

# La triple escalera de caracol en el Convento de Santo Domingo de Bonaval (Santiago, España): hipótesis de diseño y construcción

## *The triple spiral staircase in the Convent of Santo Domingo de Bonaval (Santiago of Compostela, Spain): design and construction hypothesis*

M. C. Fernández Cabo (\*), A. González Uriel (\*), M. de Miguel (\*)

### RESUMEN

Hacia 1700, en los últimos años de su carrera, el maestro mayor de la catedral de Santiago de Compostela, Domingo de Andrade, realizó un alarde técnico sin precedentes al construir una singular escalera de caracol en el Convento de Santo Domingo de Bonaval. El presente trabajo ofrece una hipótesis constructiva de la obra en base a los conocimientos y medios disponibles en la época, atendiendo a su geometría, trazado, labra de los peldaños y puesta en obra en condiciones de estabilidad estructural. Se ha realizado una maqueta a escala 1:5, que ha permitido demostrar la hipótesis de que la escalera pudo ser levantada sin necesidad alguna de apeos. Tal circunstancia habría supuesto para Andrade, arquitecto y contratista, una reducción importante de los costes de construcción. Más allá de la indudable demostración de pericia, es muy posible que motivaciones económicas animaran al maestro en su audacia.

**Palabras clave:** escaleras de caracol; cantería; trazas y cortes; arquitectura; historia de la construcción.

### ABSTRACT

*By 1700 Domingo de Andrade, at that time master builder of the Santiago de Compostela cathedral (North-west of Spain), built a unique spiral staircase in the Santo Domingo de Bonaval's Convent, on the outskirts of the city. This paper provides a construction process hypothesis based on the available knowledge and technical resources at that time, involving the geometry, layout, stonework of the steps and their positioning on the site. A 1:5 scale model has been made to demonstrate that the staircase could have been built with no scaffolding at all. That would have meant for Andrade, architect and builder, an important cost reduction. Moreover been a masterpiece with an undeniable show of prowess, it is quite possible that economic reasons had driven the master to this bold design.*

**Keywords:** spiral staircases; stonecutting; architecture; construction history.

(\*) Universidad Politécnica de Madrid, Madrid (España).

Persona de contacto/*Corresponding author*: [manuel.demiguel@upm.es](mailto:manuel.demiguel@upm.es) (M. de Miguel)

**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-3393-2774> (M. C. Fernández Cabo); <http://orcid.org/0000-0001-8511-6720> (A. González Uriel); <http://orcid.org/0000-0002-1803-2428> (M. de Miguel)

---

**Cómo citar este artículo/Citation:** Fernández Cabo, M. C., González Uriel, A., De Miguel, M. (2017). La triple escalera de caracol en el Convento de Santo Domingo de Bonaval (Santiago, España): hipótesis de diseño y construcción. *Informes de la Construcción*, 69(546): e202, doi: <http://dx.doi.org/10.3989/ic.16.119>.

**Copyright: © 2017 CSIC. Licencia / License:** Salvo indicación contraria, todos los contenidos de la edición electrónica de *Informes de la Construcción* se distribuyen bajo una licencia de uso y distribución Creative Commons Attribution License (CC BY) Spain 3.0.

## 1. EL CONTRATO DE OBRA. EL MAESTRO DOMINGO DE ANDRADE

Se conserva la escritura, de fecha 20 de octubre de 1695 (1), firmada por el entonces arzobispo de Santiago, Fray Antonio Monroy, que financiará la obra, y Fray Antonio Pérez en representación de los frailes, contratando a Domingo de Andrade la fábrica del claustro y más por 41.000 ducados, una cantidad importante que incluye la reforma y ampliación del hospicio, rectorio, etc. Las obras se habían iniciado meses antes y el contrato hace referencia a una planta ya trazada por el propio Andrade, hoy desaparecida, y a una memoria transcrita en la misma escritura. El plazo de obra se fija en 6 años, aunque para 1705 aún quedarían detalles por rematar.

En la sexta condición del contrato se establece que «*sea toda de cantería la escalera que se ha de hazer nueva y sus losados tambien*», y más adelante se añaden otros requisitos: «*13ª Yten es condicion que en la escalera se ponga varandilla de hierro y se asegure en los pilares con sus tirantes, y los balaustres sean redondos y fuertes pero bien limados y pulidos.*» Esto parece prever una escalera de tramos rectilíneos apoyados en pilares. Sin embargo, a renglón seguido leemos «*Y si dicha escalera fuere de caracol de mallorca se escussa dicha varandilla. Pero en todo casso este el maestro obligado a disponerla de tal modo que de ella se comuniquen el passo a todos los dormitorios de uno y otro lienço, y que le deje con toda la lux neçessaria.*» Esta salvedad, dando la opción a un *caracol de Mallorca*, parece un añadido a la redacción inicial (posiblemente incorporado a sugerencia del propio Andrade), por cuanto a éste le resultase más ventajosa su ejecución. En el texto aparecen referencias a problemas de pequeños desacuerdos de nivelación entre distintas dependencias del edificio. Es posible que Andrade se diera cuenta antes de firmar el contrato de que una escalera de caracol podría ser adecuada para resolver estas pequeñas diferencias.

Del análisis del documento se infiere que el proyecto de la escalera es atribuible a Domingo de Andrade, y que éste actúa también en calidad de contratista, por lo que es pertinente analizar las condiciones de diseño de la escalera también bajo un punto de vista económico.

En 1695 Domingo de Andrade (1639-1712) lleva diecinueve años siendo Maestro Mayor de la Catedral de Santiago, «*assi*

*de carpinteria como de canteria*», y compagina esta tarea con encargos en la ciudad y por toda Galicia. La figura de Domingo Antonio López de Andrade ha sido estudiada detalladamente por el profesor Taín Guzmán, con una minuciosa recopilación de documentos originales. Persona formada intelectualmente, Andrade hablaba latín y castellano y reunió una importante biblioteca personal que incluía libros de geometría y matemáticas, además de arquitectura civil y militar. En 1665 publicaba en Santiago «*Excelencias, Antigüedad y Nobleza de la Arquitectura*». No es un tratado ni se ocupa de cuestiones técnicas «*porque ay bastante escrito*», sino una disertación en demanda del reconocimiento de la Arquitectura como Arte Liberal, e incluso como Ciencia. Esta diferenciación respecto a los oficios manuales, además del reconocimiento social, conllevaba la posibilidad de acceder a ciertos cargos públicos y la exención de algunos impuestos. Reivindicación compartida por autores coetáneos como Juan Bautista Villalpando o Fray Lorenzo de San Nicolás, que no se vería plenamente satisfecha hasta bien entrado el siglo XVIII.

Andrade era también un experimentado constructor y conecedor del oficio. En 1662 había ingresado en los talleres de la catedral. En 1663 ya era oficial y desde ese año hay constancia de su pertenencia al gremio compostelano de maestros canteros y entalladores. En 1669 era nombrado «*Aparejador Menor del Tabernáculo*» y en 1672 «*Aparejador Mayor de la Catedral*». Desde enero de 1676 hasta su muerte será «*Maestro Mayor*» de la misma. Realizó numerosos informes técnicos. Se ocupaba con frecuencia de seleccionar y comprar el material para las obras, y sabemos que exploró canteras de mármol y jaspes en Galicia y Asturias.

## 2. ANTECEDENTES

La triple escalera de Bonaval es la única construida en su género de que se tiene constancia. El profesor Sanjurjo ha señalado que se trata de «*un tipo nuevo y absolutamente original*» (2). Apunta también este autor que el tipo deriva del «*caracol de oxo redondo de dos subidas*», dibujado en la plana 249 del manuscrito de Ginés Martínez de Aranda *Cerramientos y trazas de montea*, ca. 1600 (3), que a su vez es una variante del «*caracol de oxo que dicen de Mallorca*» del mismo manuscrito, como indica el propio Aranda: «*labrarás los pasos de este dicho caracol (...) como se hizo en el caracol de ojo redondo a 246 planas de este libro*» (4).

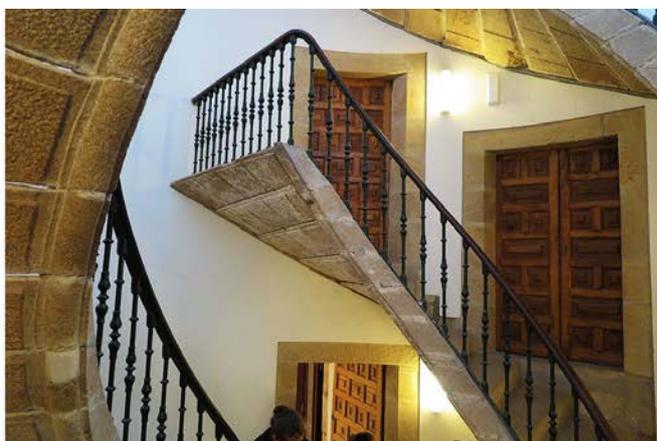


Figura 1. Escalera del Convento de Bonaval, hoy *Museo do Pobo Galego*, en Santiago de Compostela. Todas las fotografías y dibujos son de los autores, salvo indicación contraria.

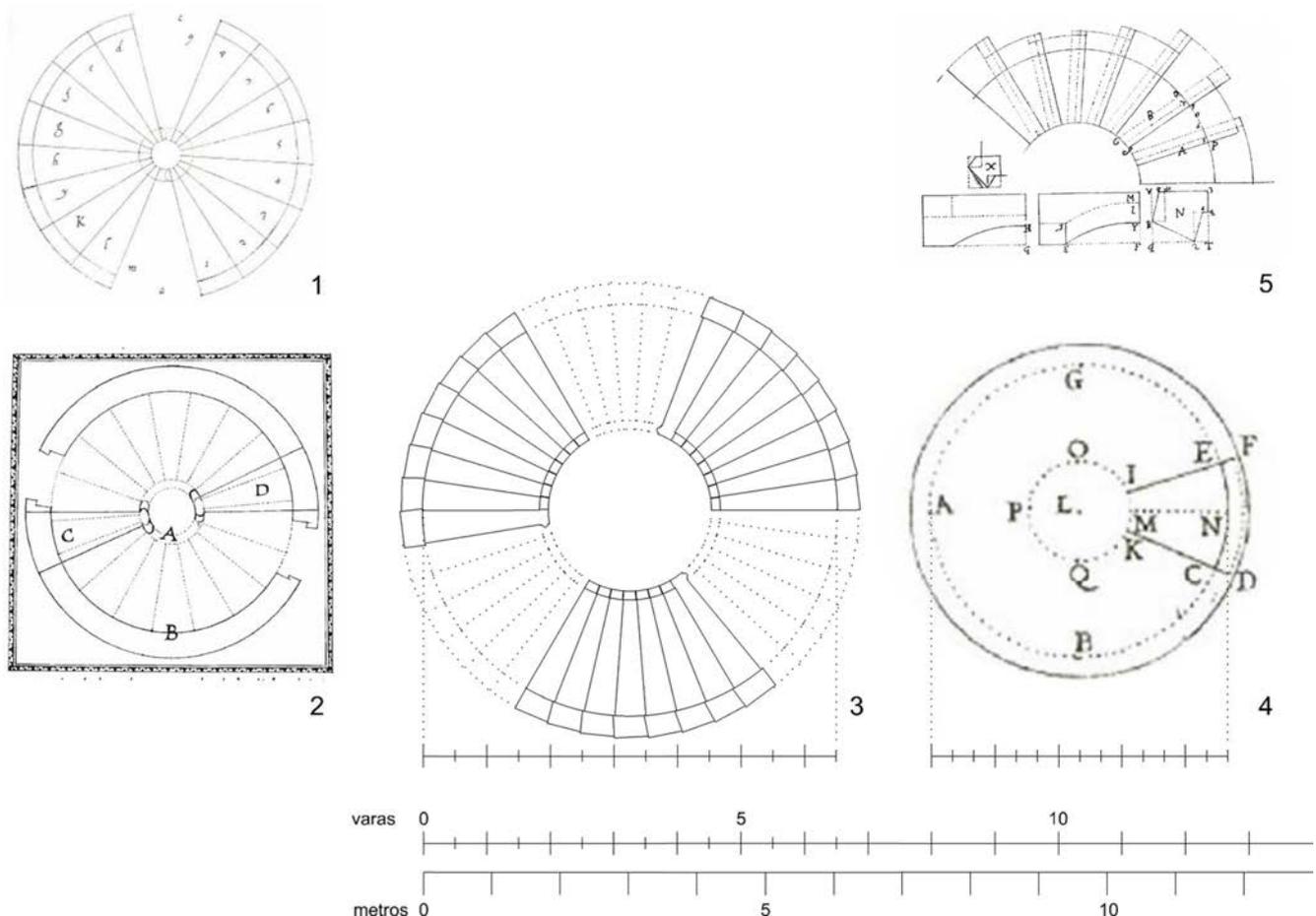


Figura 2. Correlato de plantas a una misma escala: 1. Gelabert (1563), *dos caracoles que giran dentro de un único círculo*. Propone caja de 18 palmos de diámetro; 2. Martínez de Aranda (ca. 1600) *caracol de ojo redondo de dos subidas*; 3. Andrade (1695-1705), *escalera construida en Bonaval*; 4. Tosca (1707-1715), *trazar y fabricar un caracol sin bóveda*. Propone caja de 14 pies de diámetro, con hueco central de 4 pies de diámetro y 1 pie de entrega en el muro; 5. Portor (1708-1716), *caracol volado en una caja redonda*. Las plantas 1, 2, 4 y 5 se tomaron de las referencias (7) (3) (8) y (9).

Martínez de Aranda había sido también maestro de obras de la catedral compostelana un siglo antes que Andrade (1603-1608). Precisamente en la catedral el propio Andrade acababa de construir un caracol asimilable a este «*caracol de oxo que dicen de Mallorca*», entre 1693 y 1695 en la capilla del Espíritu Santo. Sin embargo, en el Bonaval se alejará de la descripción de Aranda, tanto por dimensiones como por comportamiento estructural, amén de la singularidad del triple arranque.

En la obra de Andrade, como se detallará más adelante, el solape de un peldaño sobre otro es mínimo, y sólo hay un claro apoyo en la moldura del extremo que sirve de apoyo a la barandilla. Por el contrario, Martínez de Aranda dibuja cada peldaño ampliamente solapado sobre el anterior y especifica «...y con el ancho que tuviere uno de estos dichos (...) pasos y con la distancia que se le añade para lecho...».

Por otro lado, tanto la caja como el hueco central de la escalera son considerablemente mayores en Bonaval, con 42 pasos para completar la circunferencia, mientras que en el caracol de dos subidas de Martínez de Aranda son 18 pasos. Sanjurjo (5) calcula la altura libre para la propuesta Martínez de Aranda en torno a 220 cm (tres varas menos casi un pie de espesor del peldaño) y concluye que se trata más de una escalera doméstica que de una de escalera de honor al modo francés o alemán. En la Figura 2 apreciamos que también la propor-

ción de diámetros hueco/caja es sensiblemente mayor, y alejada del sexto de la definición de Vandelvira (6).

Ambas cuestiones, junto con la ligereza visual que conllevan (véase Figura 2), han conducido a relacionar nuestra escalera con las coetáneas *geometrical staircases* ejecutadas en Inglaterra (10). La escalera de la torre sureste de la catedral de St. Paul en Londres estaba siendo construida a la vez (1705) por Christopher Wren. Setenta años antes, Íñigo Jones había levantado su Tulip staircase en Queen's House, Greenwich (1616-1635). El antecedente inmediato de las *geometrical staircases* es la obra de Andrea Palladio (11), tanto la dibujada como la construida (Convento de la Caridad, Venecia 1560). Palladio y Vignola son señalados como indudable fuente de inspiración para Andrade (10) (12). Sus grabados circulaban entre la gente del oficio y el propio Andrade menciona a ambos autores en su *Excelencias*.

El cuaderno de arquitectura de Juan de Portor y Castro ha sido también señalado como posible referencia de Andrade, en especial su *caracol volado en una caja redonda* (fol. 27v). Nos parece improbable, pues, su redacción entre 1708 y 1716 (13), es posterior a la obra de nuestra escalera. Tal vez al contrario fuera Portor y Castro quien se inspirase en la obra de Andrade, con el que hay evidencia de que trabajó conocimiento (14). Portor utiliza el término «volado» para referirse a caracoles cuyos peldaños trabajan en ménsula, bien alrededor de

un machón central o bien empotrados en un muro perimetral. Este último tipo, el más parecido a nuestra escalera, no había sido abordado por Vandelvira ni por Martínez de Aranda. Pero sí el primero, llamado caracol «exento» por estos autores. Curiosamente, en la iglesia gótica del propio convento del Bonaval puede verse un caracol de estas características en sus tres últimos peldaños. Presenta esta escalera de subida al púlpito sus peldaños engatillados, sistema contemplado por los tres tratadistas aludidos y frecuentemente ejecutado en Francia, pero raro en España (15).

Sobre la multiplicidad de arranques, los caracoles de dos subidas reciben en el mencionado texto de Aranda una atención inusual en otros manuscritos de cantería de la época, con cuatro ejemplos (16). Un caracol doble sin apoyo interior, de intradós helicoidal y hueco central sensiblemente mayor puede verse en *Le due regole della prospettiva pratica*, de Vignola, publicado por Danti en 1583 (17). De cuatro tramos independientes es la gran escalera alrededor de un gran patio central que Palladio incluye en *I Quatre Libri d'Architettura* de 1570 (18), si bien aquí el intradós no es una superficie continua.

Con tres tramos no se tiene conocimiento de ningún ejemplo construido, fuera del que nos ocupa. Sanjurjo (19) menciona la existencia de una propuesta de triple escalera en el folio 101 de *Teórica y práctica de fortificación, conforme las medidas y defensas de los tiempos, repartida en tres partes*, de Cristóbal de Rojas, editado en 1598 en Madrid. El triple arranque aparece en el caracol exterior de una escalera de emperadores (dos caracoles concéntricos en cilindros coaxiales). Se desconoce si Andrade pudo haber tenido conocimiento de este diseño.

Respecto al procedimiento constructivo, Tomás Vicente Tosca, en su *Compendio mathematico* (8), pocos años posterior a la escalera de Andrade, incluirá «trazar y fabricar un caracol sin bóveda», del que comenta «aunque estas escaleras circulares no sean hermosas, pero su fábrica lleva mucho ingenio, y artificio». Y da indicaciones sobre el modo de llevarlas a cabo: «El assentarlas es muy fácil. Póngase la primera piedra en el suelo, de modo que la porción EFCD entre en el muro, que se puede ir fabricando juntamente.» Este caracol que propone Tosca es algo mayor que los de Vandelvira, Martínez de Aranda o Portor. Sus 14 pies de diámetro, con 4 para el ojo central, suponen una proporción cercana a la de Bonaval. Tosca marca 1 pie de entrega de peldaño en el muro. Sin embargo, hay una notable diferencia con la escalera de Andrade, y es el enorme solape entre peldaños, con una ligazón radial cuya superficie es la de medio peldaño.

### 3. CONDICIONES PREVIAS

Andrade interviene sobre una fábrica medieval preexistente. La escalera debía dar servicio a una serie de plantas construidas a determinadas cotas con anterioridad. Se ofrece más abajo una relación de los peldaños que enrasan su huella con el solado correspondiente en las distintas alturas de forjado. Se ha utilizado, para cada una de las tres escaleras, la misma referencia –I, II, III– que aparece tallada en bajorrelieve sobre su correspondiente cordón de la hélice, a la altura de los ojos en la planta de arranque.

Escalera I: Peldaños 9 / 26 / 41 / 60 / 81 / (82 final)  
Escalera II: Peldaños 9 / 24 / 28 / 42 / (45 final)  
Escalera III: Peldaños 8 / 11 / 25 / 38 / 42 / (45 final)

Observamos un primer nivel de suelo servido por la escalera con un pequeño desajuste de un peldaño en la escalera III (peldaños 9I-9II-8III). La siguiente planta se sirve con los peldaños 26I-24II-25III y la tercera planta con los peldaños 41I-42II-42III. Las escaleras I y II mueren en la tercera planta mientras que la escalera I llega hasta la linterna suministrando acceso a la cubierta (81I) y sirviendo en su ascenso a una quinta planta (60I). Los peldaños señalados como finales (82I-45II-45III) suben por encima del nivel de suelo al que sirven como se ve en la Figura 1. Esto puede tener su justificación en la necesidad de afianzar los peldaños que descansan sobre el umbral y que, de no continuar la escalera, carecerían del necesario empotramiento. Las pequeñas variaciones de cota entre plantas situadas a niveles equivalentes (24-28) en la escalera II, y de (8-11) y (38-42) en la escalera III, corresponden a diferencias en los niveles de forjado de cruñas construidas en distintas etapas históricas del edificio.

La constatación de estos datos da pie a justificar el diseño en caracol de la escalera. La separación de la escalera en tres tramos permite afinar mejor el ajuste de la altura de los peldaños para enrasar con las distintas plantas. De hecho, son apreciables pequeñas diferencias en la altura de tabica de los distintos tramos, así como correcciones en los umbrales de algunas puertas para intentar mantener lo más posible la regularidad de los peldaños y la altura de tabicas en un mismo tramo.

Tras una primera medición de la escalera en su estado actual con estación láser se constata bastante disparidad entre peldaños en sus dimensiones de longitud, huella máxima y mínima, etc. Las desviaciones son superiores a +/- 1 cm. Se opta por usar para nuestro modelo un peldaño prototipo ajustado a las medidas antropomórficas de la época, dentro de las tolerancias asumibles, tras una segunda medición manual. Establecemos un valor promedio de 20,44 cm de altura de tabica, tomado de la altura total de la escalera I (16,76 m) y su número de peldaños (82). Tabicas de un palmo (20,9 cm), hoy excesivas, eran habituales en 1.700 pese a que la estatura media de la población era menor que ahora.

La escalera se inscribe en un espacio limitado por muros ortogonales preexistentes, indicados en la Figura 3. El diámetro libre de la caja cilíndrica se aproxima a seis varas y media (unos 545 cm). El diámetro del hueco central (214 cm) es de algo más de dos varas y media<sup>1</sup>.

Cada vuelta está dividida en 42 pasos. Se puede medir una huella de 27,5 cm, casi un pie castellano, a la distancia de un brazo extendido (65 cm) de la barandilla. Tal vez esta condición fue utilizada a la hora de dimensionar el peldaño y el ojo de la escalera. El resultado es una longitud de huella aceptable tanto en el extremo interior (unos 18 cm, o 2/3 de pie) como exterior (40,8 cm). Y un amplio hueco central, que permite el paso de «toda la lux neçessaria».

<sup>1</sup> En 1568 Felipe II promulgaba una Pragmática para que las varas de medir sean iguales en todo el reyno (de Castilla, que incluía Galicia), como la Vara Castellana que se tiene en la Ciudad de Burgos. Ésta corresponde a 83,59 cm. Un pie o tercio equivale a 27,86 cm y una cuarta o palmo a 20,89 cm.

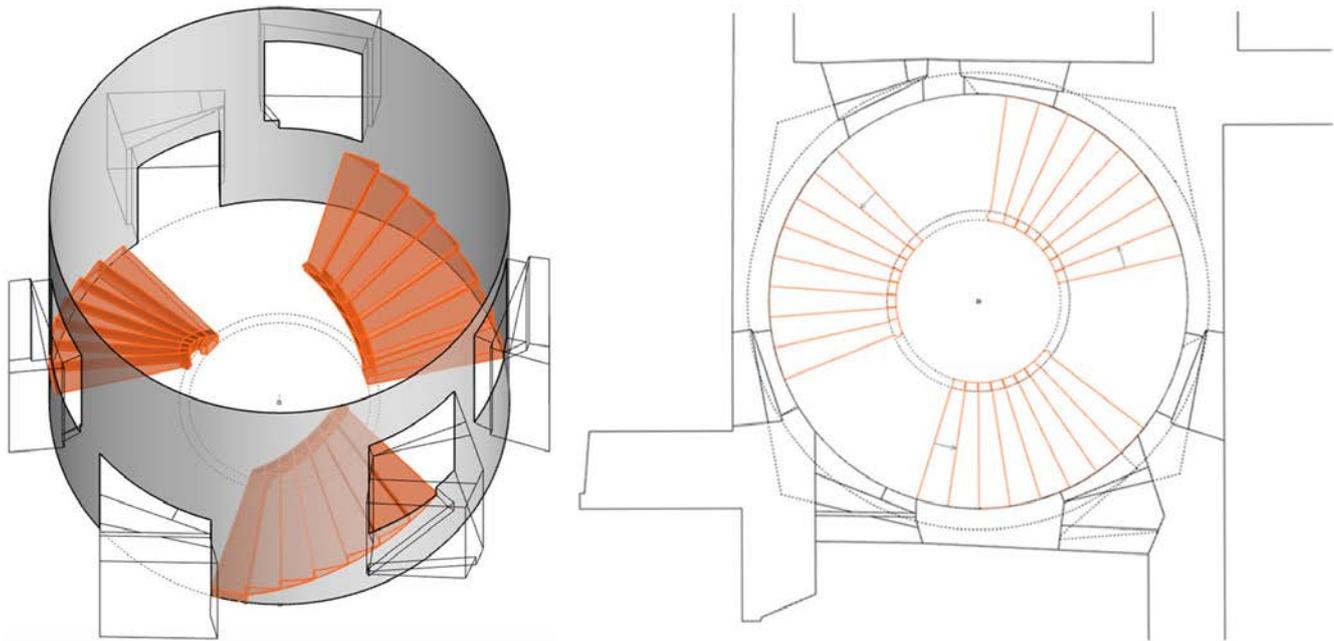


Figura 3. Axonometría y planta que incluye proyección de los dinteles de los accesos (línea continua). Buena parte de los muros existían en el momento de la construcción de la escalera. La relación entre la hoja de muro circular y los muros ortogonales encuentra su reflejo en la disposición de dichos dinteles.

#### 4. CORDÓN, INTRADÓS Y SOLAPE ENTRE PELDAÑOS

El cordón de la hélice, con una superficie helicoidal de generatrices horizontales, parece previsto para anclar con facilidad la llanta de hierro forjado que sirve de apoyo a la barandilla. El ancho de este cordón de piedra (12 cm) debe garantizar que el anclaje de hierro no reviente la débil sección de piedra.

Sin embargo, el contrato exige al constructor de colocar barandilla si la escalera «*fuere de caracol de mallorca*». Esta circunstancia, unida a la datación de la barandilla actual, que algunos autores señalan en 1887 (20), induce la cuestión de si existió una barandilla desde que finalizó la obra, o bien la escalera estuvo sin ella más de ciento ochenta años.

En cuanto al intradós, Andrade opta por una solución que aligere la sección del peldaño según se va acercando al ojo de escalera. Esta idea está relacionada con la consecución formal de una superficie helicoidal continua, pero también tiene una relación directa con el funcionamiento de los peldaños en voladizo, pues, aunque los peldaños se apoyan en el cordón helicoidal que bordea el hueco central, a medida que vamos subiendo éste gira y se desplaza de la vertical, por lo que la transmisión de cargas a través del apoyo central se ve en cierta medida comprometida.

La literatura de cantería contempla un significativo solape entre peldaños o ligazón, que puede ser en sector circular o en paralelo al borde del peldaño. Para caracoles de Mallorca es más frecuente la propuesta de ligazón radial, que encontramos en los textos de Vandelvira, Martínez de Aranda, Gelabert y Juan de Aguirre, frente a Alonso de Guardia y Portor que lo dibujan en paralelo. Sin embargo, para caracoles exentos o volados la solución radial de Vandelvira es minoritaria frente a las propuestas en paralelo de Martínez de Aranda y Portor.

Pero en el Bonaval Andrade prescinde por completo de ligazón como tal con comportamiento estructural. Hay un mínimo solape, no mayor de 2 cm ni clasificable en radial o paralelo, parece responder únicamente a los ajustes de replanteo y puesta en obra, y a la necesidad de asegurar que no haya discontinuidades. La amplitud de la superficie de apoyo sobre el cordón de la hélice permite al peldaño funcionar como viga biapoyada descansando en ese extremo interior y en el exterior en su entrega en el muro.

#### 5. ENTREGA DE LOS PELDAÑOS EN EL MURO

Por lo que respecta a la entrega de los peldaños en el muro de la caja, se puede observar, especialmente en los accesos más altos, la irregularidad de los bordes que no se pensaron para ir vistos. También en la cara inferior de los peldaños de la planta baja se pueden observar los bordes irregulares.

Es probable que en algún momento Andrade pensara construir la escalera en voladizo mediante un empotramiento en el muro capaz de soportar el par de fuerzas generado. Como hemos comentado, la ligereza de la sección de los peldaños en su extremo libre es acorde con esa idea. Tal vez realizara ensayos *in situ* para comprobar la fiabilidad de trabajar solamente en voladizo. Sin embargo, algunos peldaños no pueden tener empotramiento, precisamente los que aparecen a la vista debajo de las puertas de acceso a los diferentes pisos que sirve la escalera. La solución finalmente adoptada cuenta, además de con la entrega en el muro, con el apoyo sobre el husillo en hélice, dando como resultado una viga biapoyada. Los lechos quedan al aire en una ranura entre peldaños que deja pasar la luz. No podemos estar seguros de que esta ranura fuese la solución proyectada ya que es posible que hubiera un mortero inicial que se deshiciera con el tiempo.

Debe recordarse, por otro lado, que el muro circular de la caja no es exento, sino que se inscribe en una caja cuadrada preexistente, de modo que en los ángulos de esta caja hay

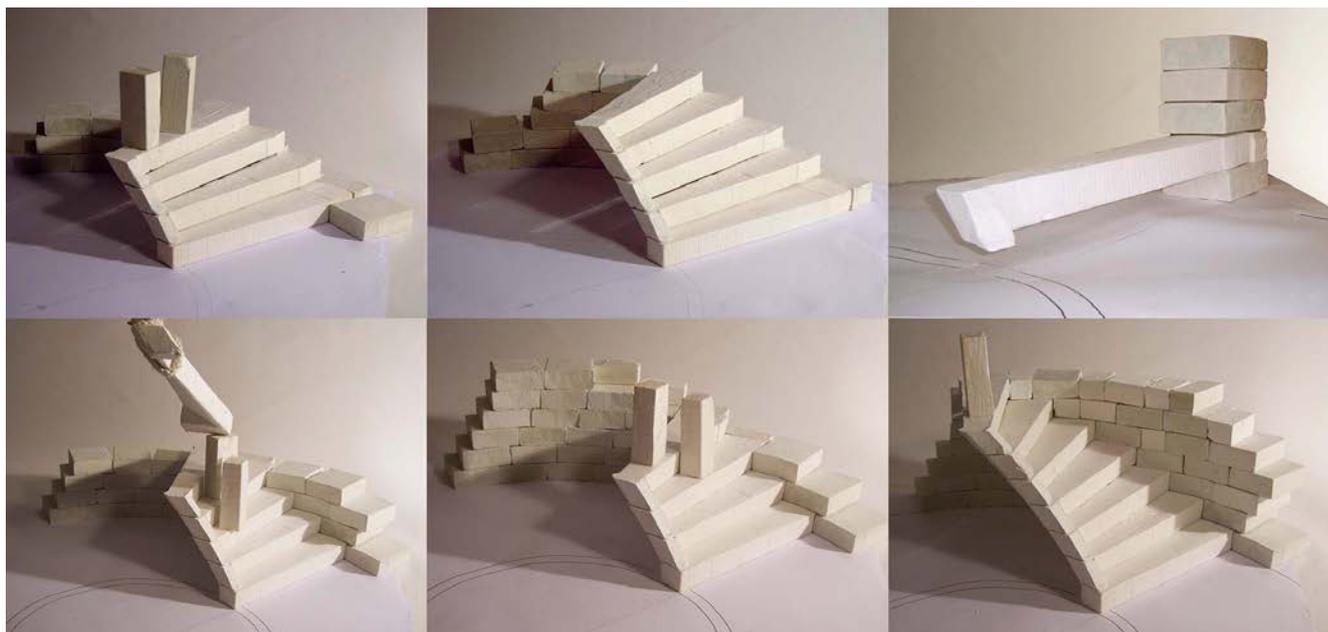


Figura 4. Hasta el cuarto peldaño el conjunto es muy estable, capaz de sostenerse, sin cargar en el empotramiento, mientras se apoyan materiales y operarios en el borde. *Sólo considerando peso propio la escalera puede acumular hasta siete peldaños al aire sin peligro de vuelco. El octavo peldaño produce claros problemas de estabilidad. Pero en la práctica debería contarse también con el empotramiento en el muro perimetral de los peldaños inferiores, ya que lo habitual era ir construyendo éste por hiladas a la par que la escalera.*

un considerable espesor de relleno. Cabría la posibilidad de que esa entrega no fuera uniforme. En la planta de Portor que puede verse con el número 5 en la Figura 2 así lo parece.

## 6. MODELO A ESCALA

Como posiblemente hiciera Andrade, hemos realizado una maqueta, en nuestro caso a escala 1/5, de un tramo de la escalera para probar su comportamiento estructural. Calvo (21) recuerda que en este tipo de construcciones históricas trabajar con modelos a escala es perfectamente legítimo, como recomendaba gran parte de la literatura de cantería, y justifican Heyman (22) y Huerta (23), ya que en general el material trabaja con sollicitaciones muy inferiores a sus tensiones máximas admisibles.

Hemos ejecutado los peldaños en yeso vaciado sobre un molde previamente realizado en poliestireno extruido, fresa-do mediante una máquina de control numérico. El muro de mampostería se ha fabricado con piezas de sillería, también coladas en moldes de yeso. Se establece un pie de entrega de los peldaños en el muro.

En los dinteles de las puertas a las que sirve la escalera observamos los encuentros tangentes entre cuadrado-círculo. Las piezas dividen por la mitad el grosor del muro, que es de dos pies. De aquí se dedujo que la entrega del peldaño debía seguir ese mismo criterio de profundidad. También tomamos como referencia un peldaño encajado en la jamba de la puerta del peldaño I-59, en el que se observa la forma y profundidad aproximada de su empotramiento en el muro.

El volumen de un peldaño estándar en nuestro modelo digital (Figura 5) es 88,32 dm<sup>3</sup>. Para la densidad del granito (2,8 kg/dm<sup>3</sup>) eso supone más de 247,30 kg (> 5 quintales) por pie-

za terminada. Sin embargo, los pesos que tuvieron que ser manejados en el transporte hasta la obra y en el mismo tajo debieron ser superiores. En el caso del volumen del bloque capaz, anterior a la labra, las medidas medias que proponemos en este trabajo ofrecen un volumen de 188,13 dm<sup>3</sup>, lo que implica manejar masas de 526,76 kg (11,5 quintales).

Para simular la sobrecarga de dos trabajadores durante la ejecución se ha calculado la proporción entre las masas del peldaño y el operario. A escala real el saledizo (parte no empotrada) del peldaño tiene una masa aproximada de 170 kg (61 dm<sup>3</sup> × 2,8 kg/dm<sup>3</sup> = 170,8 kg) considerando la densidad del granito 2,8 kg/dm<sup>3</sup>. Tomamos como referencia un obrero de 85 kg, que coincide con la mitad del citado saledizo. Manteniendo esa proporción entre masas, a escala de la maqueta (1/5), el volumen del saledizo del peldaño es de 0,493 dm<sup>3</sup>, y su mitad es poco menos de 0,25 dm<sup>3</sup>; con esta cifra cubicamos dos prismas de 3,8 × 5 × 13,15 cm y los utilizamos para poner a prueba la estabilidad del conjunto (Figura 4).

La hipótesis de equilibrio basada en un empotramiento mínimo del peldaño supone que la obra no se puede realizar sino con un sistema de apeos sucesivos a la espera del relleno del muro. Sin embargo, la realización del modelo permitió comprobar que el avance de la colocación de los peldaños era más estable de lo esperado<sup>2</sup>. La inestabilidad al vuelco y la aparición del momento torsor se puso a prueba con ensayos de sobrecarga de uso, utilizando prismas-obrero a escala y realizando presiones puntuales con el dedo índice de la mano en vertical, que suponen una carga mucho más elevada que las sobrecargas de los prismas-obrero.

Con la entrega de un pie se ha probado el montaje de varios peldaños apoyados sobre un muro que se va levantando al

<sup>2</sup> Investigaciones no publicadas aún de Fernández Cabo, J. L., y otros autores se centran en el cálculo analítico del comportamiento estructural de la escalera.

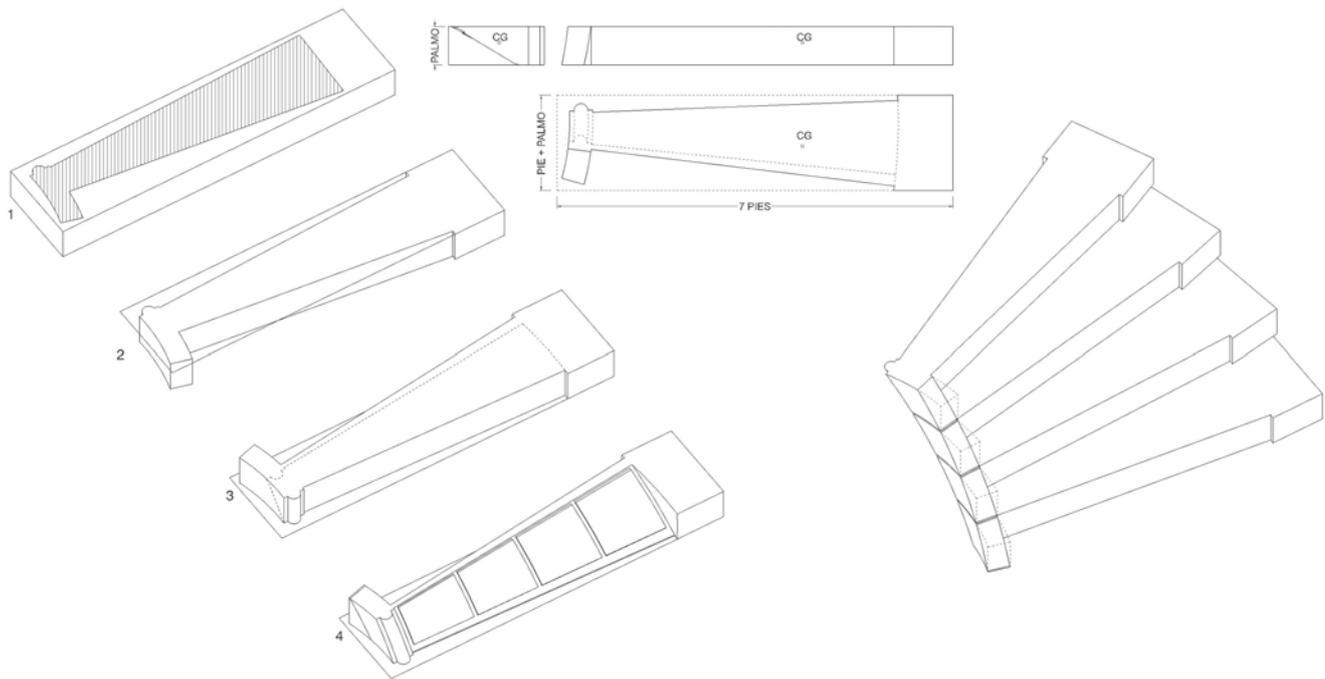


Figura 5. Del estudio realizado se deduce el siguiente proceso de labra del peldaño: sobre el bloque capaz se trabaja un plano superior. Se coloca la plantilla con el mejor aprovechamiento posible de la superficie en la que encaja. Se cortan las caras en vertical, a partir del borde de la plantilla. El peldaño se coloca boca abajo para tallar la superficie inferior y su almohadillado. La posición del centro de gravedad del peldaño se desplaza hacia el borde del peldaño gracias a la sustracción que conforma el helicoide inferior. Por último, se termina el cordón por su cara superior, la continuidad geométrica indica que probablemente ésta se remató una vez colocado el peldaño.

tiempo para apoyar la entrega –pero sin cargar material sobre ella, como se muestra en la Figura 4– con el objeto de conocer hasta qué punto el conjunto es estable sin necesidad de apeos. En nuestro experimento se pudieron instalar el peldaño de arranque, que apoya plano sobre el suelo, más otros cuatro peldaños, alcanzando un elevado grado de estabilidad. A partir de ahí se ha seguido colocando peldaños hasta llegar a siete, momento en que por el peso de los superiores empiezan a girar los peldaños de arranque y la estabilidad queda comprometida. Bajo la hipótesis más favorable de varias hileras de muro cargando sobre las entregas, el empotramiento del peldaño mejora y se equilibra el momento torsor. Esta situación es seguramente la más cercana al proceso real, en que la escalera y el muro son construidos simultáneamente. Es probable que Andrade experimentara con las primeras piezas y se diera cuenta de que era posible levantar el conjunto sin necesidad de realizar apeos de los peldaños.

En la historia de la construcción en piedra la forma o despiece de ciertas obras ha obedecido más a un alarde de pericia que a unos presupuestos lógicos o económicos (24). En el caso de la escalera de Bonaval, pese a que desde muy pronto fue admirada por propios y extraños (25), pensamos que no fue la exhibición de destreza, o al menos no sólo ésa la intención que movió a Andrade, sino la de un considerable ahorro económico.

## 7. TRAZADO, CORTE Y LABRA DEL PELDAÑO

Seguramente Andrade procedería como indicaba Martínez de Aranda para su *Caracol de ojo que dicen de Mallorca*, «Para

*trazar este dicho caracol de ojo le formarás la planta como parece entre las circunferencias A B la circunferencia A es el ojo del dicho caracol y la circunferencia B es la pared que sirve de caja del dicho caracol y verás en cuantos pasos quisieres repartir la vuelta del dicho caracol supongo que se repartió en doce pasos y cada uno ha de tener una cuarta de alto (...)*» (26).

Nuestra *vuelta* se verá *repartida* en este caso en 42 pasos, cuyo *alto* sí será de una cuarta. A partir de uno de los sectores puede dibujarse la base mixtilínea del prisma recto del que se obtiene el peldaño: «(...) y en uno de estos dichos pasos formarás la planta por cara (...) con esta dicha planta por cara labrarás primero los pasos de cuadrado que tengan una cuarta de alto como arriba es dicho (...)»

En el arco interior, de un lado la línea que generará la superficie superior del cordón helicoidal y del otro la que generará su superficie inferior. La primera es recta y radial, si bien algo adelantada (medio dedo) respecto a la arista del peldaño, posiblemente para evitar un encuentro en vivo con ésta y prevenir desportillones. La segunda es una media caña bordeada de sendas calles de un dedo, elemento decorativo que cumple también la función de incrementar el apoyo del peldaño en su extremo interior<sup>3</sup>.

Para el dibujo de los tramos de hélice sobre los cilindros interior y exterior la solución más extendida en la época era el empleo de una plantilla fija o cercha extendida, aproximando la hélice a circunferencia o elipse, como indica el propio

<sup>3</sup> En el caracol de Mallorca de Martínez de Aranda –y en el construido por Andrade en la catedral–, encontramos arcos de circunferencia a ambos lados, lo que da lugar a una forma que remite al pasamanos del caracol de husillo. De modo parecido, con más o menos ornamentación, lo vemos en los dibujos de Vandelvira y Alonso de Guardia. Gelabert propone en su caracol de nabo redondo y ojo abierto una plantilla de moldura simétrica a la nuestra, que dará lugar a un machón redondeado por arriba pero a una superficie reglada helicoidal en continuidad con el peldaño en el intradós.

Aranda. Andrade pudiera tal vez haber utilizado plantillas flexibles, aprovechando que en el desarrollo del cilindro la hélice queda como una recta, si bien este proceder no aparece documentado hasta 1747 por Juan García Berruguilla: «Trazar una escalera de caracol de ojo: (...) y cortando esta plantiulla en pergamino, cartòn ù hoja de lata, cosa que sea flexible, se ajustará à la piedra bien y tirarás sus líneas del primer vuelo, y saldrán todos los vivos que huviere con exactitud; y este es el arte, que las líneas espirales son líneas rectas (...)» (27). De cualquier modo, sólo la hélice interior que delimita la superficie superior del husillo, por otro lado la más visible, está claramente definida.

Para tallar la cara superior del cordón de la hélice puede utilizarse un baivel tal que su brazo curvo tenga la curvatura del cilindro interior de la escalera y el brazo recto forme un ángulo definido por la dirección del radio de la escalera. Con este baivel podremos ir tallando y comprobando la superficie superior del cordón. Con una muesca practicada en el mismo baivel podemos marcar los puntos de la hélice exterior del cordón, la que limita la arista del peldaño. Este baivel habrá de pasarse en horizontal apoyándose sobre la superficie cilíndrica previamente tallada.

Respecto a la superficie inferior del husillo, cuya planta tenemos dibujada tanto en la cara superior como inferior del bloque *de cuadrado*, si vamos vaciando la piedra usando una *saltrarregla* como comprobante (falsa escuadra) iremos uniendo puntos homólogos entre las dos plantillas horizontales de la huella. Así obtendremos una superficie reglada, pero no una superficie que siga la hélice en manera continua. Lo que obtenemos es una trayectoria poligonal de la parte inferior del cordón de la hélice. Ésta no es la solución correcta bajo un punto de vista de purismo geométrico, pero es la solución realmente ejecutada como se puede ver en la Figura 2.

Así pues, en la arista que mira al vacío de la escalera se ha procurado seguir la trayectoria en hélice del cordón, pero en la otra calle interior se ha tallado en línea recta usando *saltrarregla*. Esta calle tallada servirá de referencia para tallar la superficie de trasdós una vez que hayamos tallado la otra línea de referencia en el lado del peldaño que va contra el muro. En este lado tendremos que vaciar el bloque hasta conseguir un triángulo siguiendo la superficie cilíndrica del muro. El lado vertical de este triángulo se traza directamente pasando una escuadra en vertical desde la horizontal de la huella por el punto límite correspondiente. El lado horizontal (curvo) de ese triángulo se puede picar con un baivel que tenga la curvatura del muro y conservando la horizontal en la labra.

La superficie inferior no aparece como helicoides liso, sino que tiene una decoración de sillería almohadillada, de ejecución bastante irregular, tanto en el ancho de calles, espesor del dado y paralaje, pero que deja compartimentos delimitados por cuadriláteros alabeados.

## 8. PUESTA EN OBRA

Suponemos que los peldaños llegan a obra en un estado de labra semi-terminado, al menos en lo referente a la huella y tabica. La plataforma de arranque debe estar bien nivelada. Sobre ella se sitúa el primer peldaño que, a diferencia del resto, tiene el intradós vertical al igual que la tabica, consiguiendo así un apoyo muy estable sobre el suelo. Los siguientes peldaños se van apoyando sobre la entrega al muro y también sobre el

husillo en hélice. El muro, de mampostería, se va levantando por hiladas a medida que se van colocando peldaños. Se puede apreciar, bajo el umbral de las puertas y en otros lugares, una pequeña incisión de trazado circular sobre la huella de cada peldaño. Lo más probable es que esta incisión se utilizara como referencia de replanteo a la hora de acomodar las entregas en el muro y para seguir ejecutando éste.

Se conservan restos de un trazado en el suelo de piedra desde el que arrancan las tres escaleras (12). Se trata de dos arcos de círculos concéntricos que corresponden a la planta del husillo en hélice; también aparece un punto que señala el centro de ambas circunferencias y de la circunferencia envolvente de la escalera. La sencillez de esta monte nos encamina a pensar que, más que una base para las plantillas de labra de los peldaños, se trataría de un trazado auxiliar de replanteo para su puesta en obra, sobre el que se harían pasar los plomos con cuerdas y donde los arcos grabados en la piedra del suelo serían la referencia de verticalidad y ajuste del ojo de escalera. Hemos comprobado *in situ*, utilizando reglas y plomada, que esto se verifica.

Los peldaños, piezas enterizas de unos 230 kg, serían izados hasta su altura por el hueco central, con poleas sujetas a vigas o pórticos de madera apoyadas posiblemente sobre los muros preexistentes. La posibilidad de acceso y transporte de bultos por el hueco central ha sido señalada como una de las razones del origen utilitario de este tipo de escaleras de caracol (28). A la hora de colocar cada peldaño en su sitio hay que seguir las cuerdas de los plomos para arrimar el peldaño a su límite interior, que coincide con el cilindro vertical de la hélice. Para ello pudieron servir las trazas circulares cuyos restos se conservan en el pavimento de planta baja. Para asegurar la disposición radial del borde huella-tabica bastaría una cuerda aplomada que marcara el eje vertical sobre el centro del círculo mencionado. Se hace pasar una regla por el canto del peldaño y se gira hasta que su prolongación toque la cuerda del plomo central.

La constancia en la división en 42 partes enteras del círculo, que puede apreciarse en la fotografía de la Figura 1, seguramente requeriría de una comprobación y eventual reajuste de piezas cada pocas unidades colocadas. Muy posiblemente esto se hiciera cada siete peldaños, aprovechando la inmediata división en seis de la circunferencia ( $6 \times 7 = 42$ ) o algún trazado auxiliar para divisiones intermedias (29), si bien no hemos encontrado marcas ni evidencias de este proceder.

Por último, una vez situado el peldaño en su posición exacta, y con ayuda de cuñas o lascas, se procura la horizontalidad de la huella, que puede medirse con un nivel de cuerda y plomo situado sobre una escuadra de mano. Sin embargo, en los peldaños más altos de la escalera I las huellas tienen una acusada inclinación hacia el muro. Tal vez Andrade quiso así conducir a los usuarios a transitar por la parte alejada del hueco. Esto sería aún más plausible si la escalera, como hemos planteado antes, se hubiera pensado para admitir barandilla, pero para ejecutarse sin ella.

## 9. CONCLUSIONES

La espectacular escalera de caracol de Bonaval, admirada desde su construcción hace tres siglos, no responde sólo a la exhibición de pericia de un proyectista experimentado y erudito, sino también a la habilidad de un audaz y eficiente constructor.

Domingo de Andrade contrata la obra en calidad de maestro de obra y contratista, por lo que está obviamente interesado en el abaratamiento de los procesos. El contrato establece que la escalera será de cantería y parece prever un modelo de zancas rectas abovedadas y barandilla barroca, que hubiera supuesto un considerable gasto en estructuras de apeo. Pensamos que la salvedad que aparece en el contrato justificando la posibilidad de un llamado caracol de Mallorca fue insertada por el propio Andrade, que posiblemente barajaba ya la idea, aunque no estaba seguro de su comportamiento o de poder construirla del modo económico en que creemos que lo hizo. La accesibilidad a todas las dependencias previas y la iluminación natural que permite el amplio hueco central son argumentos que justifican el tipo elegido.

La comprobación de nuestra hipótesis constructiva se adecúa a los conocimientos de la época en que se ejecuta la escalera.

Por ello no se han utilizado análisis constructivos y estructurales contemporáneos. En su lugar hemos optado por la realización de un modelo sobre el que experimentar. De este modo se ha conocido de una manera empírica el comportamiento estructural de la escalera según se iba levantando.

De los ensayos sobre la maqueta se ha podido concluir que hasta el peldaño 4 la escalera goza de muy buena estabilidad, soportando cargas de materiales u operarios sin necesidad de afianzar las entregas de los peldaños en el muro circundante. Hasta el número 7 aguantaría sin sobrecarga. A partir del 8 el conjunto empieza a bascular y se desestabilizaría si no se cargasen las entregas en el muro. Pero al ir levantando éste a la par que los peldaños esta situación no llega a darse. El peso del muro impide el vuelco de los peldaños de las hiladas inferiores y permite que se construya el conjunto sin ningún tipo de apeo, lo que abarata de manera importante los costes de ejecución.

## REFERENCIAS

- (1) Taín Guzmán, M. (1998). *Domingo de Andrade, maestro de obras de la Catedral de Santiago (1639-1712)*, tomo II, pp. 533-541. A Coruña: Edicios do Castro.
- (2) Sanjurjo, A. (2012). A tripla escaleira do convento de San Domingos de Bonaval. En *Domingos de Andrade, Excelencia do Barroco* (p. 166). Santiago de Compostela: Fundación Antonio Fraguas y Museo do Pobo Galego.
- (3) Martínez de Aranda, G. (ca. 1600). *Cerramientos y Trazas de Monteá*, Madrid: Biblioteca del Servicio Histórico del Ejército, Ed. Facsimilar, 1986, CEHOPU.
- (4) Calvo López, J. (1999). *Cerramientos y trazas de monteá de Ginés Martínez de Aranda* (Tesis doctoral). Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- (5) Sanjurjo Álvarez, A. (2015). La escalera de caracol en los tratados de cantería españoles de la Edad Moderna y su presencia en el patrimonio construido hispánico: estudio geométrico y constructivo (Tesis doctoral), p. 269. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- (6) Vandelvira, A. (1575-1591). *Libro de Trazas de cortes de Piedras*. Copia de Bartolomé de Sombigo y Salcedo, 1671, Ed. Facsimilar. Madrid: Instituto Juan de Herrera, con estudio preliminar de J. C. Palacios Gonzalo.
- (7) Gelabert, J. (1653). De l'Art de Picapedrer. En Rabasa, E. (Ed). (2011). *El manuscrito de cantería de Joseph Gelabert titulado Vertaderastrages del Art de picapedrer: transcripción, traducción, anotación e ilustración del texto y trazados*. Madrid: C. O. A. de les Illes Balears, Fundación Juanelo Turriano.
- (8) Tosca, T. V. (1707-1715). *Compendio mathematico, en que se contienen todas las materias más principales de las ciencias*, Ed. Facsimilar parcial de los tomos V y IX como *Tratados de Arquitectura civil, monteá y cantería, y relojes*, 1992. Valencia: Librería París-Valencia.
- (9) Portor y Castro, J. (1708). *Cuaderno de arquitectura*, Ms. 9114. Madrid: Biblioteca Nacional de España.
- (10) Sanjurjo Álvarez, A. (2009). Entre el utilitarismo y la escenografía: el caracol de varias subidas en la arquitectura española. En *Actas del Sexto Congreso Nacional de Historia de la Construcción* (p. 1327). Madrid: Instituto Juan de Herrera.
- (11) Blutman, S. (1967). Geometrical Staircases. *The Journal of the Society of Architectural Historians*, 26(1): 34-39.
- (12) Taín Guzmán, M. (2006, 29 de abril). Fifteen unedited engraved architectural drawings uncovered in northwest Spain. En *Proceedings of the Second International Congress on Construction History* (pp. 3011-3023). Cambridge: The Construction History Society.
- (13) Carvajal Alcaide, R. (2011, 26 de octubre). Estructura y singularidad del Cuaderno de arquitectura de Juan de Portor y Castro (1708-1719). En *Actas del Séptimo Congreso Nacional de Historia de la Construcción* (pp. 211-220). Madrid: Instituto Juan de Herrera.
- (14) Taín Guzmán, M. (1998). *Domingo de Andrade, maestro de obras de la Catedral de Santiago (1639-1712)*, tomo I, p. 68. A Coruña: Edicios do Castro.
- (15) Sanjurjo Álvarez, A. (2013). Experimentación geométrica y constructiva en piedra: algunos casos especiales de escaleras de caracol. *Informes de la Construcción*, 65(EXTRA-2): 46, doi: <http://dx.doi.org/10.3989/ic.13.025>.
- (16) Sanjurjo Álvarez, A. (2009). Entre el utilitarismo y la escenografía: el caracol de varias subidas en la arquitectura española. En *Actas del Sexto Congreso Nacional de Historia de la Construcción* (p. 1323). Madrid: Instituto Juan de Herrera.
- (17) Vignola, I. (1583). *Le due regole della prospettiva pratica*. Versión digitalizada en 2010 con fondos de la biblioteca de investigación de The Getty Research Institute, accesible en <https://archive.org/details/dveregoledellaproovign>.
- (18) Palladio, A. (1570). *I quatri Libri d'Architettura*. Trad. Aliprandini, L., Martínez Crespo, A. (1988) *Los cuatro libros de arquitectura*. Madrid: Akal.
- (19) Sanjurjo, A. (2012). A tripla escaleira do convento de San Domingos de Bonaval. En *Domingos de Andrade, Excelencia do Barroco* (p. 175). Santiago de Compostela: Fundación Antonio Fraguas y Museo do Pobo Galego.

- (20) Pérez Constanti, P. (1930). *Diccionario de artistas que florecieron en Galicia durante los siglos XVI y XVII*, p. 18. Santiago: Imp., Librería y Enc. del Seminario C. Central.
- (21) Calvo López, J. (2009). La literatura de la cantería: una visión sintética. *El arte de la piedra. Teoría y práctica de la cantería* (pp. 101-156). Madrid: CEU Ediciones.
- (22) Heyman, J. (1999). *El esqueleto de piedra. Mecánica de la arquitectura de fábrica*, Madrid: Instituto Juan de Herrera.
- (23) Huerta, S. (2004). *Arcos, bóvedas y cúpulas. Geometría y equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica*, Madrid: Instituto Juan de Herrera.
- (24) Rabasa, E. (2013). Estereotomía: teoría y práctica, justificación y alarde. *Informes de la Construcción*, 65(EXTRA-2): 5-20, doi: <http://dx.doi.org/10.3989/ic.13.014>.
- (25) Taín Guzmán, M. (1998). *Domingo de Andrade, maestro de obras de la Catedral de Santiago (1639-1712)*, tomo I, pp. 220-221. A Coruña: Edicios do Castro.
- (26) Calvo López, J. (1999). Cerramientos y trazas de montea de Ginés Martínez de Aranda, p. 223 (Tesis doctoral). Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- (27) Sanjurjo Álvarez, A. (2015). La escalera de caracol en los tratados de cantería españoles de la Edad Moderna y su presencia en el patrimonio construido hispánico: estudio geométrico y constructivo (Tesis doctoral), p. 137. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- (28) Palacios, J. C. (2003). *Trazas y cortes de cantería en el renacimiento español*, 2.<sup>a</sup> edición, Madrid: Ministerio de Cultura.
- (29) Lluís i Ginovart, J. (2016). Geometría y traza de escaleras góticas. Las escuadras como ábacos en la construcción de los caracoles de la catedral de Tortosa. *Informes de la Construcción*, 68(541): e132, doi: <http://dx.doi.org/10.3989/ic.15.035>.

\* \* \*