



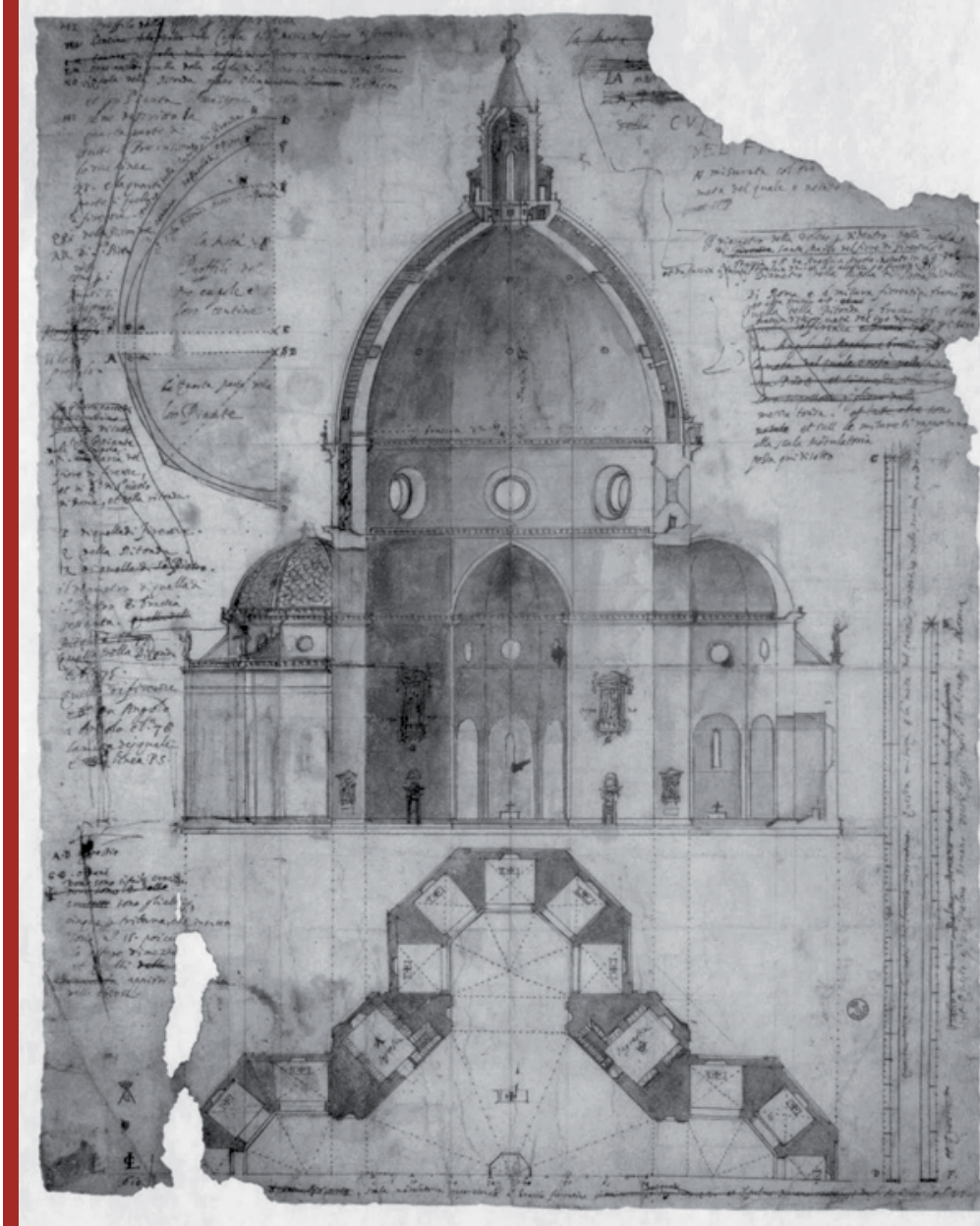
Cúpula ^{de} la Catedral Florenция

Gustavo Álvarez Rico

La cúpula octogonal de santa María del Fiore es una obra arquitectónica única. La construcción del conjunto marcó la transición del gótico al Renacimiento, e hizo avanzar la ingeniería y la técnica consiguiendo una nueva imagen acorde con los nuevos ideales.

En 1294, las autoridades religiosas y civiles de Florencia deciden ampliar la pequeña iglesia de Santa Reparata y dedicarla a Santa María. Más de 100 años después, los ciudadanos florentinos pudieron ver los muros de la catedral de Santa María del Fiore elevarse en el centro de su ciudad, a falta de una cúpula que rematase el conjunto. Cubrir o abovedar el espacio abierto de la estructura suponía un reto tecnológico, y hacia 1418, los administradores de la obra de la catedral, llamada Opera del Duomo, estaban en un callejón sin salida. Los arquitectos que se habían sucedido en el diseño de la catedral a lo largo de los años (principalmente Arnolfo di Cambio, Francesco Talentini y Giovanni di Lapo Ghini) habían construido los ocho muros del crucero donde se instalaría el altar mayor. Los muros estaban destinados a soportar una majestuosa cúpula. Pero abovedar un octógono, y particularmente uno enorme (45.6 m.) no tenía precedente.

Los tradicionales métodos de construcción y las máquinas de la época no podían salvar la dificultad presentada por la estructura. Una de esas técnicas heredadas consistía en llenar el espacio interior del octógono con un entramado de madera (cimbra), para soportar las bóvedas de piedra de la cúpula mientras fraguaba el mortero. Pero la madera era cara e insuficiente en la Toscana, además se necesitaban vigas de madera de gran tamaño, difíciles de encontrar, por lo que había diferencias de opinión respecto al método de construcción. Por consiguiente la Opera del Duomo y el gremio de tejedores anunciaron un concurso de arquitectos, para conseguir la construcción de la cúpula, según era costumbre en los gremios de la república de Florencia.

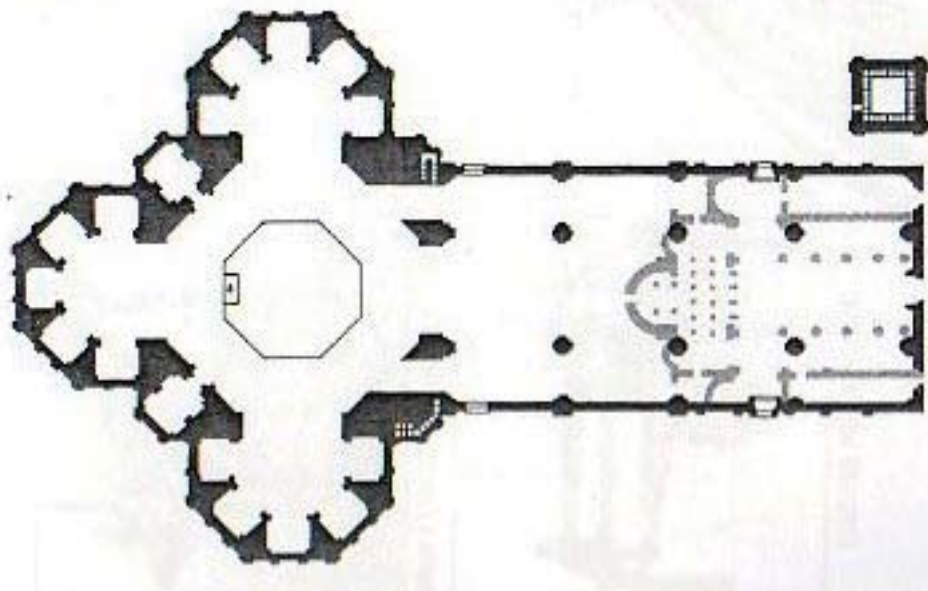


Antiguo dibujo de la cúpula de Santa María de la Fiore

En 1420 fueron elegidos dos maestros arquitectos. Filippo di Ser Brunelleschi (1377-1446), escultor y orfebre florentino, que había descrito aunque aún no presentado, un modelo para construir la cúpula por un método novedoso y revolucionario. Su principal contrincante, Lorenzo Ghiberti (1378-1455), también escultor y orfebre, era popular entre los representantes de la comunidad y de los gremios porque había ganado el concurso para ejecutar, en 1420, las puertas de bronce del baptisterio frente a la catedral. Brunelleschi había sido el perdedor en dicho concurso.

Brunelleschi propuso la construc-

ción de una cúpula de doble bóveda, con un cascarón interior y otro exterior, algo que no se había realizado hasta entonces. Dicha cúpula debía construirse sin las costosas cimbras. Esta innovación permitía hacer cada nivel de construcción lo suficientemente fuerte para soportarse por sí mismo mientras los trabajadores levantaban el siguiente nivel. Para acometer esta nueva técnica, de una forma rápida y segura, Brunelleschi inventó varias máquinas: una cabria reversible y grúas con brazos para situar la carga. Brunelleschi, considerado fundador de la arquitectura del Renacimiento, buscó en los edificios de la antigua Roma los elementos de



Planta de Santa María del Fiore, donde se muestra el crucero octogonal que rodea el altar mayor y la cimentación de la iglesia de Santa Reparata, que está sepultada debajo

los órdenes clásicos, alterando sin embargo el diseño de sus obras posteriores. Aplicó también los principios matemáticos conocidos en la época para obtener un sistema de proporciones arquitectónicas que estuviese a la escala de las proporciones humanas. Los logros técnicos de Brunelleschi, incluidos en sus innovadoras máquinas y el diseño de los nuevos edificios, permitieron avanzar los métodos arquitectónicos del Renacimiento. Brunelleschi superó las limitaciones tecnológicas que causaban serios problemas a algunos de sus contemporáneos. El historiador renacentista Vasari nos lo describe fascinado por “el tiempo, el movimiento, los pesos y las ruedas, como las ruedas pueden ser giradas y desplazadas, de manera que construyó algunos buenos y bellos relojes”. También pintó cuadros para ilustrar la perspectiva, introduciendo el concepto de fuga en su famosa pintura del baptisterio. Con ello, revolucionó alguno de los principios de la pintura renacentista, introduciendo la ilusión de tridimensionalidad para los objetos representados sobre una superficie plana. En el uso de las proporciones y de la geometría, fue influido por el matemático y

astrónomo florentino Paolo del Pozzo Toscanelli.

Además de sus conocimientos de matemáticas y mecánica, Brunelleschi pasó cierto tiempo en Roma midiendo y estudiando las ruinas junto a Donatello. Estas construcciones le proporcionaron claves materiales de las técnicas romanas para la construcción de grandes bóvedas. Según Vasari, Brunelleschi había examinado las cimentaciones de cada edificio en Roma antes de 1428, anotando los procedimientos para la construcción de aparejos de ladrillos, junto con los métodos de corte y transporte de sillares, que podía distinguir por sus muescas y marcas de cantero. Algunas de las características de la cúpula de Santa María del Fiore son el resultado de esos descubrimientos. En particular, sus estudios le ayudaron a resolver el problema de estabilidad de la cúpula de la catedral.

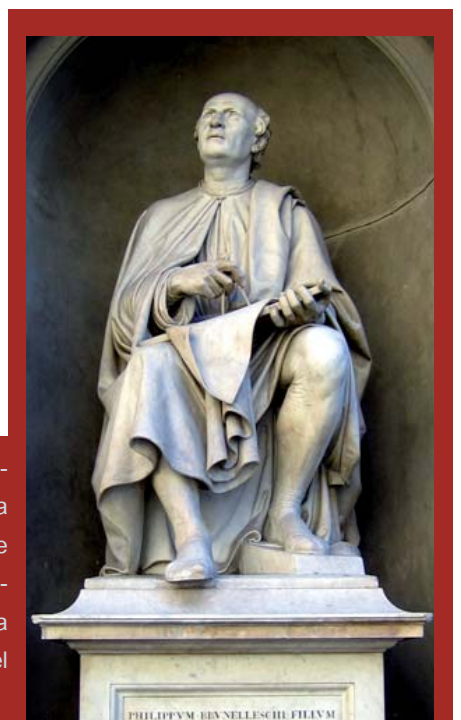
En el momento del concurso para

Una estatua enorme de Brunelleschi se encuentra fuera del Palazzo dei Canonici en la Piazza del Duomo, mirando pensativamente hacia su mayor logro, la cúpula que domina el panorama de Florencia. Es todavía la cúpula más grande de mampostería en el mundo.

el proyecto de la cúpula, en 1418, la idea de Brunelleschi, era controvertida porque el método de construcción que propuso no tenía precedentes. Las cúpulas que se habían hecho hasta entonces eran pequeñas, semiesféricas, tales como las de las catedrales de Pisa y Siena o el Panteón de Roma. El Panteón era una bóveda de simple cascarón semiesférico con una abertura en la coronación u óculo, que constituía la única fuente de luz natural para el interior. Esta cúpula y las bóvedas romanas en ruinas pudieron haberle servido de guía para encontrar una solución.

Finalmente, los florentinos le autorizaron empezar su trabajo, pero los documentos de la Opera del Duomo sobre las reuniones para analizar el procedimiento muestran que sus miembros permanecían cautos al respecto.

Brunelleschi deseaba ser el único arquitecto del proyecto, puesto que solo el conocía la técnica a emplear, y ansiaba vengarse de la humillación sufrida en el concurso de las puertas del baptisterio. Ideó una estratagema para apartar a Ghiberti de la construcción de la cúpula, el arquitecto fingió una





Vista de la cúpula desde el centro del crucero, se puede apreciar las ventanas en el tambor y el óculo en el centro de la cúpula. Los frescos, son una representación de El Juicio Final, y fueron acabados en 1579

enfermedad, dejando a Ghiberti solo en la dirección de los obreros. Entonces Ghiberti no supo como proceder, con lo que el trabajo sufrió un parada hasta que Brunelleschi volvió a la obra, tras lo cual su autoridad salio reforzada y Ghiberti abandonó el proyecto.

Por ironía de las cosas, los dibujos más detallados de las máquinas de Brunelleschi para la construcción llegaron de la mano del nieto de Ghiberti, Buonaccorso Ghiberti. Usando estas fuentes gráficas, combinadas con los archivos ya publicados de la Opera del Duomo se consigue esclarecer como Brunelleschi utilizó esos ingenios para construir la doble bóveda y también cómo colocaron, más tarde,

el orbe y la cruz en lo alto de la linterna.

Abovedar sin construir una cimbra fue tal vez el logro más notable de Brunelleschi. Los arcos góticos del crucero octogonal de santa María del Fiore (considerados antagónicos a los arcos de medio punto romanos) no estaban contruidos hasta la altura en la que debía comenzar a construirse la cúpula. Además, en los de la cabecera habían utilizado soportes de madera. Para la cúpula, sin embargo, Brunelleschi determinó que los ladrillos debían colocarse en ángulo unos con respecto a otros, según una antigua técnica romana denominada “espina de pez”,

creando una estructura adecuada que pudiese absorber el peso de la cúpula a medida que se iba elevando. El peso se transmitía a los pilares y muros del octógono.

Pero esto aún no era suficiente para que la cúpula se mantuviese en pie, entonces inventó un sistema de cadenas de sillares para juntar las bóvedas. Estos sillares, unidos a los nervios de ambas bóvedas, se reforzaban con grapas de metal en forma de cruz. Los sillares unen cada estrato de las bóvedas horizontal y verticalmente, reforzando la construcción. Sin ellos, los nervios reventarían, hundiendo la cúpula, este sistema se emplea cinco veces a lo largo de



la cúpula, en intervalos regulares. Los ocho nervios apuntados que se pueden ver desde el exterior son sólo una parte de los utilizados en la sustentación de la cúpula, ya que entre cada nervio principal se encuentran dos nervios ocultos. Brunelleschi incorporó en su modelo otros artificios prácticos. Se construyeron canalones en el exterior y aberturas en las bóvedas externas para disipar la fuerza del viento que, además, disminuyen el riesgo de tensiones estructurales en los movimientos de tierra. Colocó anillos de hierro para que prestaran soporte a los andamios para que los artistas pudieran pintar frescos o colocar mosaicos e incluso instaló una cocina en lo alto de las bóvedas y andamios para que los operarios no perdiesen tiempo en descender al nivel de la calle para comer. Proyectó el cascarón exterior de la cúpula para proteger el interior, con una estructura reforzada contra el asalto del viento y la lluvia. El espacio entre ambas cúpulas sirvió para colocar pasos y escaleras que permitían a los operarios construir ambas bóvedas y repararlas. En la coronación de la cúpula, en el lugar donde convergen los ner-

vios verticales de la bóveda exterior e interior, diseñó un cierre de piedra circular, denominado serallo; éste rodea los muros del óculo, que mide 6 metros de diámetro y entre 3.7 y 4.6 metros de ancho. El óculo sirve de clave para los ocho arcos de la cúpula, en cada lado tiene tres ventanas que franquean el paso de la luz y el aire al serallo. Las ventanas sirvieron también para otro propósito, una prueba más del genio con que Brunelleschi concibió su diseño y su función. Pueden colocarse largas vigas de madera entre las ventanas a través del óculo. Cuando se han puesto suficientes, forman un piso provisional que permite colocar las grúas durante la construcción de la linterna y la instalación del orbe y la cruz. Todos los materiales necesarios para la linterna se izaron a través de una abertura en la plataforma.

La linterna era el elemento crítico de la obra para la cúpula de doble cascarón proyectada en 1418, así que se anunció un concurso para su diseño cuando la cúpula estuvo terminada. En 1436 ganó el modelo de Brunelleschi en el cual los ocho contrafuertes de la linterna

trabajan para transmitir el peso a los nervios de la cúpula y luego, en descenso vertical, a los ocho grandes pilares del octógono.

Su modelo sirvió como guía para los artesanos durante la realización de la obra, pero fue realizado intencionalmente incompleto, para asegurar su control sobre la construcción, este modelo de madera y ladrillo se conserva aún.

La habilidad política de Brunelleschi fue reforzada gracias a su ingenio arquitectónico, una de las ocho columnas de la linterna está hueca y contiene una escalera de gran pendiente que permite el acceso al pináculo cónico, la estructura que da soporte al orbe y la cruz. En el momento de presentar su modelo a las autoridades, dejó la escalera cuidadosamente escondida, mostrándola sólo cuando los jueces preguntaron cómo podrían acceder los trabajadores a lo alto para construir el pináculo, puesto que las catedrales en Italia están a menudo coronadas con un orbe y una cruz, símbolos de poder de los cardenales y de San Pedro de Roma, ello le valió el reconocimiento y el favor de quienes decidieron su construcción.

Para realizar cada una de las innovaciones de Santa María del Fiore, Brunelleschi ideó máquinas capaces de elevar enormes pesos a grandes alturas, de tal modo que fuesen accesibles a los operarios que debían colocarlos en su lugar. Abarcaban esos ingenios una cabria, grúas con brazos para situar la carga y amarradores especialmente diseñados, que evidencian su conocimiento de la mecánica y su visionario sentido de la construcción, las máquinas también eran seguras y permitían completar el trabajo con relativa rapidez. A causa del espíritu de competitividad artística que reinaba en Florencia, Brunelleschi se mostraba

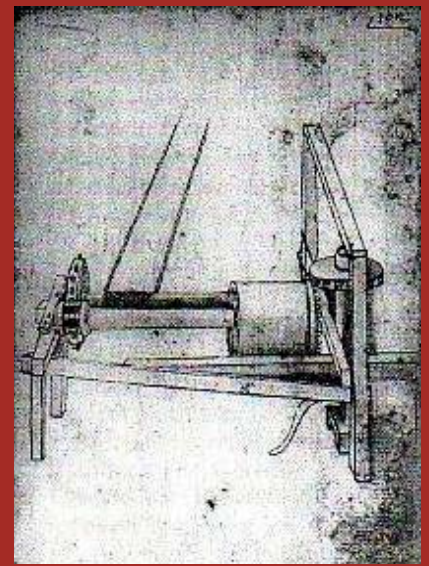
muy reservado sobre su modelo para la cúpula y también acerca de sus máquinas. Temía que sus ideas pudiesen ser copiadas y por ello nunca las reflejó en un papel (las patentes eran aún desconocidas en Florencia y acababan de entrar en uso en Venecia). En consecuencia, llegó tan lejos su desconfianza como para encargar cada pieza de una máquina a un artesano distinto, todos tenían en común una característica, vivían fuera de Florencia, porque Brunelleschi estaba implicado en las cambiantes alianzas y rivalidades de la ciudad, y elegir a uno u otro artesano podría generar enemistades y retrasos en sus proyectos. Brunelleschi sólo daba a cada artesano un simple boceto de una parte; luego, él mismo unía todas las partes para formar la máquina completa.

Las máquinas de Brunelleschi fueron partes fundamentales de su técnica para construir la cúpula. La cabria demostraba claramente la maestría de Brunelleschi en mecánica y su habilidad inventora, algunas piezas de la cabria eran diferentes de lo fabricado hasta entonces y la grúa con el brazo para situar la carga era completamente novedosa.

La cabria estaba fijada en el suelo, en el centro del crucero. Allí permaneció hasta que fueron elevados primero la cúpula, luego la linterna, y finalmente, el orbe y la cruz. La cabria levantó durante 50 años materiales de construcción (sillares, bloques de mármol, mortero y largas vigas de castaño).

La máquina era relativamente sencilla de manejar. Un extremo de la soga estaba unido a un tambor, cuando el material estaba listo para ser elevado, se aseguraba al otro extremo de la cuerda por medio de unos amarradores de sillares (un ingenio romano, semejante a unos estribos, que se introduce en la piedra y fue redescubierto por Brunelleschi). Caballos o bueyes enganchados a una barra pivotante hacían funcionar a la máquina. Cuando las ruedas de la cabria hacían girar el tambor, enrollando la cuerda, la carga se elevaba desde el suelo hasta el lugar necesario de la bóveda. Cuando llegaba arriba, el operario avisaba a los encargados de la cabria que hiciesen detener la máquina.

Brunelleschi ideó ingeniosamente el modo de hacer reversible la cabria por medio de dos ruedas superpuestas; una servía para subir

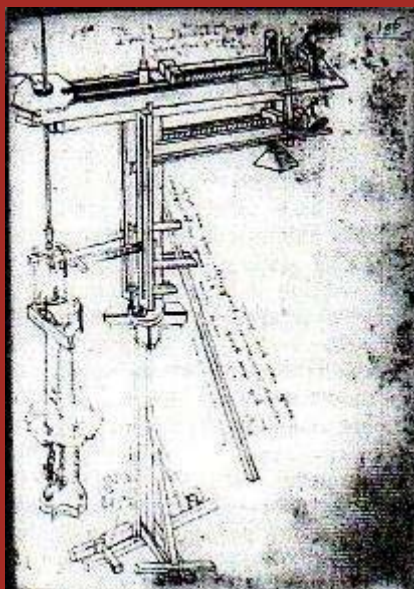


Cabria reversible

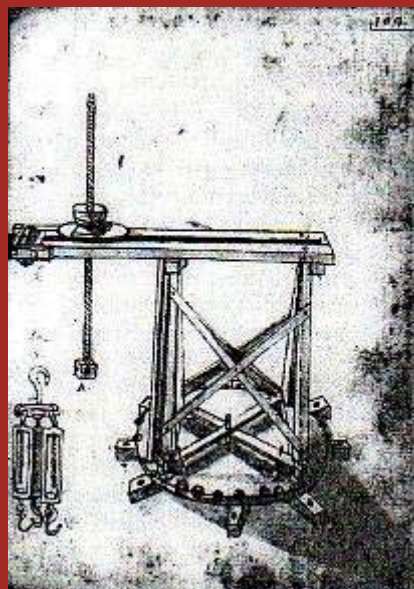
la soga y la otra para bajarla. El engranaje de madera colocado en el centro de la cabria podía ajustarse de tal modo que sólo una rueda podía engranar a un tiempo. Este sistema de engrane reversible permite que el animal de tiro pueda caminar en una sola dirección para mover la máquina, sin necesidad de desatar al animal, cambiarle de sentido y volverle a atar (la cuerda pesaba 500 kg. y fue confeccionada por constructores de barcos de Pisa).

Brunelleschi concibió también nuevos componentes mecánicos para la cabria llamados palei (rodillos de madera giratorios ajustados en hierros de sección en U)

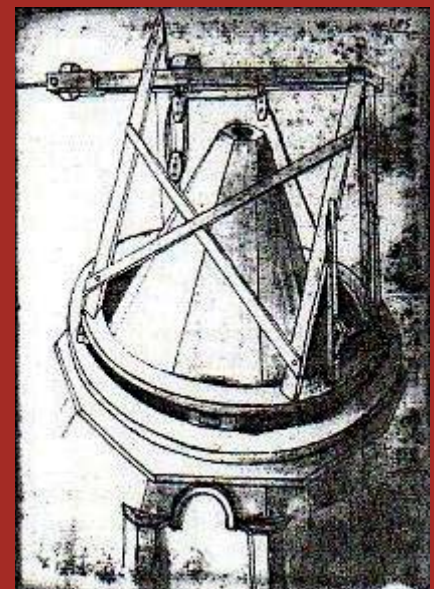
Castello o grúa



Grúa para construir la linterna



Grúa para construir el pináculo



que obraban como dientes de engranaje de baja fricción. Había 91 palei en la rueda principal. Estos rodillos sirvieron para reducir las pérdidas de energía por fricción en la rueda conductora.

Para sus máquinas, Brunelleschi adaptó unos sistemas de amarres de piedras, o grapas de cuña, que ajustaban dentro de unos huecos de los sillares cuando se transportaban por el aire. Estas grapas de cuña, entonces conocidas como holivelas, ajustaban a presión en los sillares evitando su caída. Unos torniquetes con unos enganches asían estas holivelas y las elevaban para asegurar su transporte. Las holivelas estaban formadas por tres piezas de hierro en forma de cuña, que encajaban en una ranura hecha en el sillar de forma similar a los sistemas de caja y espiga, evitando de esta manera que pudiesen soltarse

Una vez que la carga se izaba por la cabria reversible, una grúa especial llamada castello, también ideada por Brunelleschi, la colocaba en el lugar de trabajo. Esta grúa giraba, y su brazo transportaba los materiales donde fuese necesario realizar la obra. El situador de carga deslizaba el material horizontalmente, mientras que un husillo situado en el extremo, descendía la carga, acercándola a la posición deseada. La grúa con su brazo situador de carga estaba coordinada con la cabria reversible.

Otra grúa fue proyectada para construir la linterna. Este aparato descansaba sobre una corona de rodillos, permitiéndola pivotar libremente. La grúa para la linterna incluía el brazo situador de carga diseñado por Brunelleschi. El conjunto del aparato estaba instalado a través del óculo, y sus vigas se insertaron en las ventanas del serallo.

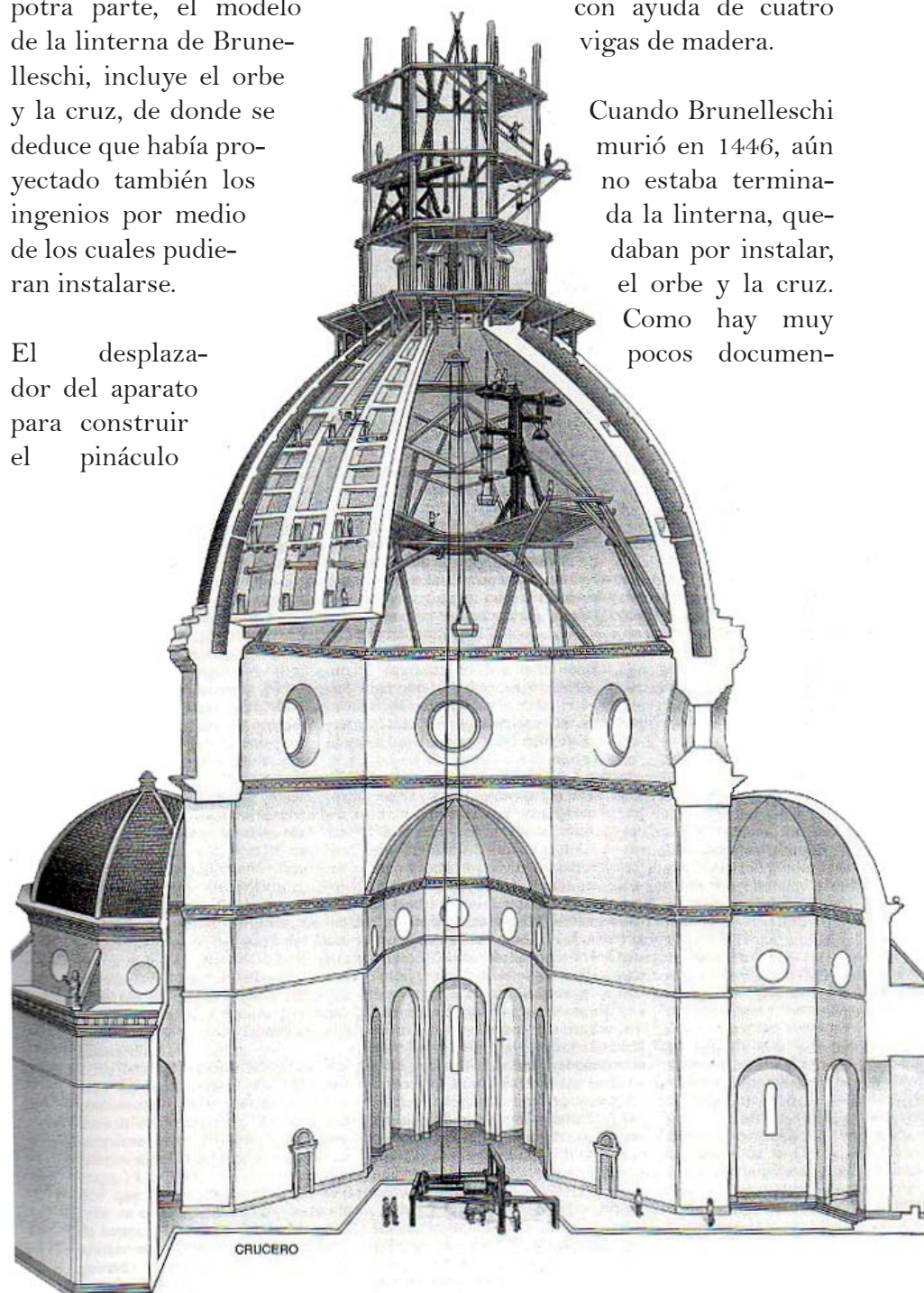
Las notas de Leonardo da Vinci, quien copio todos los dibujos de Buonaccorso sobre las ideas de Brunelleschi, arrojan alguna luz sobre la manera de trabajar de la grúa para construir la interna. Leonardo lo describe como: "cuatro husillos de madera que levantan el andamio; una vez levantado, puede construirse una fuerte plataforma bajo el".

Se diseñó otra grúa más para construir el pináculo cónico. Su proyecto puede ser atribuido a Brunelleschi, porque la linterna responde a su estilo. Por otra parte, el modelo de la linterna de Brunelleschi, incluye el orbe y la cruz, de donde se deduce que había proyectado también los ingenios por medio de los cuales pudieran instalarse.

El desplazador del aparato para construir el pináculo

consistía en un puente-grúa del que cuelga un sistema de sogas y poleas. El dibujo de Buonaccorso muestra únicamente los componentes básicos de la grúa para el pináculo, sin representar el fuerte andamio necesario para asegurarlo en su lugar, y sin ninguna indicación de cómo giraba la plataforma circular. Su dibujo, sin embargo, ofrece el aparato completo erigido en el saliente de la cornisa de mármol de la linterna. También señala la abertura en el vértice del pináculo, dentro de la que se fijarían el orbe y la cruz con ayuda de cuatro vigas de madera.

Cuando Brunelleschi murió en 1446, aún no estaba terminada la linterna, quedaban por instalar, el orbe y la cruz. Como hay muy pocos documen-



tos e ilustraciones para deducir las técnicas de Brunelleschi, son necesarias para reconstruir el método original, las noticias de la Opera del Duomo acerca del penoso trabajo para instalar la linterna, el orbe y la cruz, y reinstalarlos después de un desastre natural. Estas descripciones complementan los dibujos de Buonaccorso y Leonardo.

En 1468 el escultor florentino Andrea del Verrocchio (1435-1488) fue comisionado para realizar la armadura de cobre del orbe (de la cruz se ocuparon otros artífices, que la instalaron sobre el orbe en una posterior etapa). La Opera del Duomo especificó que Verrocchio debía hacer el orbe en ocho secciones con un cuello de bronce. El extremo del cuello debía ajustar en el orificio del pináculo, siguiendo el modelo de Brunelleschi para la linterna. En ese mismo año, después de que las ocho secciones se soldaran fuera de la linterna, en la terraza de casi tres metros de anchura, se colocaba en su lugar el orbe de más de dos metros de diámetro por medio de una cabria de forma piramidal, esta forma recuerda la de la grúa para construir el pináculo.

Aunque no hay más detalles, el aparato descrito en los dibujos de Buonaccorso de la grúa para el pináculo debió haber servido para desplazar las piezas del orbe lateralmente, una vez elevadas a la altura correcta.

En 1602, Gherardo Mechini diseñó un andamio similar y reconstruyó el pináculo de mármol, después de que éste, orbe y cruz fueran derribados por un rayo. Estas piezas se desparramaron por el suelo, pero las secciones del orbe quedaron intactas y volvieron a utilizarse, los rayos fueron una causa corriente de desperfectos para Santa María del Fiore. Los



hubo en 1492, 1494, 1495, 1408, 1511, 1536, 1542, 1561, 1570, 1577, 1578, 1586, pero el del 1600 fue tan devastador que la Opera del Duomo fue persuadida por medio de un decreto papal para consagrar unas reliquias en el interior de la cruz como protección ante futuras tormentas.

Las memorias escritas por Mechini describen la altura del andamio y en que punto iba a ser reconstruido el pináculo para instalar el orbe: “el piso alto del andamio llega a nivel del orbe; por consiguiente, para colocar el orbe en su lugar, será necesario construir otro piso de aproximadamente 7.3 metros de alto”. Con toda probabilidad, el andamio ideado por Brunelleschi para instalar la linterna y el orbe tenía la misma altura.

Los dibujos de Mechini prueban también la función de los óculos de

Brunelleschi y la linterna. Puesto que las tres cuartas partes del pináculo de la linterna fueron demolidas por el rayo de 1600, Mechini construyó el primer piso del andamio para poder estar a la altura de los contrafuertes de la linterna. Construyó un piso a través del óculo, colocando vigas entre las ventanas en el serallo. Realizó un simple trípode con una grúa en uno de los pisos superiores; una abertura en este permitía el paso de pequeños bloques de mármol para el pináculo y varias largas vigas de castaño que asegurarían la colocación del orbe en su lugar, al ser elevado desde el pavimento hasta la terraza. El andamio de Mechini no se diferenciaba apenas del de Brunelleschi.

Después de que, en 1602, los artesanos hubiesen forjado las ocho secciones del orbe, cada pieza fue



subida por separado y transportada, a través de las estrechas ventanas de la linterna, hacia la terraza, donde fueron soldadas en forma de esfera. Los trabajadores controlaron el fuego usado en la soldadura para que no ardiese el andamiaje. Años después de la muerte de Brunelleschi, su linterna continuaba produciendo sorpresas. En 1511, los administradores de la opera del duomo autorizaban la perforación de una abertura de unos 25 milímetros enmarcada por un anillo de bronce. El orificio debía dejar que los rayos solares incidieran en un gnomon (reloj de sol), colocado en el piso del crucero. Los rayos de sol generaban una sombra cuya longitud o posición indicaba los solsticios de verano e invierno. Este artificio astronómico de la linterna y el gnomon fue redescubierto en 1744 por el padre Leonardo Jiménez, jesuita astrónomo. Deseaba observar los solsticios de verano e invierno y recalibró el gnomon. Hasta hace poco, los historiadores pensaban que el orificio astronómico era de su creación.

Pero en 1979, el archivero de la Opera del Duomo, publicó el documento de un pago realizado, en 1475, por un anillo de bronce “para ser colocado en la linterna con objeto de ver donde caen los rayos del sol en determinados días del año”. El inventor de este artificio para el gnomon fue el matemático y astrónomo florentino Toscanelli, que había iniciado a Brunelleschi a estudiar geometría.

Los conocimientos matemáticos y mecánicos de Brunelleschi le convirtieron en un precursor del moderno diseño estructural. Aunque sus inmediatos sucesores que construyeron cúpulas no usaron sus maquinas y volvieron a los ingenios tradicionales de cabestrantes y poleas, algunos elementos de sus maquinas se anticiparon a los de la revolución industrial.

Desde el exterior, la cúpula define por sí sola una nueva imagen de la ciudad, tanto desde la visión próxima, en cuanto presencia omnipresente desde la perspectiva de

las calles, como volumen que se incorpora al panorama geográfico general y se identifica simbólicamente como montaña sagrada. Todo el entorno queda, desde entonces, poseído por su fuerza grácil y su presencia irremplazable, según palabras del también arquitecto Leon Battista Alberti: “desde fuera, desde lejos, parece cobijar a toda la ciudad de Florencia y sus gentes”

Bibliografía

- Historia de la técnica**
Selección de Nicolás García Tapia
Prensa Científica, D.L.
- Historia del arte**
E.H. Gombrich
ed. Phaidon
- Breve historia de la arquitectura**
Ramón Rodríguez Llera
ed. Ibsa
- Brunelleschi: Studies of his technology and inventions**
Frank D. Prager and Gustina Scaglia
MIT Press, 1970
- Filippo Brunelleschi: the cupola of Santa Maria del Fiore**
Howard Saalman
A. Zwemmer, 1980
- The city of Brunelleschi**
Electa 1991