

La función de los pináculos en la arquitectura gótica

Isabel Tarrío Alonso

Muchos son los arquitectos y los historiadores que embelesados por la belleza de la arquitectura gótica han dedicado algunas líneas a describir las peculiaridades de las tan admiradas bóvedas medievales. Sin embargo, no todos han tratado de entender su funcionamiento estructural. Esta falta de interés es más notable en lo que respecta al comportamiento del sistema de contrarresto de las citadas bóvedas, sobre el que pocos autores se han atrevido a discutir. El caso es aún más dramático cuando nos referimos a uno de los elementos más hermosos y característicos de este tipo de construcciones: los pináculos.

Es objeto de la presente comunicación realizar un recorrido por las diferentes teorías acerca del rol de los pináculos en las construcciones góticas, desde las ideas más sencillas y primitivas hasta los argumentos más elaborados. Este estudio se complementa con el análisis de los pináculos de la Sainte Chapelle de París, para el que se toma como marco teórico de referencia el análisis límite en las estructuras de fábrica formulado por Heyman en la segunda mitad del siglo XX.

FUENTES ORIGINALES DEL GÓTICO

El secretismo reinante en las logias medievales, que impedía a sus miembros la divulgación de conocimientos a personas ajenas al gremio con el fin de evitar el intrusismo y el plagio, nos ha dejado prácticamente huérfanos de fuentes originales sobre las reglas de construcción en la Edad Media. Prueba de ello es el

cuaderno de Villard de Honnecourt (ca. 1235), única fuente original del gótico clásico, cuyo contenido no desvela ninguna de las reglas que los maestros medievales utilizaron para proyectar sus edificios.

El vacío documental es aún mayor si nuestra búsqueda se centra en la construcción de los pináculos. En este caso, los textos y manuales más antiguos que han llegado hasta nuestros días son bastante más recientes, pues datan ya de los siglos XV y XVI. Entre ellos encontramos *Wiener Werkmeisterbuch* de ca. 1450 o *Unterweisungen* de Lorenz Lacher (1516), verdaderos tratados de arquitectura que abarcan todos los aspectos del proyecto de una iglesia gótica tocando de manera tangencial el tema de los pináculos. Pero si lo que buscamos son documentos específicos sobre pináculos, tendremos que acudir a *Das Buchlein von der Fialen Gerechtigkeit* (Cuaderno sobre la traza correcta de los pináculos) de Matthäus Roriczer ([1486] 1845) o a *Fialenbüchlein* (Cuaderno de los pináculos) de Hans Schuttermayer¹. Se estima que ambos escritos fueron contemporáneos y salieron a la luz a finales del siglo XV: el primero de ellos en 1486 y el segundo, cuya fecha exacta no se conoce, poco tiempo después.

Tanto el cuaderno de Roriczer como el de Schuttermayer contienen instrucciones precisas sobre la construcción geométrica de un pináculo, más concretamente sobre cómo trazar su dibujo en planta y cómo a partir de éste se puede obtener el alzado del pináculo. Estas indicaciones se basan en la rotación y en la manipulación de cuadrados y vienen acompañadas de ilustraciones (figuras 1 y 2) que esquematizan cada

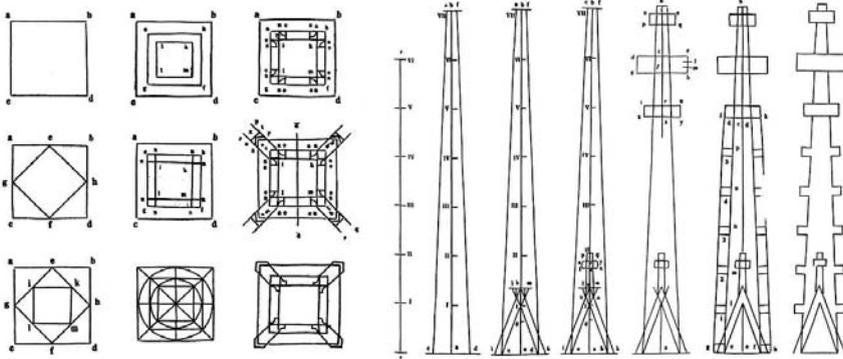


Figura 1
Procedimiento para el trazado de un pináculo según Roriczer (1486)

uno de los trazados descritos por el autor, para así facilitar la labor de comprensión a cualquier aprendiz que estudiara el manual. A este respecto, el cuaderno de Roriczer resulta ser algo más detallado y prolijo que el de Schuttermayer.

Ambos documentos se centran en la geometría de un único pináculo, lo que ha conducido a Frankl (1960) a pensar que el objetivo de los libros no era prescribir las pautas para proyectar un pináculo, pues en realidad los constructores medievales eran libres de ejecutar cualquier forma a su propia voluntad, sino que más bien se trataba de proporcionar a los aprendi-

ces un ejemplo que les sirviera para aprender el secreto de cómo transformar planos y dibujos en objetos reales. Shelby (1977) insiste en esta idea de que estos cuadernos sobre pináculos admiten una doble interpretación: como método para obtener el alzado a partir de un trazado en planta y como herramienta para convertir una geometría y unos diseños en dimensiones y piezas para la construcción de un elemento. En cualquiera de los casos, ninguno de los autores de los cuadernos asume como propio el método descrito, sino que lo consideran un legado heredado de la tradición de los grandes maestros.

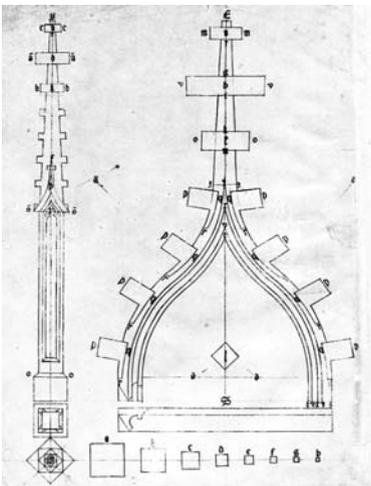


Figura 2
Esquemas para el trazado de un pináculo según Schuttermayer (ca. 1489)

TEORÍAS SOBRE EL PAPEL DE LOS PINÁCULOS EN LA ARQUITECTURA GÓTICA

El pináculo como elemento estructural

Las alusiones a los pináculos son poco frecuentes en la literatura, y más aún si se trata de determinar cuál es su función o su comportamiento estructural. Los primeros comentarios acerca del papel que estos elementos desempeñan dentro del conjunto del edificio se remontan al siglo XVIII.

El arquitecto inglés Sir Christopher Wren no fue precisamente un defensor a ultranza de la arquitectura gótica, pero manifestó gran interés por la estática en las construcciones de este periodo de la historia. Así lo demostró en los informes profesionales que redactó sobre la restauración de la catedral de Salisbury (1668) y de la abadía de Westminster (1713)². En este último documento Wren propone que cuando no po-

demos añadir un estribo FG (ver figura 3) a un pilar que no dispone de un contrarresto capaz de equilibrar los empujes que sobre él actúan, la solución pasa por incrementar la altura de la construcción que apoya directamente sobre el pilar E. Aunque esta teoría, de que la estabilidad de un pilar aumenta cuando se carga verticalmente, se enuncia para un pilar gótico, es perfectamente extrapolable a los estribos, de tal modo que el pilar AD, el arco ABC y el muro E pasarían a ser el estribo, el arbotante y el pináculo respectivamente. Sin embargo, la postura de Wren acerca de los pináculos no es tan clara como pudiera parecer, pues en el mismo informe afirma que los pináculos no eran útiles.

En el tránsito al siglo XIX Anderson (1800) publica una reflexión sobre la utilidad de los pináculos en la arquitectura gótica, en la que reivindica el papel fundamental que estos elementos juegan en la estabilidad de los soportes, al tiempo que reconoce la función decorativa que desempeñan como piezas que aportan elegancia a la estructura. Anderson llega a esta conclusión tras analizar un sencillo ejemplo de contrarresto de un pilar: la estabilidad de este pilar, sometido a una fuerza en su parte superior de diez centenas³, se puede garantizar, bien mediante un muro de diez pies de largo adosado al pilar y de su misma altura, que pesa una centena por cada pie de altura y longitud, o bien disponiendo de un muro de un pie de largo que mida nueve

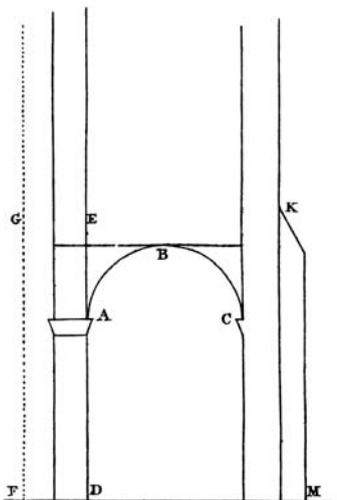


Figura 3
Esquema de contrarresto de un pilar gótico (Wren 1750)

pies más de altura que el pilar (ver figura 4). Esta segunda opción haría referencia a un pináculo si el peso se colocara en la cabeza del estribo, o a un muro, como el muro E descrito por Wren, cuando el peso se dispusiera sobre la vertical del pilar. En cualquiera de los dos casos, Anderson advierte del importante ahorro de material que supone esta medida.

La idea de Anderson de que la adición de un peso en la parte superior de un estribo contribuye a mejorar su estabilidad es correcta desde el punto de vista de la mecánica (no obstante, más adelante se matizará esta afirmación). Sin embargo, se podría poner en duda el hecho de que para garantizar la estabilidad de un pilar sometido a un empuje de diez centenas sea necesario un peso vertical de al menos la misma magnitud, puesto que la estabilidad en las estructuras de fábrica depende en gran medida de la geometría de las mismas y no exclusivamente de las cargas a las que estén sometidas.

Las dos teorías descritas hasta el momento muestran similitudes evidentes, lo que conduce a pensar que, pese a que el texto de Anderson no contiene ninguna referencia a Wren, sus ideas beben directamente de las del arquitecto inglés. Durante el siglo XIX, varios autores continuaron defendiendo la idea de que el peso de los pináculos contribuye a la estabilidad de los estribos y que, por tanto, no son meros adornos. Así, Frankl (1960) cita los ejemplos de Costenoble, Wetter o Pugin (1843). Este último aseguraba que los pináculos, además de desempeñar una función estructural, la de incrementar la «resistencia»⁴, cumplían también una función mística, como símbolo de la resurrección, y tenían además una razón de ser constructiva, como elementos diseñados para evacuar las aguas pluviales.

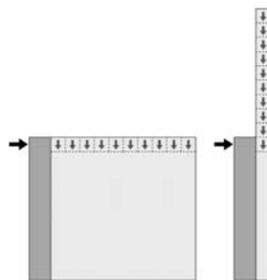


Figura 4
Interpretación de las dos alternativas propuestas por Anderson para el contrarresto de un pilar sometido a una fuerza de diez centenas (dibujo de la autora)

La siguiente aportación, en línea con los autores mencionados en el párrafo anterior, viene de la mano de Viollet-le-Duc, para quien los pináculos son elementos funcionales propios de una construcción inteligente en la que el carácter estructural-constructivo de cada una de sus partes se compatibiliza a la perfección con el rol decorativo que también desempeñan⁵.

Viollet-le-Duc (1854-68) adopta como propias las teorías publicadas hasta el momento. Así, de entre todas las funciones de los pináculos, destaca el papel vital que juegan en la estabilidad del edificio. Para ello, aduce que el peso de estas piezas, que actúa en vertical sobre la cabeza de los estribos, contribuye a neutralizar los empujes de las bóvedas, lo que trae como consecuencia un incremento de la estabilidad del sistema de contrarresto (figura 5), o visto de otra manera, que la sección horizontal del estribo se pueda reducir, como ya había planteado Anderson. Asimismo, asegura que los pináculos colocados sobre las esquinas de las torres contribuyen a reforzar las aristas de estos cuerpos sobresalientes en altura.

Viollet-le-Duc suma a este rol estructural de los pináculos, otros de índole también funcional, tales como la capacidad de impedir el vuelco de gárgolas y cornisas, la de evitar el deslizamiento de las albardillas y de las hiladas superiores en los estribos, la de dificultar la rotura de los arbotantes, la de reforzar las balaustradas o la de evacuar las aguas pluviales mediante canalones que los atraviesan. Si bien algunas de estas funciones ya fueron mencionadas por sus antecesores, hemos que destacar que es el primero en relacionar los pináculos con un posible deslizamiento de una parte de la estructura. A este respecto, asegura que los arbotantes ejercen un empuje en la cabeza de los estribos, el cual puede provocar que se deslicen las últimas hiladas del contrarresto, construidas en *tas de charge*, si éste no está suficientemente cargado con un peso vertical como el que pueden aportar los pináculos. Viollet-le-Duc fue también pionero en afirmar que la posición de los pináculos puede impedir la rotura de los arbotantes, si se construyen, en voladizo, sobre el punto en el que se produciría la citada rotura en el arbotante, y si su centro de gravedad (CDG) cae sobre el espesor del estribo (figura 6).

Al margen de todas estas cuestiones técnicas, Viollet-le-Duc no se olvida de subrayar cuán importante es la contribución estética de los pináculos al aspecto formal de una construcción medieval, lo que le permite reafirmarse sobre su principio del racionalismo en

la arquitectura de la Edad Media (Tarrío 2009).

En las postrimerías del siglo XIX, Choisy recoge el legado de la doctrina de Viollet-le-Duc, convirtiéndose, sin duda alguna, en el más fiel de sus discípulos. Su obra (Choisy 1899) recoge, ordena y sintetiza las ideas de su maestro, pero en lo que respecta a los pináculos las alusiones son muy escasas. Esto puede ser debido a que, si bien creía que tenían una función estructural, la de aportar cierta estabilidad necesaria al estribo, consideraba que la función primordial de los pináculos era decorativa (Viollet-le-Duc parece atribuir mayor importancia al rol estructural que al decorativo), tal como se demuestra en el capítulo *Gables, Pinnacles, Balustrades* de su obra.

Además de Choisy, durante los últimos años del siglo XIX y las primeras décadas del XX, varios autores continuaron defendiendo las ventajas estructurales que proporcionaba la adición de un pináculo en la parte

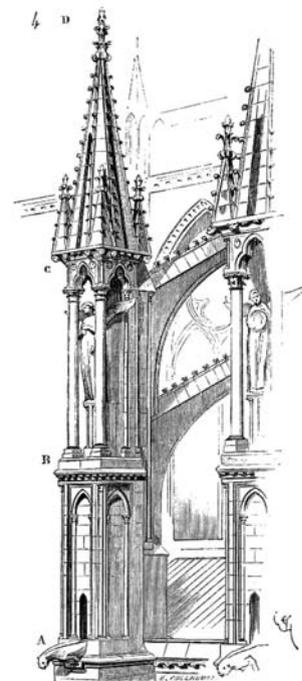


Figura 5
Pináculo de la catedral de Reims que Viollet-le Duc utiliza para explicar en qué medida el peso de cada uno de los tres tramos en que se divide este elemento contribuye a contrarrestar el empuje de los dos arbotantes (Viollet-le-Duc 1854-1868)

superior del contrarresto. De entre ellos, destacamos a Moore ([1890] 1906), Sturgis (1902), Enlart (1902-1916), Baudot⁶ (1916) y Lasteyrie (1926).

El pináculo como elemento decorativo

El pensamiento de Viollet-le-Duc recibe su crítica más despiadada en la década de 1930, período durante el cual sale a la luz la tesis doctoral de Abraham (1934). En esta disertación se rebaten todos los argumentos sobre la construcción medieval defendidos por Viollet-le-Duc, desde el funcionamiento de arcos y elementos abovedados, hasta el comportamiento del sistema de contrarresto, pasando por sus ideas más filosóficas sobre la racionalidad en la arquitectura de la Edad Media. Los razonamientos de Abraham son a menudo tendenciosos, lo que nos lleva a pensar que la motivación de su tesis no está tanto en el desacuerdo con las teorías de Viollet-le-Duc sino en el intento de difamar al popular arquitecto.

Es por ello que quizá resulte sorprendente leer, en palabras de Abraham, que la teoría de Viollet-le-Duc sobre los pináculos no es criticable en sí misma. Esta aserción podría sugerir una tregua a su *enemigo intelectual*. Sin embargo, y nada más lejos de la realidad, las críticas a Viollet-le-Duc también se suceden en lo que respecta a los pináculos. Así, en su opinión, las ideas de Viollet-le-Duc se aplicaron sin discernimiento alguno a todo edificio provisto de pináculos, incluso en aquellos casos en los que estas coronaciones databan, no de la época de la construcción del contrarresto, sino de un período muy posterior a éste, durante el cual dicho elemento fue añadido. Por este motivo, Abraham rechaza la idea de que el pináculo haya de tener siempre un papel importante en la estabilidad del edificio, puesto que, según él, un elemento que no siempre existió no puede adquirir súbitamente una relevancia vital en el comportamiento del edificio. Igualmente, basándose en el mismo argumento, se resiste a aceptar, por norma, la idea defendida por Viollet-le-Duc, de que los pináculos tienen un «rol activo» y que su empleo en la construcción constituye lo que denominó un «método preventivo».

Abraham clasifica los pináculos en dos grupos: los útiles (que funcionarían según las teorías de Viollet-le-Duc) y los que no lo son (a su parecer, los más habituales en la arquitectura medieval). Este segundo grupo es donde centra su discurso crítico, puesto que

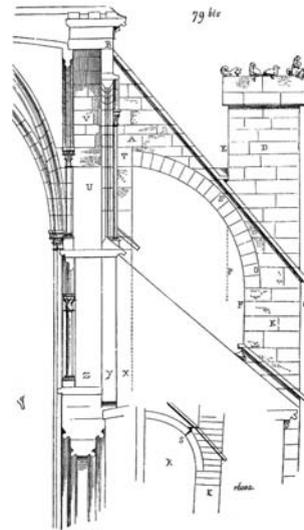


Figura 6
Pináculo de la iglesia de Notre-Dame de Dijon, en voladizo sobre el arbotante (Viollet-le-Duc 1854-1868)

entiende que cuando un pináculo no es útil, no aportará al conjunto los beneficios estructurales descritos por Viollet-le-Duc.

Según Abraham, la utilidad de un pináculo depende de su posición y peso en relación al resto del estribo. Así, por lo que respecta a la posición, si el peso del pináculo se sitúa sobre el eje que pasa por el CDG del estribo, la estabilidad del edificio aumenta, pero si éste se aproxima a la cara exterior, se puede producir el efecto contrario. En lo tocante al peso del pináculo, Abraham opina que su influencia en los masivos y pesados estribos medievales suele ser bastante irrelevante, pues la mayor parte de las veces no llega a ser si quiera la centésima parte del peso total del contrarresto, en el que incluye, no solo su propio peso, sino también el de la parte proporcional de bóvedas, muros y demás elementos cuyo peso se transmite a los contrafuertes.

La crítica de Abraham no es la primera ni la última que recibe esta corriente ideológica que ensalza las cualidades estructurales de los pináculos. En los albores del siglo XX, Hamlin (1916, 1917) ya había puesto en duda la capacidad de los pináculos para contrarrestar el empuje de los arbotantes, debido a que consideraba que su peso no era suficiente para desempeñar tal labor. Hamlin también avanzó la idea de Abraham de que si los pi-

náculos tienen una función estructural, su posición más eficaz será cuando su peso actúe sobre la mitad interior del estribo y lo hizo en respuesta a Moore ([1890] 1906), quien aseguraba que estos elementos de coronación resultaban más eficaces en términos estructurales cuanto más hacia fuera se hubieran construido.

Después de Abraham, Frankl (1960) retoma la crítica a Viollet-le-Duc advirtiendo del contrasentido que supondrían las ideas sobre el papel estructural de los pináculos, fundamentalmente las relativas a que el peso del pináculo contribuye a la estabilidad del estribo, ya que plantean la paradoja de que cuanto más cargado está el pilar, más delgado se puede construir. Frankl se muestra, además, bastante escéptico respecto a la idea de que los pináculos aportan la estabilidad necesaria para soportar el empuje de los arbotantes, pues entiende que, de ser así, tanto los arbotantes como las bóvedas colapsarían si se suprimieran los pináculos.

ANÁLISIS DE LAS TEORÍAS SOBRE LOS PINÁCULOS

Una vez planteadas las diversas teorías sobre el rol de los pináculos en la arquitectura gótica, pasaremos a analizar su grado de veracidad en el marco de la teoría del análisis límite de estructuras de fábrica (Heyman 1995, Heyman 1999). Este estudio se apoyará en los resultados arrojados del análisis de la estabilidad de la Sainte Chapelle de Paris, cuya disposición, en una única nave sin arbotantes al exterior, ofrece un magnífico ejemplo de sistema de contrarresto de las bóvedas, en el que la función estructural de los pináculos puede ser relativamente fácil de identificar. La figura 7 muestra las cinco situaciones del estribo que se van a analizar: con y sin el pináculo actual, con el pináculo desplazado hacia el interior y hacia el exterior y con un pináculo mucho más pesado que el actual. Las funciones ornamentales y constructivas de los pináculos, descritas en apartados anteriores, son incuestionables, por lo que el estudio que pretendemos abordar a continuación se centrará únicamente en los aspectos relativos al papel estructural de estos elementos.

La condición de estabilidad de una fábrica construida con un material que cumpla tres postulados del análisis límite (resistencia infinita a compresión, resistencia a tracción nula, imposibilidad de deslizamiento) exige que la trayectoria de las fuerzas —línea de empujes—, esté contenida dentro de la estructura. La fi-

gura 8a muestra el trazado de una línea de empujes en la sección transversal de la Sainte Chapelle. Los valores de los empujes de las bóvedas se han tomado de González (2007): los de la planta superior ($H_s = 217$ kN y $V_s = 351$ kN) se determinaron mediante el método de los cortes (Heyman 1999), mientras que los de la planta baja ($H_i = 105$ kN y $V_i = 336$ kN) se estimaron utilizando las tablas de Ungewitter, publicadas por Heyman (1999). Adicionalmente, se ha supuesto que la resultante de fuerzas en el pilar de planta baja pasa por el centro de su base y que el arbotante transmite únicamente un empuje horizontal de valor $H_a = 65$ kN (González 2007).

Es importante señalar que, debido a que las estructuras de fábrica son altamente hiperestáticas, estos valores representan únicamente una de las infinitas soluciones de equilibrio posibles. La ventaja de este planteamiento radica en que conocidos los valores de los empujes de las bóvedas, el análisis del sistema de contrarresto es un problema estáticamente determinado, lo cual permite estudiar de una manera aislada y sin contaminación de otros parámetros, los efectos de los pináculos en los elementos de contrarresto.

Una estructura de fábrica es estable si su forma es adecuada, y su seguridad viene determinada por su geometría. En las condiciones anteriormente descritas, el coeficiente geométrico de seguridad⁷ (CGS) en la base del estribo de la Sainte Chapelle es de 3,04, prácticamente igual al que obtenemos cuando suprimimos el pináculo (figuras 7b y 8b), cuyo valor resulta ser 3,03 (ver tabla 1). Si desplazamos el pináculo hacia el interior (figuras 7c y 8c), de modo que la línea de acción de su peso coincida con la vertical del CDG del estribo, el coeficiente de seguridad aumenta levemente hasta 3,14, lo cual denota un ligero incremento de la estabilidad del contrarresto. En cambio, si el desplazamiento se produce hacia el exterior (figuras 7d y 8d), el CGS se reduce a 2,96 y la estabilidad disminuye aunque no de manera alarmante.

Con este sencillo ejemplo queda demostrado que Abraham estaba en lo cierto cuando afirmaba que un pináculo situado sobre el CDG del contrarresto aumenta la estabilidad del edificio, mientras que si el pináculo se construye próximo al borde exterior la estabilidad decrece. Asimismo ratificamos la postura de Hamlin y, por ende refutamos la de Moore, sobre cuál es la posición más eficaz de los pináculos desde un punto de vista estructural. No obstante, se puede poner en duda que estas extremadamente pequeñas variacio-

nes en la estabilidad del estribo puedan llegar a ser determinantes en la estabilidad global del edificio y que realmente la adición de un pináculo a un estribo pueda tener un efecto significativamente negativo en el comportamiento estructural del mismo. De igual modo, se puede cuestionar la probabilidad de que el peso del pináculo actúe realmente por fuera del CDG del estribo. A este respecto, Abraham asegura que, por razones estéticas, es frecuente encontrar pináculos próximos al borde del estribo; y si bien esto es cierto, también lo es el hecho de que los estribos suelen tener un perfil escalonado en el exterior (como en la Sainte Chapelle o, mucho más exageradamente, en la catedral de Chartres) y, en ocasiones, perforadas en el interior las partes más bajas, lo cual desplaza su CDG hacia el exterior haciendo más improbable que el peso del pináculo actúe por fuera de éste.

Incrementar el peso del pináculo de la Sainte Chapelle (figuras 7e y 8e) conlleva efectos positivos en la estabilidad del edificio (ver tabla 1), tal como venían defendiendo los partidarios de ensalzar el rol estructural de los pináculos. Sin embargo, al igual que en los casos anteriores estos efectos son poco relevantes en términos de estabilidad global, lo que apoya la tesis de Abraham y la de los que como él veían en este elemento una pieza ornamental de la arquitectura medieval, puesto que pasar de no tener pináculo a tenerlo conlleva un intrascendente aumento del 0,33% de la

estabilidad global. Tendríamos que aumentar el peso del pináculo hasta diez veces su valor actual para alcanzar un incremento en la citada estabilidad de casi el 3%, lo que daría un resultado similar al obtenido cuando situamos el pináculo sobre la vertical del CDG del estribo (ver tabla 1). Esta circunstancia revela que, dentro de sus limitadas posibilidades, la opción de desplazar el pináculo es más efectiva y, por supuesto, mucho más económica que la de añadir más peso en la cabeza del contrarresto. Tal como se muestra en la tabla 1, el CGS máximo que podríamos alcanzar aumentando el peso del pináculo en su posición actual es 3,42 que sería el correspondiente a un pináculo de peso infinito que provocaría que la resultante de empujes en la base del pilar coincidiera en la vertical del peso de este elemento de coronación del contrarresto.

Abraham nunca hizo una lectura conjunta de los factores que, según decía, determinan la utilidad de los pináculos, lo que le hubiera inducido a preguntarse cómo un peso que hemos considerado de magnitud despreciable puede llegar a disminuir o aumentar la estabilidad del edificio. La respuesta a esta pregunta, que Abraham nunca se hizo, la encontramos en que el mayor beneficio estructural que aporta el pináculo está relacionado, no tanto con su contribución a la estabilidad global del conjunto que, aunque existe, hemos visto que es muy pequeña, sino con la estabilidad local

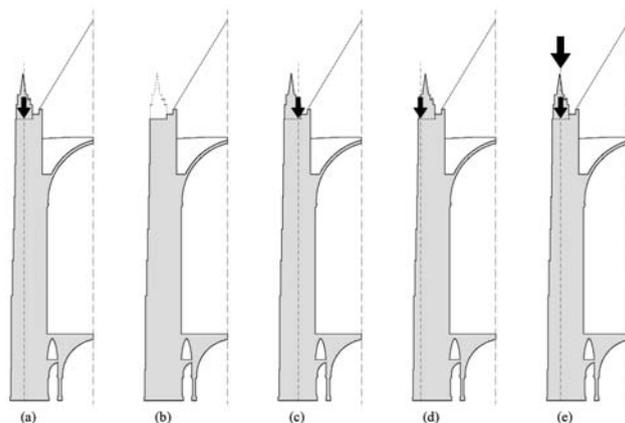


Figura 7

Casos de estudio del contrarresto de la Sainte Chapelle: pináculo actual (a), estribo sin pináculo (b), pináculo actual desplazado 0,88 metros hacia el interior hasta hacerlo coincidir con el CDG del estribo (c), pináculo actual desplazado 0,88 metros hacia el exterior (d), pináculo en su ubicación actual y con un peso equivalente al de cincuenta veces el peso del pináculo actual (e) (dibujo de la autora)

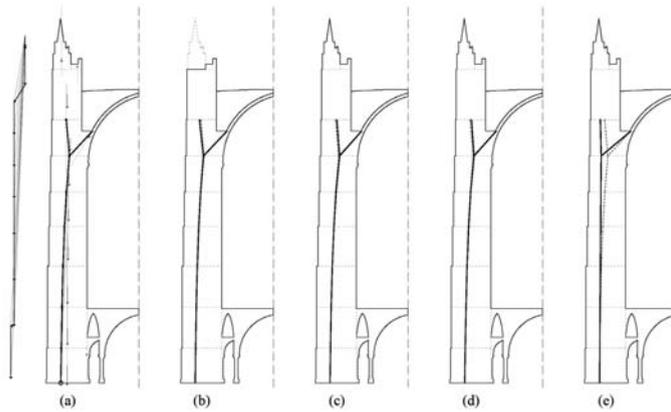


Figura 8

Polígono de fuerzas y líneas de empujes en el estribo de la Sainte Chapelle para los cinco casos descritos en la figura 7 (se han representado utilizando el mismo orden). Sobre las figuras de los casos (b-e) se ha marcado, en línea gris discontinua, el trazado de la línea de empujes del pináculo actual (dibujo de la autora)

en la cabeza del estribo, como ya había apuntado Viollet-le-Duc, y posteriormente Enlart, al advertir del problema de deslizamiento en las inmediaciones del pináculo.

Una de las tres hipótesis básicas en torno a las cuales se articula la teoría moderna de estructuras de fábrica sostiene que la imposibilidad de fallo por deslizamiento es habitual en todas las partes de la estructura. Sin embargo, el propio Heyman (1999), autor de dicha teoría, matiza que en ocasiones, y utiliza para ello el ejemplo del pináculo, es necesario un «cierto nivel mínimo de tensión global de compresión con el fin de lograr el suficiente rozamiento que impida el deslizamiento». Así, cuando añadimos un pináculo a una estructura aumentamos la inclinación del empuje y, con ello, la fuerza de rozamiento que evita el deslizamiento de la parte superior del estribo, es decir, que el pináculo estaría funcionando como un elemento de pretensión a compresión. En la Sainte Chapelle, la adición del pináculo implica un notable incremento de más del 12% de la fuerza de rozamiento a la altura del arranque de la bóveda. Este porcentaje se dispara hasta más de 124% si en lugar del pináculo actual colocamos otro cuyo peso sea diez veces superior. La fuerza de rozamiento depende únicamente del peso y del ángulo de rozamiento, de lo que se deduce que la posición del pináculo (hacia el interior o hacia el exterior) no comprometerá la estabilidad local de la cabeza del estribo. Teóricamente, su ubicación sí

que podría afectar a la estabilidad global del conjunto, pero, como ya hemos demostrado, su efecto es tan despreciable como el provocado por el peso en sí del pináculo.

La contradicción que Frankl observa en la teoría de que añadir peso a un estribo permite reducir la sección del mismo merece cierta atención. Su razonamiento sería correcto en caso de que las tensiones en la fábrica estuvieran próximas a la tensión de rotura a compresión. Sin embargo, la realidad es que el fallo de una estructura de fábrica por resistencia del material es altamente improbable debido a que las tensiones de trabajo en este tipo de construcciones son muy bajas (Heyman 1999). No en vano, una de las tres hipótesis de la teoría de estructuras de fábrica asume que la fábrica tiene resistencia a compresión infinita.

El error de Frankl, y que también cometieron otros autores como Pugin o Baudot, es no discernir entre los conceptos de resistencia y estabilidad. Más aún en construcciones de fábrica en las que el requisito fundamental que rige el comportamiento de la estructura es el de estabilidad y en las que la resistencia juega tan solo un papel secundario, justo al contrario de lo que sucede en las estructuras modernas de edificación. Un aumento de la carga transmitida al soporte, como consecuencia de la presencia de un pináculo no tendrá, pues, una repercusión notable en el comportamiento del edificio en términos de resistencia. Por

Pináculo	CGS	Δ CGS (%)	Normal en arranque bóveda (kN)	Δ Froz (%)	σ en base estribo (N/mm ²)	$\Delta\sigma / \sigma_{rotura}$ (%)
Sin pináculo	3,03	-	1755,94	-	0,55	-
Actual (P)	3,04	0,33	1974,62	12,45	0,57	0,05
Exterior	2,96	-2,31	1974,62	12,45	0,57	0,05
Interior	3,14	3,63	1974,62	12,45	0,57	0,05
2P	3,05	0,66	2193,30	24,91	0,58	0,09
5P	3,08	1,65	2849,34	62,27	0,64	0,23
10P	3,12	2,97	3942,74	124,54	0,73	0,45
50P	3,26	7,59	12689,94	622,69	1,45	2,25
∞ P	3,42	12,87	-	-	-	-

Tabla 1
Resultados de los análisis de estabilidad del estribo de la Sainte Chapelle (tabla de la autora)

contra, este incremento de carga sí puede comportar algún efecto beneficioso para la estabilidad, lo que evidencia lo errado del razonamiento de Frankl. En la Sainte Chapelle, añadir el pináculo al edificio incrementa 0,02 N/mm² la tensión en la base del estribo, lo cual no constituye ni siquiera el 0,05% de la tensión de rotura a compresión de una arenisca media que ronda los 40 N/mm². Si en lugar del pináculo actual colocamos otro cuyo peso sea diez veces superior, este porcentaje se amplían hasta el también irrisorio valor de 0,45%.

Viollet-le-Duc, en cambio, sí parecía tener clara la diferencia entre estos dos conceptos y lo demostró con su argumento de que un incremento de carga en la cabeza de un soporte permite aumentar su estabilidad y al mismo tiempo reducir su sección.

El último comentario de este análisis de las teorías sobre el papel de los pináculos versará sobre el potencial de estos elementos como partes de la construcción que pueden prevenir la rotura de los arbotantes. Los rellenos en los senos de las bóvedas permiten que los empujes se puedan transmitir por fuera de la sección de la plementería de la propia bóveda. Si esta idea se traslada a los pináculos alzados sobre los arbotantes, tendremos que, efectivamente, los pináculos así dispuestos funcionan como una vía de escape para los empujes que se transmiten por los arbotantes, lo cual minimiza las posibilidades de formación de articulaciones en estos últimos elementos y, por ende, reducen la probabilidad de rotura de los mismos.

CONCLUSIONES

A la luz de todo lo expuesto, y tal como se ha venido defendiendo en el curso de la historia, podemos afirmar que los pináculos desempeñan, además de los indiscutibles roles ornamentales y constructivos, un claro papel estructural en la arquitectura de la Edad Media.

Sin embargo, conviene aclarar que la función estructural de estos elementos de coronación de los estribos no es tan vital para el conjunto de la estructura como aseguraban autores de la talla de Viollet-le-Duc y como pueden serlo otras partes de las construcciones medievales (arbotantes, bóvedas, soportes, etc.). Ello es debido a que este rol estructural no está relacionado con la estabilidad global del conjunto, pues conforme a las demostraciones realizadas en la presente comunicación ni el peso ni la posición de los pináculos son capaces de alterar significativamente los resultados que, a nivel global, afectan a la estabilidad del estribo.

Hecha esta observación, podemos concluir que el papel de los pináculos está ligado a la estabilidad local de la parte superior del sistema de contrarresto y, más concretamente, a la zona en la que los estribos reciben el empuje de las bóvedas o de los arbotantes. Los pináculos son, por tanto, elementos que, al margen de todas las cualidades estéticas o decorativas que puedan tener, fueron concebidos para solventar problemas estructurales de índole secundaria, entre los que destaca el del deslizamiento de las últimas hiladas de la ca-

beza del estribo. Es por este motivo, que los daños que se podrían derivar de un hipotético fallo de esta pieza tan característica de la arquitectura gótica, serían daños de carácter local o puntual de mayor o menor trascendencia que, a priori, no causarían la ruina completa del edificio.

NOTAS

1. Para la presente comunicación se ha utilizado la versión original en alemán de estos dos documentos y su traducción al inglés por Shelby (1977). Esta traducción incluye un análisis crítico de las citadas publicaciones de Roriczer y Schuttermayer y de sus diferentes ediciones a lo largo de la historia. El contenido de estos documentos también ha sido estudiado por (Frankl 1960).
2. El texto íntegro de estos informes se puede consultar en la biografía sobre la familia Wren compilada por el hijo de Sir Christopher Wren, (Wren 1750), o en las memorias sobre Wren de (Elmes 1823).
3. «Ten hundred weight» (Anderson 1800).
4. Pugin utilizó los términos «strength» y «resistance» para referirse a aquello que los pináculos incrementaban. Estos términos nos son correctos, pues a lo que realmente se está refiriendo Pugin es a la estabilidad y no a la fuerza o la resistencia. Cuando Frankl parafrasea a Pugin corrige este error y utiliza la palabra estabilidad.
5. Las ideas principales de Viollet-le-Duc sobre los pináculos se encuentran en su entrada *Pinacle* del *Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XI^e au XVI^e siècle* (Viollet-le-Duc 1854-68). Las entradas *Contrefort*, *Arc-boutant*, *Clocher*, *Construction-Développement*, *Chapelle*, *Architecture*, *Tas-de-charge* y *Chéneau* contienen también referencias al comportamiento estructural o constructivo de los pináculos, y las entradas *Flèche*, *Ange* y *Animaux* inciden sobre el carácter ornamental de estos elementos.
6. Al igual que Pugin, Baudot confunde el concepto de resistencia con el de estabilidad y asegura que los pináculos aumentan la resistencia de los contrafuertes.
7. El coeficiente geométrico de seguridad define la posición relativa de la resultante con respecto al borde de la sección.

LISTA DE REFERENCIAS

Abraham, P. 1934. *Viollet-le-Duc et le rationalisme médiéval*. Paris: Vincént, Fréal et Cie.

Anderson, J. 1800. *Recreations in Agriculture, Natural-history, Arts, and miscellaneous literature*. Vol. 2. London: Bensley.

Baudot, A. 1916. *L'Architecture, le Passé, le Present*. Paris: Henri Laurens.

Choisy, A. 1899. *Histoire de l'architecture*. Vol. 2. Paris: Gauthier - Villars.

Elmes, J. 1823. *Memoirs of the life and works of Sir Christopher Wren, with a brief view of the progress of architecture in England, from the beginning of the reign of Charles the First to the end of the seventeenth century; and an appendix of authentic documents*. London: Priestley and Weale.

Enlart, C. 1902-1916. *Manuel d'archéologie française*. Vol.1. Paris: Alphonse Picard et Fils.

Frankl, P. 1960. *The Gothic: literary sources and interpretations through eight centuries*. Princeton: Princeton University Press.

González Collado, P. 2007. *Análisis estructural de la Sainte Chapelle du Palais de Paris*. Inédito

Hamlin, A. 1916-1917. «Gothic architecture and its critics». *Architectural Record*, 39: 338-354, 419-435; 40: 97-113; 41: 3-19.

Heyman, J. 1995. *Teoría, historia y restauración de estructuras de fábrica. Colección de ensayos*. S. Huerta (ed.). Madrid: Instituto Juan de Herrera

Heyman, J. 1999. *El esqueleto de piedra. Mecánica de la arquitectura de fábrica*. Madrid: Instituto Juan de Herrera, CEHOPU.

Lasteyrie du Saillant, R. 1926. *L'Architecture religieuse en France à l'époque gothique*. Vol. 1. Paris: Auguste Picard.

Moore, C. [1890] 1906. *Development & character of gothic architecture*. New York: MacMillan.

Pugin, A. 1841. *The true principles of pointed or Christian architecture*. Edinburg: John Grant.

Roriczer, M. [1486] 1845. *Das Büchlein von der Fialen Gerechtigkeit*. Crier: Druck und Verlag

Schuttermayer, H. (ca. 1489). *Fialenbüchlein*. Nuremberg: Georg Stuchs.

Shelby, L. 1977. *Gothic design techniques: The fifteenth-century design booklets of Mathes Roriczer and Hanns Schmuttermayer*. London and Amsterdam: Southern Illinois University Press.

Sturgis, R. 1901-1902. *A Dictionary of Architecture and Building*. Vol. 3. London: MacMillan.

Tarrío Alonso, I. 2009. «Pol Abraham y la crítica al racionalismo de Viollet-le-Duc». *Actas del sexto congreso nacional de historia de la construcción*, 2:1393-1406. Madrid: Instituto Juan de Herrera.

Viollet-le-Duc, E. 1854-1868. *Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XI au XVI siècle*. Paris: A.Morel.

Wren, C. 1750. *Parentalia: or, memoirs of the family of the Wrens*. London: Stephen Wren.