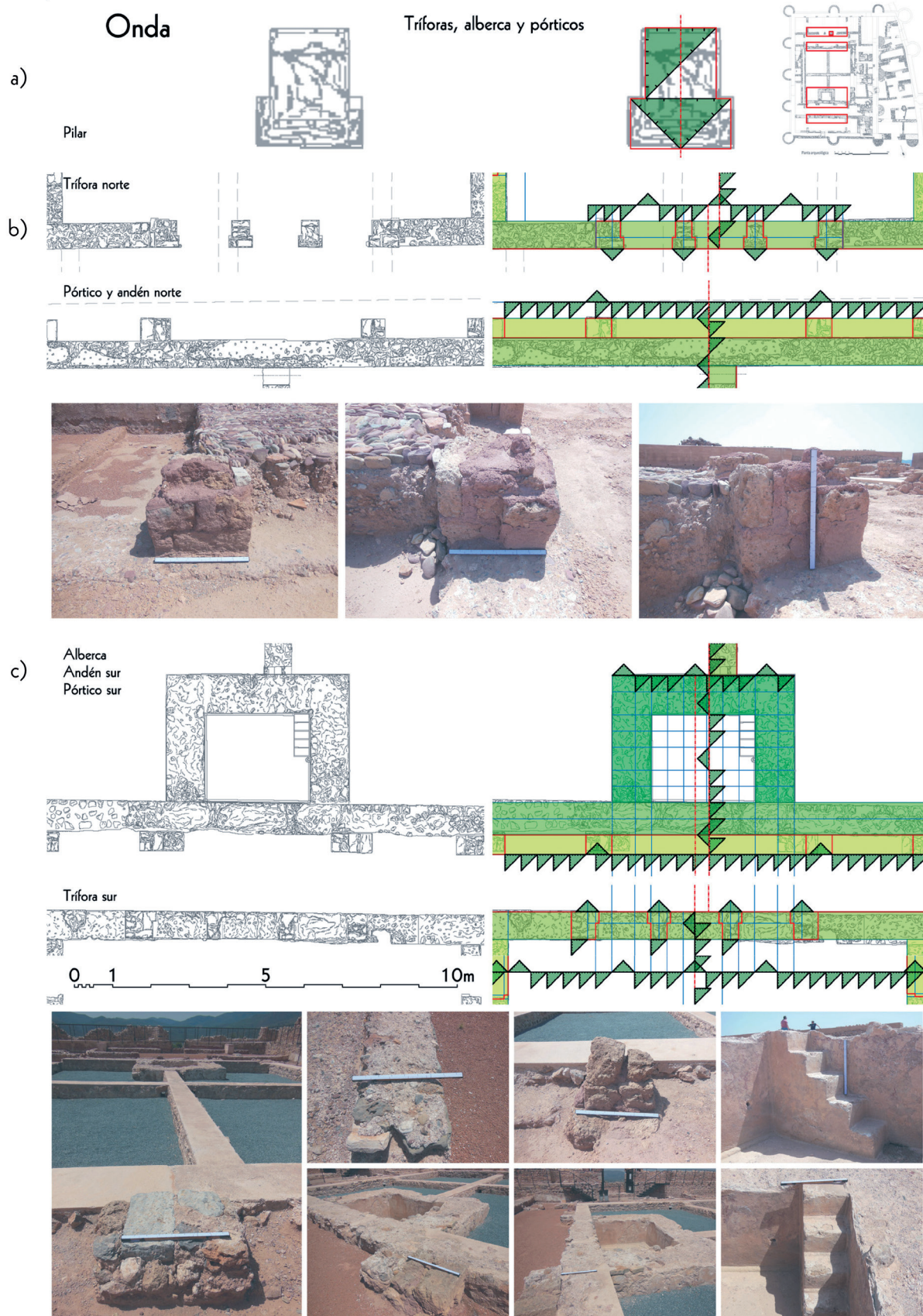


Figura 3. Tríforas, alberca y pórticos.

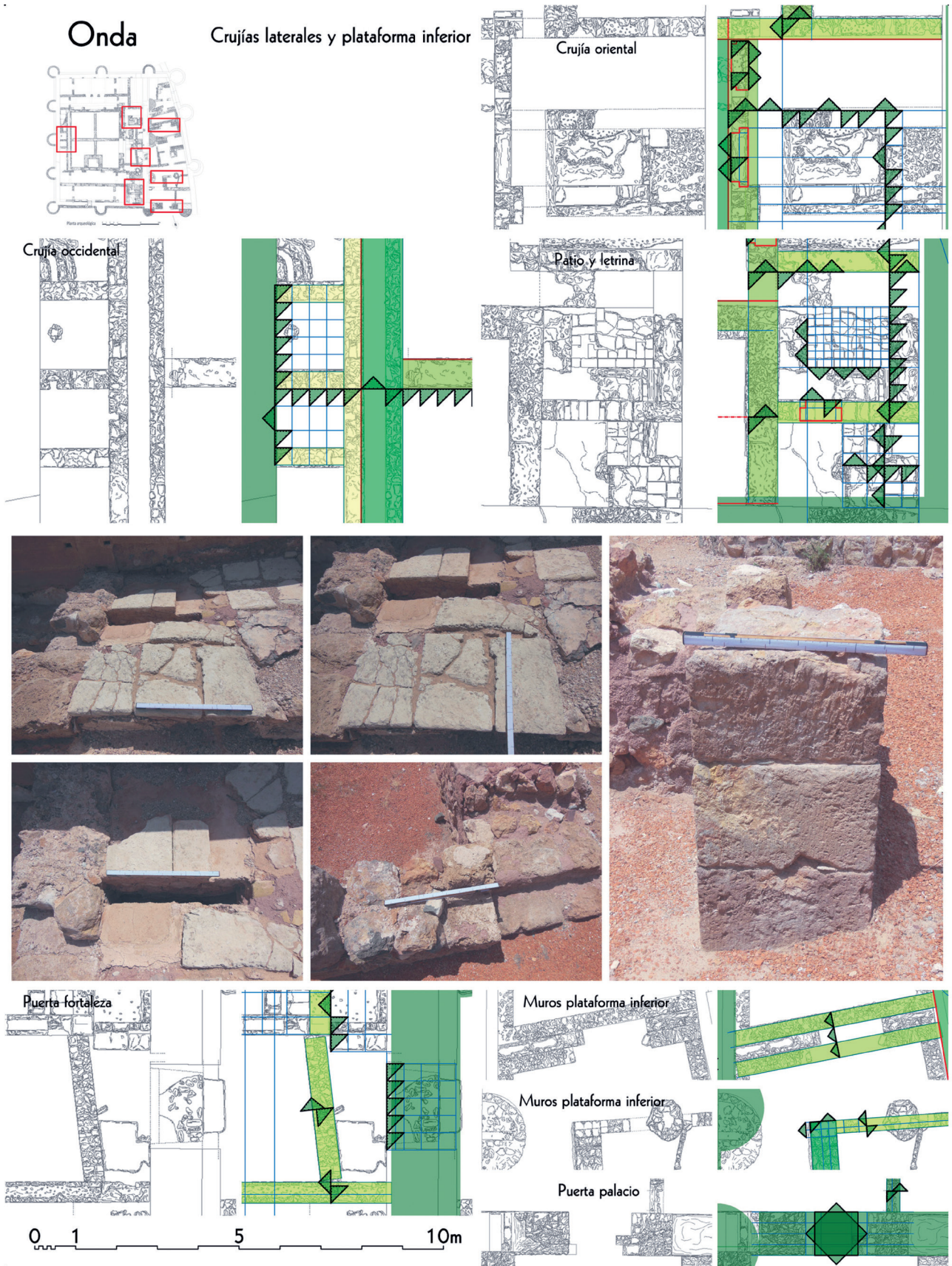


Figura 4. Crujías laterales y plataforma inferior.

3. Dimensiones generales y ajuste del módulo básico

Comprobar en varias partes de un edificio el cumplimiento de la justa proporción mediante el mismo módulo reduce la posibilidad de error.

No obstante, para establecer con precisión el valor métrico-decimal del módulo básico del edificio es necesario ir ajustando el tamaño de la combinación total de módulos deducidos a su dimensión real. Ello es debido a que los tanteos se han iniciado con valores aproximados (en este caso el codo de 42 cm), que irán produciendo más desajustes cuantos más módulos se combinen.

Si tras escalar la combinación total se mejoran las coincidencias parciales de la modulación con la base de referencia, se da por aceptable el módulo obtenido.

En ocasiones la suma de modulaciones parciales arroja totales que permiten agrupaciones duodecimales, y que suelen indicar líneas del trazado general de la edificación mediante unidades grandes (brazas).

No ha sido éste el caso de la fortaleza de Onda, tal vez por ser el palacio una obra algo posterior a la del recinto rectangular amurallado. Aquí las modulaciones parciales no arrojan valores enteros coherentes, por lo que se ha actuado con las dimensiones generales como con un elemento aislado más.

El análisis de las proporciones generales (fig. 5) revela que el recinto amurallado está definido por un rectángulo $\sqrt{2}$ exacto, con un ancho de 15 (este-oeste) por un largo de $15\sqrt{2}$ (norte-sur).

El espesor de la muralla perimetral coincide con M, al igual que el radio de las torres circulares que la jalonan formalizando divisiones binarias de sus lienzos: tres situadas en los extremos y el medio de los lados cortos, y cinco en los lados largos del rectángulo.

Igualmente, se observa que la línea que separa los anedenes de la zona rebajada del patio coincide con la división del rectángulo en dos cuadrados, de manera que el rectángulo inicial queda dividido en dos rectángulos de plata formalizando los cuerpos norte y sur del palacio, y en una franja central del patio que vuelve a ser un rectángulo $\sqrt{2}$.

Responde por tanto el trazado general de la fortaleza a un diseño puro en justa proporción.

Considerando que el largo real de la fortaleza es 35,87 m, el ajuste a $15\sqrt{2}$ permite fijar el valor de braza M = 169,09 cm, a la que corresponde un codo de 42,27 cm.

Esto en lo que corresponde a la fortaleza y al palacio islámico. Respecto al palacio gótico de la Orden de Montesa sólo quedan las trazas de siete pilastras alineadas en el lateral norte de la fortaleza. Su análisis detecta otra unidad de medida. Los soportes tienen un largo de unos 46 cm, y la mitad de ancho. Su separación media es de 6 largos, por lo que considerando una longitud total de 16,61 m donde se distribuyen 36 largos obtenemos 46,1 cm para cada largo. Si éste es el codo, la braza corresponde con 184,39 cm.

4. El principio de jerarquía

Se insiste en la modulación dinámica que rige numerosos elementos, como es el caso de la alberca, los pórticos, las tríforas de acceso a las salas principales, los rebajes de los huecos de paso, y la distribución de varios espacios secundarios. Igualmente interviene en la rica variedad de espesores de muros, encontrando gruesos de M (169,1 cm), $(2+\sqrt{2})/4$ (144,4 cm), $(1+\sqrt{2})/4$ (102,1 cm), $1/2$ (84,5 cm), $(2+\sqrt{2})/8$ (72,2 cm), $\sqrt{2}/4$ (59,8 cm), $(1+\sqrt{2})/8$ (51 cm), $7/24$ o $5\sqrt{2}/24$ (49,3 cm), y $1/4$ (42,3 cm). A varios de estos tamaños se adaptan también las dimensiones de los ladrillos y distintas piezas constructivas documentadas.

Además del interés por la riqueza de tamaños que aporta el sistema, y que fueron utilizados en Onda, se destaca también la distribución de módulos que presenta el edificio (fig. 6).

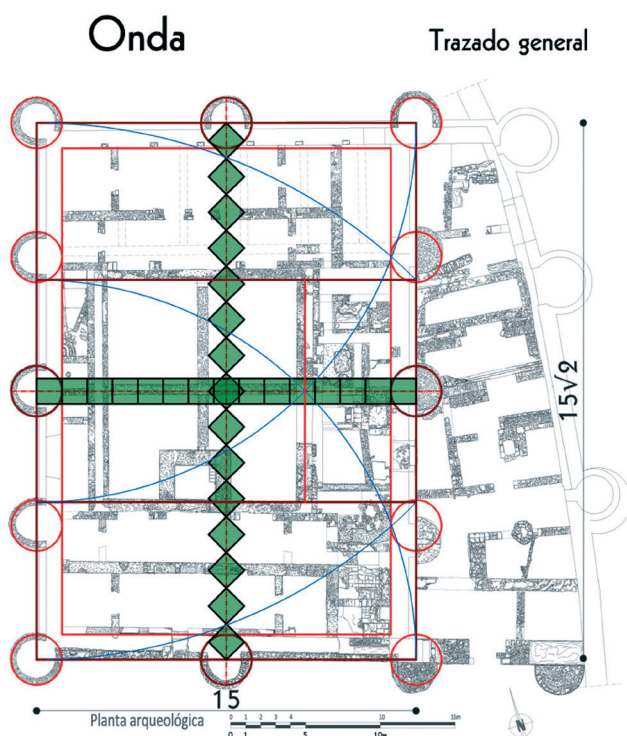
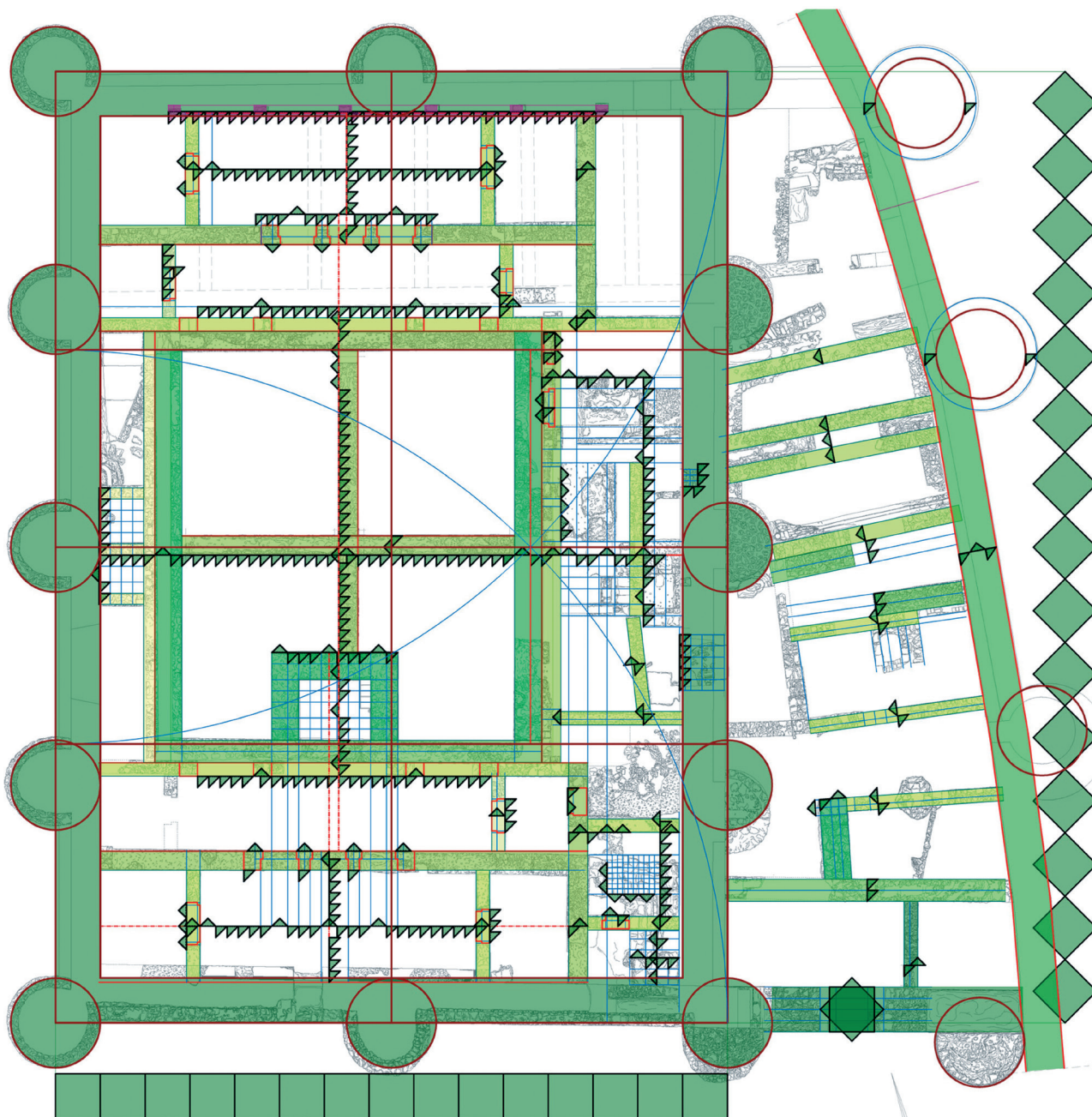


Figura 5. Trazado general.

Onda

Planta antropométrica

M:1.6909 m



Planta arqueológica



UNIDAD	BRAZA	VARA	CODO	CUARTA	PALMO
FRACCIÓN	1	1/2	1/4	1/8	1/24
1	169,09	84,54	42,27	21,14	7,05
√2	239,13	119,56	59,78	29,89	9,96
1+√2	408,22	204,11	102,05	51,03	17,01
2+√2	577,30	288,65	144,33	72,16	24,05

Esesores de muros

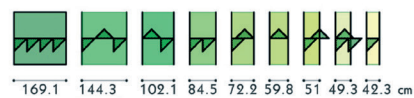


Figura 6. Planta antropométrica.

Se vuelven a repetir las pautas observadas en la arquitectura representativa desde la antigüedad. El uso de la segunda escala mayorada $\sqrt{2}$ se reserva a elementos nobles y sagrados, mientras que los diseños estáticos en cuadrícula dominan en las zonas y elementos destinados a usos ordinarios del hombre.

Así en Onda el trazado de la fortaleza es eminentemente noble en sus proporciones generales, aparte de en su doble simetría. Sus murallas presentan espesores de módulos grandes y enteros de la escala base.

También las puertas exteriores suelen presentar modulaciones estáticas base, como es el caso del acceso a la fortaleza. En la plataforma inferior del palacio sólo se utiliza esta modulación en el muro tras la puerta de la muralla, y en dos tramos del ámbito central próximo a la puerta de la fortaleza, con espesores en ambos casos de $1/2$.

No obstante, en el resto de dimensiones del palacio de Onda se utiliza la segunda escala, lo que avala el carácter regio de toda composición. Los juegos dinámicos definen los distintos espesores de muros y andenes, así como la composición de pórticos y tróforas.

Los muros más gruesos formalizan en T los ámbitos de salones y pórticos, y limitan el patio para apoyo de la crujía oriental. El siguiente espesor predomina en las particiones secundarias. Llama la atención que las dos alcobas de los pórticos que presentan un menor espesor de muro se disponen en la misma posición respecto del salón, a su derecha.

También destaca que el andén sur disponga de modulación base, y no dinámica como suele ser costumbre en elementos relacionados con el agua, según el estudio de otros edificios. En este sentido hay que hacer hincapié en que modulaciones estáticas rodeadas de dinámicas (como es el caso) responden a las normas funcionales propias de la nobleza. Esta zona, la presencia de la alberca, y el patio rodeado con andenes situado en la esquina sureste de la fortaleza, indican un especial tratamiento del cuerpo sur.

Respecto a los ámbitos dimensionados en trama estática $\sqrt{2}$ sólo se detecta esta modulación en este patio previo a la letrina. La zona rebajada central, que correspondería probablemente con la parte descubierta del patio, dispone de los restos de una solería de lajas de piedra que responden a una cuadrícula de $\sqrt{2}/12$.

5. El principio de simetría

Resalta el desplazamiento del eje norte-sur del palacio respecto de la escrupulosa geometría de la fortaleza. Sin

duda que existieron necesidades que obligaron a romper el principio de simetría en este sentido, como habilitar una crujía con ancho protocolario y otra de servicio. No obstante, el palacio mantiene estrictamente la simetría respecto del eje este-oeste de la fortaleza.

Lo que parece no responder a cuestiones prácticas es el distinto desplazamiento de cada elemento respecto del eje norte-sur. Mientras que los pórticos se centran con un borde del andén central, las tróforas se desplazan cada una en un sentido, provocando que el salón sur disponga claramente del acceso descentrado. Tampoco queda centrada la alberca ni con los pórticos ni con las tróforas, pero se alinea con la modulación de la trófora sur.

Este juego de ejes pudo ser resultado de varios errores, pero parece ser intencionado ya que los desplazamientos se ajustan a tamaños del sistema. ¿Tal vez buscando sólo efectos visuales?

Lo que es de destacar es el distinto concepto de simetría dinámica de los antiguos, donde el eje no siempre tiene que coincidir con la mitad.

Así ponemos en relieve que el andén central este-oeste del patio del palacio no se encuentra centrado con el eje principal de la fortaleza —respecto del cual se sitúan pórticos y salones— sino que distribuye su espesor $(2+\sqrt{2})/8$ con $2/8$, o sea $1/4$ (1 codo) a un lado del eje principal, y con $\sqrt{2}/8$ al otro. Es la misma distribución que hacen los rebajes de las tróforas.

Tampoco el andén norte-sur se centra con los ejes de los pórticos, sino uno de sus bordes. Digamos que en el pasado las alineaciones no siempre se realizaban “a cara” o “a eje” como en la actualidad, sino lo uno, lo otro, o una combinación. Cada elemento añadido se desplaza con autonomía dentro de la trama general, según necesidades, y siempre manteniendo la simetría propia.

6. Los errores, la incertidumbre y la tolerancia

Los ejes y modulaciones deducidas ponen en relieve las desviaciones que presentan los restos actuales respecto al tamaño y a la posición teórica que indica el análisis. En el caso de Onda es de destacar el replanteo general de la fortaleza. El rectángulo real coincide prácticamente con el trazado geométrico $\sqrt{2}$ detectado, con un ligero incremento de la longitud del lienzo oriental que provoca cierta desviación de las alineaciones norte (12 cm) y sur (15 cm), lo que representa un error total del +0,75% respecto a la longitud del lienzo occidental.

Los torreones presentan siempre el mismo diámetro teórico, y su posición está ajustada en todos los situados en el lateral occidental, y en los centrales del lateral norte y oriental. El resto presenta ciertos desplazamientos, en parte debidos al incremento de longitud señalado en el lateral oriental. En el caso de la posición del torreón de la mitad sur de este lateral, tal vez se pretendía separarlo de la puerta de acceso a la fortaleza.

Escasas diferencias más encontramos entre forma real y teórica. A pesar de los numerosos espesores de muros utilizados, sus tamaños y posición responden a la trama deducida mediante combinaciones sencillas de módulos escuadra.

Por supuesto que un mismo elemento no mide siempre lo mismo, sobre todo si lo que queda son restos arqueológicos de siglos de antigüedad. Los errores que se cometieron en su diseño y ejecución, las necesarias aproximaciones por la utilización de valores irracionales del sistema (residuos), las reformas, los desgastes y deformaciones sufridos durante su existencia, las técnicas artesanales que se utilizaron, incluso los terremotos, los cambios reológicos y térmicos, la propia demolición de la obra, etc., provocan variaciones de tamaño y posición de cada parte de una obra.

Y si bien siempre existen estas diferencias entre medida real y teórica, en parte por el propio principio de incertidumbre, se pone en relieve que las desviaciones obtenidas en el estudio de numerosas arquitecturas, incluidas éstas de Onda, son en general inferiores al 1%. Estos valores cumplen en general con las tolerancias actuales en la construcción, establecidas en distintas normas legales como la UNE-EN ISO 7976. Es decir, que si estas obras se construyeran hoy en día, los errores de replanteo que presentan serían en casi todos los casos aceptables.

Es frecuente que se den algunos errores mayores en las obras, o que existan dimensiones puntuales que no respondan claramente a una modulación sencilla. En este caso es posible realizar un análisis pormenorizado del elemento deformado con objeto de discernir las causas de estas desviaciones (errores de diseño, construcción, lindes previas, deformación patológica, reforma...).

En cualquier caso esta incertidumbre recaerá puntualmente sobre algunas partes, y estas excepciones no cuestionan los resultados generales si se ha procedido con rigor en el análisis antropométrico, y las coincidencias de la trama deducida son generalizadas.

7. El principio de conservación

La técnica aquí utilizada se basa en unos principios metodológicos comunes a otras obras analizadas, y permite detectar el módulo dimensional empleado, así como la modulación general y de cada parte, por lo que es muy valiosa para entender constructivamente el edificio. Y aunque el valor del módulo de forma aislada no proporciona información de la cronología de las obra, el estudio de varias edificaciones en ámbitos espacio-temporales concretos puede ayudar a su datación.

Conocida es la variabilidad de las referencias de medida usadas en el pasado. Aunque en ámbitos concretos hubo épocas en que se mantuvo el mismo patrón de medidas, lo frecuente era que cada cierto tiempo se cambiase, bien por imposición en territorios conquistados, bien por cambios dinásticos o políticos (Kula 1980).

Toda vez que se está constatando el mantenimiento milenario del sistema de doble medida en la arquitectura, podemos deducir con precisión el módulo con que fue construida cada obra, y compararlo con el de otras obras coetáneas en busca de coincidencias.

Y si bien la muestra analizada hasta ahora no es significativa de ningún ámbito concreto, con los valores ya deducidos y los conocidos de antiguas medidas, podemos comentar que el módulo islámico del Palacio de Onda (169,09 cm) se asemeja a otros de tamaño medio utilizados a lo largo de la historia, y coincide temporal y culturalmente con el de 169,92 cm detectado en el Salón Rico de Medina al-Zahra (Roldán 2014a: 264).

A pesar de que la obra de la fortaleza de Onda es algo anterior a la construcción del palacio, en éste se mantuvo el mismo módulo. Se trata del principio de conservación que afecta a todo edificio construido, y que implicaría que durante toda su existencia, las reparaciones, reformas y ampliaciones deban emplear el mismo módulo original, manteniendo así el principio de proporcionalidad del todo con las partes.

Este principio no se mantiene cuando el edificio es representativo de otro gobierno. En estos casos la pauta detectada es que las nuevas partes añadidas o reformadas adoptan el nuevo patrón impuesto. Como en la Mezquita de Córdoba, donde todas las fases de construcción emplearon la misma unidad de medida durante dos siglos, pero al convertirse en Catedral se adoptaron al menos tres valores distintos de módulo. O como en el Cuarto Real de Santo Domingo de Granada, al que se le añade un forjado en vara castellana al convertirlo en capilla cristiana (Roldán 2014a: 290).

Así es como responden los escasos restos del palacio gótico que sustituyó al islámico tras la conquista de Onda en 1238. Su módulo algo mayor (184,39 cm) también es similar a otros históricos, estando próximo al correspondiente con las grandes varas levantinas de siglo XIX (Valencia y Castellón 181,2 cm, Alicante 182,4 cm)². No obstante, en la visita realizada para las mediciones directas se observa que la mayor parte de edificaciones del centro histórico de Onda —Plaza del Almudín, Iglesia de la Asunción, Portal de San Pedro— se ajusta a una unidad de medida similar a la de la vara castellana o de Burgos. Esto podría indicar que el valor de los restos del palacio gótico corresponde posiblemente con el módulo propio de la Orden de Montesa, y que posteriormente Onda se rigió con medida castellana.

DEBATE

Numerosos autores consultados han utilizado las formas octogonales y la $\sqrt{2}$ como premisa de sus propuestas geométricas sobre la proporción en arquitectura. En este sentido es de destacar la intuición de Jay Hambidge (1920) con su teoría de simetría dinámica. Sin embargo no han sido creíbles las tesis de que los antiguos tuvieran los conocimientos matemáticos para usar varias bases geométricas.

Comenta Luis Moya que la propuesta de Hambidge presenta dos dificultades:

(...) aceptar la hipótesis de que un matemático de la época se dedicase a construir rectángulos de proporciones muy variadas (...) adosando dos de ellos por sus lados largos, o por uno largo con un corto, o por los dos cortos.

(...) el empleo constante de números irracionales, que en el caso de haberse hecho el proyecto con este sistema, hubiera dificultado en sumo grado la determinación de las medidas reales de cada pieza. (Moya 1993:494-5)

No obstante las dificultades de utilizar rectángulos (o triángulos) de proporciones irracionales se reducen enormemente si solamente se usa uno. Y si la única proporción utilizada es la armónica $\sqrt{2}$ se facilitan las divisiones binarias, y el cálculo de cuadrados (áreas) y raíces,

umentando significativamente los tamaños y diseños geométricos disponibles. La dificultad del manejo de los valores irracionales se elimina precisamente adosando lados largos y cortos, y operando con binomios de números enteros bajos.

Realmente esta cuestión ya fue resuelta por Enrique Nuere (1985) para los diseños de lazo y cubiertas de madera. Mediante cartabones específicos se pueden controlar, una por una, todas las bases geométricas. Y aunque a nivel de cuantificación Nuere se haga eco de las recetas simplificadas del tratado de Diego López de Arenas, sus investigaciones revelan la capacidad de controlar dimensionalmente estas geometrías irracionales adosando lados largos (cabezas) y cortos (colas) de los correspondientes cartabones.

La hipótesis planteada es coherente con los conocimientos de los antiguos, al utilizar tamaños antropométricos comunes y números enteros bajos. Se basa en el empleo de sencillas herramientas y recursos gráficos que están bien documentados históricamente. Y constituye un sistema de coordinación modular sencillo, práctico y eficiente que permite justificar los distintos tamaños de cada obra arquitectónica en base a una medida de referencia.

No obstante aceptar la hipótesis y los resultados cuestiona la mayoría de las premisas adoptadas en las investigaciones realizadas hasta ahora sobre la materia.

CONCLUSIONES

Los resultados previos a esta investigación han permitido establecer la hipótesis de que una simple ley geométrica es suficiente para justificar las diferentes dimensiones de las construcciones arquitectónicas del pasado, desde su trazado general hasta cada una de sus partes. Esta conjetura de fundamenta en la observación de que toda modulación en los edificios históricos puede hacerse coincidir exactamente con lados y diagonales de un mismo cuadrado patrón, y con sus divisiones duodecimales. Pero no puede hacerse coincidir exclusivamente con la escala racional del lado del cuadrado. Es necesaria, y suficiente, la escala dual lado-diagonal.

En este caso la planta arqueológica de la fortaleza de Onda ha permitido, como única fuente, deducir las tramas compositivas que definen sus distintos elementos en planta, y el tamaño teórico de los módulos antropométricos utilizados en sus construcciones.

Onda también ha puesto de manifiesto los principios de jerarquía y de conservación anteriormente detectados

2 En 1849 Isabel II promulgó la “Ley de Pesos y Medidas” que adoptaba el metro como unidad fundamental del sistema de medidas y pesos en todos los dominios españoles. En 1852, 1863 y 1886 se publicaron tablas de correspondencia entre las antiguas medidas recopiladas en las distintas provincias y el nuevo sistema métrico-decimal.

en otras obras, aportando nuevos matices sobre la doble medida en la arquitectura del pasado. La riqueza de modulaciones dinámicas presentes en la planta de la obra islámica confirma su carácter regio y representativo.

Utilizando el enfoque de la investigación, ha sido demostrada experimentalmente la utilidad del sistema propuesto para identificar las unidades de medida exactas que fueron utilizadas para construir edificios en el pasado, incluso a partir únicamente de sus restos arqueológicos.

Y aunque admitir la hipótesis implica cuestionar el actual estado del arte, y surgen nuevas preguntas, la formulación del sencillo sistema de proporciones que tan generalizados y precisos resultados está ofreciendo debe ser tenida en consideración.

Se espera que el presente trabajo sea considerado riguroso, y útil a otros investigadores capacitados que se animen a considerar la validez de la hipótesis, y el interés que representa realizar estos estudios antropométricos del patrimonio arquitectónico.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco la información y comentarios facilitados por los compañeros del Laboratorio de Arqueología y Arquitectura de la Ciudad (LAAC), en este caso especialmente a Julio Navarro y a Fidel Garrido, de la Escuela de Estudios Árabes de Granada (CSIC). Gracias al Ayuntamiento de Onda por facilitarme la visita al palacio, y al arqueólogo Vicent Estall y a sus colegas por la compañía y la visita extendida. Y gracias a todos aquellos que no nombro, y que han sido o siguen siendo fundamentales para el desarrollo de las investigaciones.

En Memoria de uno de ellos, Antonio Jiménez Torrecillas.

BIBLIOGRAFÍA

- Aljazairi López, G. 2012: El orden interno de los trazados geométricos y su aplicación a nuevos diseños: El patrón, el canon, la proporción y los cartabones. Fundación Robles Pozo, Granada.
- Almagro, A. y Orihuela, A. 1997: "Propuesta de intervención en el Cuarto Real de Santo Domingo (Granada)". Loggia. Universidad Politécnica de Valencia.
- Camps Cazorla, E. 1953: Módulo, proporción y composición en la arquitectura califal cordobesa. Instituto Diego Velázquez, Madrid.
- Creswell, K. A. C. 1979: Compendio de arquitectura paleoislámica. Universidad de Sevilla.
- Durero, A. 2000: De la medida. Akal, Madrid.
- Ecohard, M. 1977: Filiation de monuments grecs, byzantins et islamiques. Geuthner, Paris.
- El-Said, I. y Parman, A. 1976: Geometric concepts in Islamic art. World of Islam Festival Publishing Company Ltd, Londres.
- Escalona Molina, M. 2009: Estatal: Una aproximación al universo de la mensura. Servicio de Publicaciones y Divulgación de la Junta de Andalucía, Sevilla.
- Evers, B. y Thoenes, C. 2011: Teoría de la arquitectura: Del Renacimiento a la actualidad: 89 artículos sobre 117 tratados. Taschen, Koln.
- Ewert, C. 1986: The Mosque of Tinmal (Morocco) and some new aspects of Islamic architectural typology. The British Academy, London.
- Fernández Gómez, M. 1999: La teoría clásica de la arquitectura: Clasicismo y Renacimiento. Universidad Politécnica, Valencia.
- Fernández Puertas, A. 1975: "Lazo de ocho occidental o andaluz. Su trazado, canon proporcional, series y patrones". Al-Andalus: Revista de las Escuelas de Estudios Árabes de Madrid y Granada, vol. 40, nº 1, pp. 199-204.
- Fernández Puertas, A. 2000: "Mezquita de Córdoba. Trazado proporcional de su planta general (siglos VIII-X)". Archivo Español de Arte, vol. 73, nº 291, pp. 217-247.
- Fernie, E. 1978: "Historical metrology and architectural history", Art History, vol.1, nº4, pp. 385-399.
- González Raposo, M. 1998: Introducción a la metrología histórica. Universidad da Coruña.
- Hambidge, J. 1920: Dynamic symmetry: the Greek vase. University Press, Yale.
- Hernández Giménez, F. 1961: El codo en la historiografía árabe de la Mezquita Mayor de Córdoba: contribución al estudio del monumento. Maestre, Madrid.
- Hoz Arderius, R. 2002: La proporción cordobesa. Colegio Oficial de Arquitectos de Córdoba.
- Klein, H. A. 1974: The world of measurements: Masterpieces, mysteries and muddles of metrology. Simon and Schuster, London.
- Kula, W. 1980: Las medidas y los hombres. Siglo XXI, Madrid.
- Merino de Cáceres, J. M. 1985: "El trazado de la Bab Al-Uzara' (Puerta de San Esteban en la Mezquita de Córdoba)". Academia: Boletín de la Real Academia de Bellas Artes de San Fernando, nº 60, pp. 287-298.
- Michell, J. 1981: Ancient metrology. Pentacle Books, Bristol.
- Moya Blanco, L. 1981: "Relación de diversas hipótesis sobre las proporciones del Partenón", Academia: Boletín de la Real Academia de Bellas Artes de San Fernando, (52), pp. 25-156.
- Moya Blanco, L. 1993: La arquitectura cortés y otros escritos. Colegio Oficial de Arquitectos, Madrid.
- Navarro Palazón, J. 2012: "El palacio de Onda: Un enigma para la historia de al-Andalus en el siglo XI" en Le plaisir de l'art du Moyen Âge, pp. 300-312. Picard, Paris.
- Nissen, E. 1892. Metrología Greca e Romana (Vol. 3), Milán (Reed.1977).
- Nuere Matauco, E. 1985: La carpintería de lo blanco: lectura dibujada del primer manuscrito de Diego López de Arenas. Ministerio de Cultura, Madrid.
- Pacioli, L. 1987: La divina proporción. Akal, Madrid.
- Redondo, A. y Reyes, E. 2008: "La geometría de los polígonos cordobeses", Visual Mathematics, 10_4. <http://www.mi.sanu.ac.rs/vismath/antonia2010/cord.pdf> [15-03-2013].
- Roldán, F. 2011: La escuadra sagrada. Bubok, Madrid.
- Roldán, F. 2012a: "Modulación, tipología de tramas y ajuste a los límites en la metrología arquitectónica clásica", EGA: Revista de Expresión Gráfica Arquitectónica, (20), pp. 172-183.
- Roldán, F. 2012b: "Method of modulation and sizing of historic architecture", Nexus Network Journal, 14(3), pp. 539-553.
- Roldán Medina, F. J. 2014a: Principios de metrología en la arquitectura del pasado. Editorial Universidad, Granada.
- Roldán Medina, F. J. 2014b: "El origen de la proporción en la arquitectura clásica... y su futuro" en Arredondo, Calatrava, Cid y García Pérez (eds.), De la casa al territorio. Jornadas de investigación en arquitectura, pp. 275-286.
- Rottländer, C.A. 1996: "New ideas about old units of length", Interdisciplinary science reviews, Vol.21, nº 3n pp.235-241.
- Ruiz de la Rosa, J. A. 1987: Traza y simetría de la arquitectura: En la antigüedad y medievo. Universidad, Sevilla.

- Suárez Jiménez, C. M. 2009: Métrica en arquitectura. Universidad Iberoamericana, México D.F.
- Vallvé Bermejo, J. 1976: "Notas de metrología hispano-árabe. El codo en la España musulmana", *Al-Andalus: Revista de las Escuelas de Estudios Árabes de Madrid y Granada*, vol. 41, nº 2, pp. 339-354.
- Vitruvio Polión, M. 2007: *Los diez libros de arquitectura*. Akal, Madrid.
- Wisshak, J.P. 1983: "Masse und Proportionen in der almohadischen Moschee von Tinmal". *Bauplanung und Bautheorie der Antike*. Disk 4, Berlin.
- Wittkower, R. 1968: *La arquitectura en la edad del humanismo*. Nueva Visión, Buenos Aires.