

# Geometrías complejas en cubiertas de obra de fábrica del siglo XVIII: construcción y comportamiento estructural

V. Compán  
F. Escrig  
M. Cámara

Es precisamente el comienzo de la decadencia del Renacimiento a finales del s. XVI, debido principalmente a los conflictos religiosos y sociales, lo que marcará la ruptura de los conceptos establecidos hasta ese momento en las distintas artes, tanto a nivel pictórico, escultórico como arquitectónico y renacerán nuevas ideas promovidas principalmente por los poderes reales absolutistas así como por el poder eclesiástico.

Uno de los precursores de este nuevo movimiento fue el Concilio de Trento (1545–1565). En su afán de renovación de la moral de la institución y de acercamiento al pueblo, puso en crisis los conceptos hasta ese momento planteados sobre el diseño de edificios de culto. Ello obligó a buscar nuevos esquemas compositivos que dieran respuesta a las nuevas exigencias. Así, elementos tradicionales como la cúpula ya no entran en juego. En ese momento no encontraban una respuesta arquitectónica satisfactoria por parte de los arquitectos contemporáneos, pero con la llegada de Vignola, que aplica axialidad a la esfera, se comenzará a dar respuesta al problema.

Desde un punto de vista espacial, una propuesta tan ingeniosa permitirá realizar composiciones espaciales mucho más complejas y dinámicas, pero complejizando el trazado geométrico enormemente. ¿Qué geometría espacial se adapta mejor a una esfera deformada según uno de sus ejes?

Una de las soluciones más interesantes y comienzo de esta nueva forma de proyectar, será la Iglesia de San Carlos de las Cuatro Fuentes, de Borromini, la

cual marcará los primeros intentos sobre composiciones espaciales más dinámicas, buscando espacios escénicos que sorprendieran al espectador.

## LOS INICIOS E NUEVAS FORMAS GEOMÉTRICAS

La obra de Guarino Guarini, aunque tachada por algunos autores como la continuación de la extravagante obra de Borromini, ha permitido sentar las bases para el desarrollo de grandes estilos arquitectónicos. (Meek 1988)

La persecución continua de la originalidad le va a llevar a concebir grandes obras con una base geométrica claramente innovadora. Su obra se centra principalmente en el diseño de edificios eclesiásticos, que podemos clasificar en dos grandes grupos, de planta central y de planta longitudinal.

La búsqueda de los principios de agrupación y yuxtaposición de las denominadas «celdas espaciales», le permitirá profundizar en el estudio de soluciones espaciales bastante más complejas de las que nos tenía acostumbrados el Renacimiento. Las soluciones de edificios eclesiásticos en cruz griega o cruz latina resueltas mediante bóvedas de cañón y cúpulas esféricas son fácilmente trazables, ya que, entre otros factores, sus intersecciones son planas y por lo tanto su construcción se solventa con relativa facilidad.

Guarino Guarini profundiza en el estudio de secuencias espaciales y con ello la definición geométrica toma especial relevancia. La base de muchas de

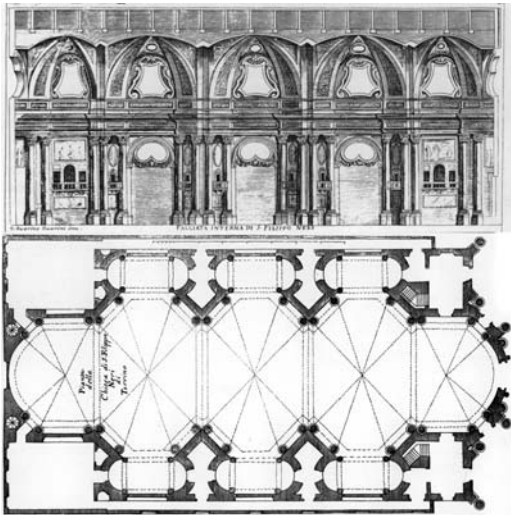


Figura 1  
Planta de San Filippo Neri, Turín (1679)

estas ideas se organizan a partir de un octógono en planta, elemento que no solamente permite agrupar otros espacios en cuatro de sus caras, sino que además las otras cuatro, en chaflán, permiten una transición entre un espacio y el siguiente, como sucede en San Filippo Neri, Turín (1679) (figura 1).

La utilización de recursos planos para la definición de la cubierta es su mejor defensa para adaptar superficies de doble curvatura a un contorno recto.

En el caso de Ste Anne Royale (1663), planta de cruz latina, con cúpula central apoyada en pechinas, yuxtapuesta con cuatro naves laterales «celdas espaciales independientes» de planta octogonal, la dificultad radica en la definición de la propia cubierta (de doble curvatura) generada mediante arcos planos desfasados, rematados por un hexágono en la clave con una función clara, absorber la irregularidad de la traza por problemas de incompatibilidad geométrica. La solución se adapta mejor mediante cilindros y arcos planos que la generación de una verdadera cubierta de doble curvatura continua, pero con una gran virtud, la transición entre los distintos espacios se realiza mediante un arco plano, evitando en lo posible intersecciones fuera del dicho plano (figura 2).

La secuencia espacial continúa complejizándose donde las celdas espaciales ya no son tan indepen-

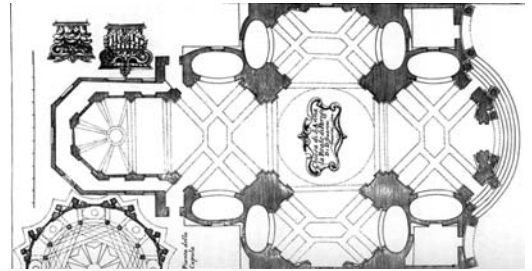


Figura 2  
Planta de Ste. Anne Royale

dientes. La secuencia espacial de una celda con la siguiente se suaviza, el arco plano entre ambas se diluye y las unidades espaciales se entrelazan, y comienzan ideas como la «compenetración sincopada» y la yuxtaposición pulsante, que veremos posteriormente.

Uno de los primeros y más claro ejemplo es la Capilla de la Santa Inmaculada Concepción (Sta. Inmaculata Concezione) que, sobre una composición sencilla en planta, presenta una complejidad geométrica hasta ahora no abordada, como es la intersección de cuádras.

La planta se organiza según dos ejes, uno longitudinal compuesto por dos espacios cilíndricos tangentes rematados mediante sendas cúpulas esféricas, y otro trasversal de menor dimensión y geometría irregular rematado lateralmente por dos pequeñas capillas.

La lectura espacial no está totalmente depurada, ya que las intenciones de la planta no se ven reflejadas en la cubierta (figura 3).

La solución final del plano de cubierta no corresponde ni con la composición de tres celdas espaciales compenetradas, inicialmente proyectada, ni con una solución de integración global de todo el espacio contenedor, debido principalmente a la solución de cubierta adoptada para el eje trasversal. Entra en contradicción la disposición rítmica de los nervios, buscando una lectura de tres espacios, con la solución continua de la superficie y la pérdida del eje trasversal, buscando la unicidad del conjunto.

Los estudios geométricos espaciales realizados comprueban la necesidad de realizar una superficie de acuerdo entre los dos casquetes esféricos laterales, esto confirma la falta de rigor de la solución espacial, frente a una composición en planta mucho más precisa y estudiada.

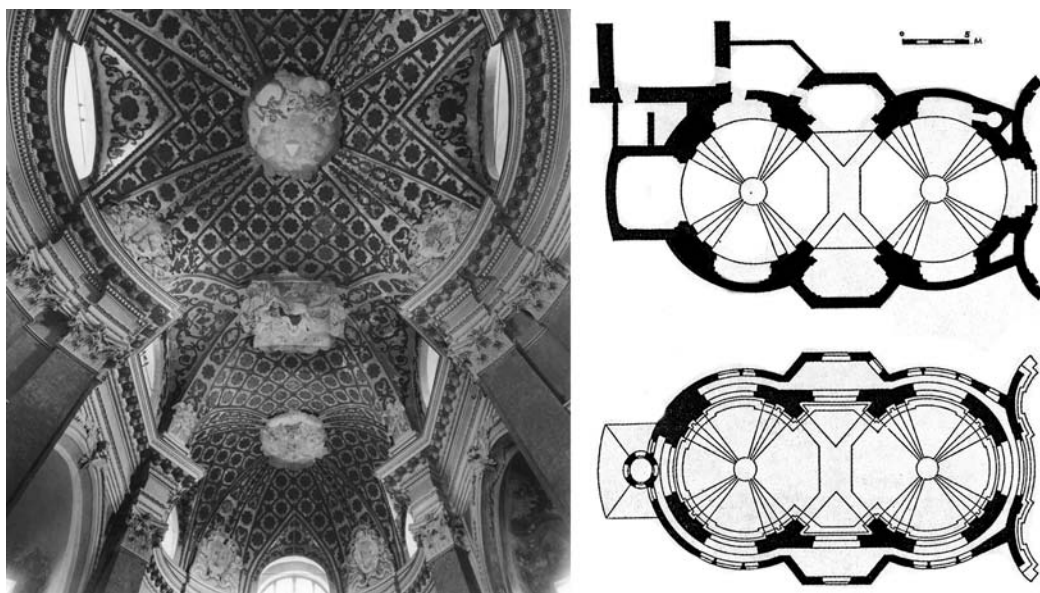


Figura 3  
Vista interior y plantas de la Capilla de la Sta. Inmaculada Concepción

La intencionalidad aquí expresada queda todavía más patente en la iglesia de Sta. María de la Divina Providencia en Lisboa (1656–1659), iglesia de planta de cruz latina donde la organización responde a una sucesión espacial mucho más compleja, continuando con las ideas plasmadas en la capilla de la Sta. Inmaculada Concepción y en San Filippo Neri en Turín. De ésta última utiliza el recurso de las pilastras situadas de manera rítmica, marcando la transición entre un espacio y el siguiente, pero suavizando los vértices, mientras que de la primera reutiliza la lectura longitudinal de la planta acompañada de una lectura secundaria transversal de menor escala.

El octógono ha evolucionado hacia el óvalo, aparece lo cóncavo frente a lo convexo, recursos que consiguen limpiar la interrelación espacial de las distintas celdas y generando una fluencia de espacios especialmente orgánica (figura 4).

La solución de cubierta se aproxima a una secuencia de pseudobóvedas vaídas, manteniendo plana la relación de una bóveda con la siguiente, simplificando enormemente la definición geométrica. La cubier-

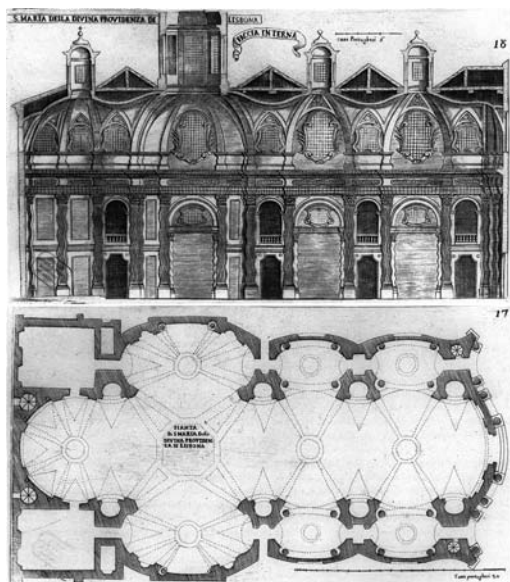


Figura 4  
Sección y planta de Sta. María de la Divina Providencia

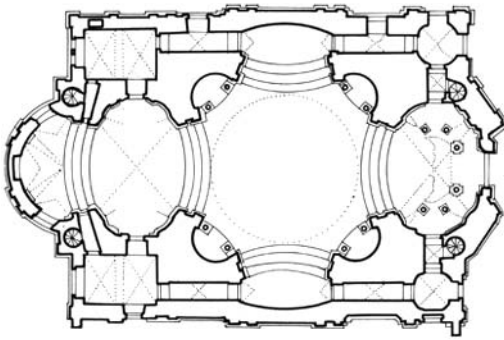


Figura 5  
Vista de fachada y planta de la iglesia de San Lorenzo en Gabel (1699–1711)

ta pretende reforzar la intencionalidad de la planta, pero todavía es incapaz de resolver la voluntad del autor. Un espacio dilatado del primer nivel corresponde con un espacio comprimido del segundo y viceversa, la lectura del espacio sincopado no queda del todo resuelto, y no es hasta la llegada de la familia Dientzenhofer cuando se consigue dar una respuesta definitiva a las ideas planteadas por Guarino Guarini sobre estos temas.

La solución constructiva queda también en entredicho. El punto de inflexión que se produce en la cubierta no sería compatible con una estructura de obra de fábrica,

Uno de los arquitectos encargados de transmitir este conocimiento hacia el otro lado de los Alpes fue Johann Lukas von Hildebrandt (1668–1745), (Christian Norberg - Schulz. 1985) hijo de madre italiana y padre alemán, realizó la mayor parte de sus estudios entre Roma y el Piamonte, ello le permitió conocer de primera mano la obra de Guarino Guarini (figura 5).

Una de las obras más interesantes, atendiendo a la argumentación aquí expuesta, es sin duda la iglesia dominicana de San Lorenzo en Gabel, donde la experimentación sobre el óvalo es patente. Iglesia de planta de cruz griega rematada por una cúpula central, sus cuatro capillas laterales de planta óvalo, recuerda los primeros diseños de yuxtaposición de celdas interdependientes de Guarino Guarini, donde todavía no se había profundizado en la compenetración de espacios.

Lo realmente interesante de este diseñador de grandes palacios, como el Palacio del Belvedere (1714–1723), fue el encargo que le realiza la familia Schönborn en Würzburg. Palacio de gran belleza donde consigue hacer coincidir a grandes artistas como el pintor y grabador italiano Giovanni Battista Tiepolo (1696–1770), creador de los frescos de la escalera principal, como a Johann Dientzenhofer perteneciente a una de las familias de arquitectos y constructores más importante de Bohemia, director de las obras del palacio con el joven arquitecto, y protegido por la familia Schönborn, Balthasar Neumann (figura 6).

#### LA FORMALIZACIÓN DE LAS NUEVAS FORMAS GEOMÉTRICAS

La experimentación comenzada por Guarino Guarini continúa en manos de la familia Dientzenhofer, prolífica en grandes arquitectos, canteros, constructores, etc. Dentro de la extensa obra realizada, principalmente en Bohemia y la República Checa, se han seleccionado dos obras de las más representativas donde de la expresión geométrica supera con creces lo hasta ahora comentado.

Una de ellas y punto de partida es la Iglesia de San Nicolás (Milada Vilímková 1989), de la ciudad pe-

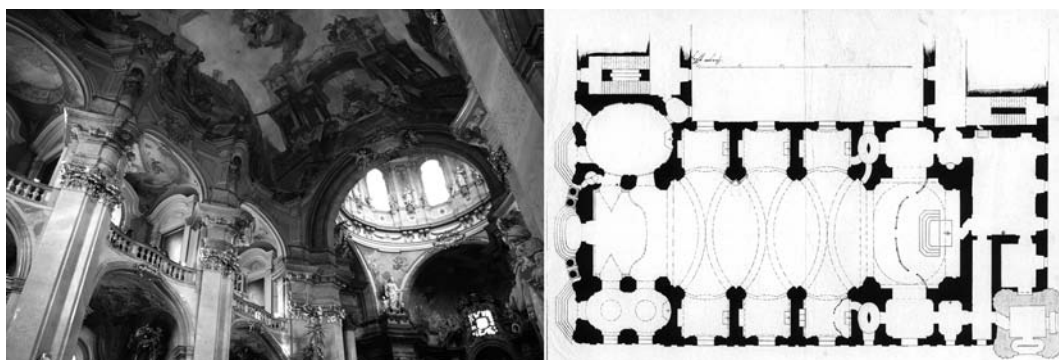


Figura 6  
Planta y vista interior de la iglesia de San Nicolas en la ciudad vieja en Praga

queña de Praga, propuesta que consigue resolver el problema de la yuxtaposición pulsante de celdas espaciales planteada por Guarino Guarini, con dos gestos simples: primero, cambiar la curvatura de los nervios que la cubierta para sincronizar la secuencia espacial del primer nivel con la del segundo, y reducir la superficie en planta de las pilastras que delimitan la nave principal.

Con estos simples gestos consiguen aumentar la sensación de la secuencia espacial, el espacio dilatado lo es aún más frente al siguiente comprimido. Este efecto ha sido denominado por autores como «síncopa» (RAE: Enlace de dos sonidos iguales, de los cuales el primero se halla en el tiempo o parte débil del compás, y el segundo en el fuerte).

La única solución para conseguir este efecto es la creación de un nervio alabeado en el espacio. Es una geometría capaz de resolver un problema a costa de crear otro de mayor dificultad. ¿Cómo construir un nervio alabeado en el espacio realizado con el material y los medios de la época?. El problema es tal que en este caso los técnicos no son capaces de dar una respuesta y la solución real resulta un tanto insatisfactoria, resolviéndose el nivel de cubierta mediante una solución más aproximada a una bóveda de cañón que a una verdadera superficie de doble curvatura.

Son los primeros intentos de intersección de cuádricas, cuya solución no aparece hasta varios siglos después, tras los estudios realizados por Fresier, o por Desargues.

Habrà que esperar al desarrollo de un grupo de iglesias donde sí se resuelve este problema, St. Jo-

seph en Obořiště (1702), Sta Klara en Cheb (1708), Sta Margaret en Brěnov (1709), o la más importante de todas, la iglesia del Convento Benedictino de Banz en Bad Staffelstein (1710) por Johann Dientzenhofer (figura 7).

Ésta última iglesia es de una sola nave, con una secuencia longitudinal dividida en tres espacios, uno primero de acceso y situación del órgano, uno central y principal de mayor dimensión y el último de la misma escala que el primero donde se sitúa el altar, todos resueltos con el mismo recurso arquitectónico. La composición espacial mantiene las pautas ya establecidas por Guarino Guarini, sobre yuxtaposición pulsante. El elemento compositivo más importante es el nervio alabeado organizador de todo el espacio.

La familia Dientzenhofer dispone de recursos para la realización de este nervio de gran complicación geométrica resolviéndolo con gran destreza con los recursos geométricos disponibles (Roidl 1995), a falta de conocimiento sobre intersección de cuádricas, están trazados sobre análisis planos, donde el desarrollo y composición de la planta basada en óvalos, no es compatible con una solución de cubierta basándose en el mismo recurso geométrico.

¿Qué superficie sencilla podemos generar apoyándonos en una planta óvalo, que sea fácilmente trazable? Existen dos soluciones: superficies de revolución apoyadas en el eje longitudinal o el trasversal. Geometrías que por sus proporciones no se adaptan a las condiciones de partida y por tanto descartadas por el autor.



Figura 7

Alzado, planta y vista de la cubierta principal desde el trasdós de la iglesia del Convento Benedictino de Banz (Zimmer 1976)

La resolución espacial se complica enormemente en el momento que pretendemos intersectar dicha superficie con otra de diferente dimensiones y orientación. El planteamiento sería al contrario, una vez determinada la intersección que deseo, aproximo una superficie de acuerdo adaptándola al contorno conocido. La traza del nervio alabeado está basada en superficie circulares, responde a la intersección de dos cilindros de distinto diámetro, cuyo resultado es un nervio alabeado en el espacio cuya proyección en planta como en sección es un círculo.

La solución es fácilmente construible, se realiza el replanteo del primer cilindro vertical en planta realizando un encofrado de madera sobre el que se traza el segundo círculo en la dirección longitudinal de la nave principal, que podrá utilizarse para sostener el resto del encofrado de la cubierta.

El proceso constructivo comienza con la realización de los muros, posteriormente se resuelve la cu-

bierta a dos aguas que dará cobijo a la realización del resto de la intervención y ayudará a contrarrestar los empujes horizontales de las futuras bóvedas y cúpulas, resueltas mediante cerchas planas basadas en pares y tirantes, apoyadas en los muros perimetrales. Posteriormente se realizará el encofrado completo de las cúpulas interiores sobre el cual se apoyará la ejecución de las distintas cúpulas de fábrica. El gran conocimiento sobre el uso y manipulación de la madera le permitirán realizar estos encofrados con suficiente precisión, existen grandes ejemplos de soluciones de cubierta que ratifican esta idea, como la solución adoptada en la Iglesia Benedictina de Neresheim, donde podemos apreciar su tecnología.

Cubierta de la iglesia de Banz es de 30 cm de espesor resuelta mediante obra de fábrica de ladrillo de  $14 \times 28 \times 4,5$  de espesor con una llaga aproximada entre 1,5 y 2 cm, de mortero de cal (probablemente), reforzada por la solución constructiva de los nervios alabeados, de mayor espesor. La solución adoptada para los nervios alabeados se acerca más a dos arcos planos apoyados en la clave el uno sobre el otro, donde la zona cercana a la clave es prácticamente plana apreciándose el aumento del alabeo conforme nos acercamos a los arranques.

La solución de la sección en «V» invertida en la clave aporta gran rigidez al sistema de nervios y colaboran en la estabilidad en las tres direcciones del espacio contrarrestando los empujes horizontales al trabajar los nervios dos a dos. La unión entre las distintas cubiertas se realiza en estos nervios alabeados, donde se refuerzan los espesores para ayudar a la estabilidad y aumentar la capacidad resistente a compresión. En las distintas intersecciones con elementos secundarios como los lunetos no se realiza ningún tipo de refuerzo mediante nervios, las tensiones de transmiten por la propia traba del ladrillo.

Es clave en el diseño de Balthasar Neumann de la Capilla de la Residencia de Würzburgo (Müller 2002) (Sedmaier y Pfister 1923), la amistad adquirida con Johann Dientzenhofer, lo cual permitió al primero visitar las obras de la Iglesia del Convento Benedictino de Banz y aprovechar el gran conocimiento constructivo del segundo.

La ayuda como director de las obras de la Residencia de Würzburgo de Johann Dientzenhofer fue inestimable y permitió realizar la capilla con una composición espacial basada en la Iglesia de Banz con una solución constructiva basada en la gran ex-

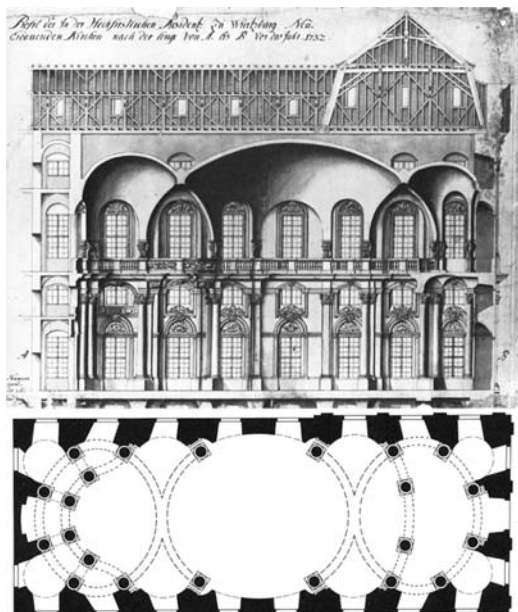


Figura 8  
Planta y sección de la Capilla de la Residencia de Würzburg (1710)

perencia de Balthasar Neumann como arquitecto militar

Planta de una nave generada por la intersección de tres cúpulas principales de planta ovalo con axialidad longitudinal con otras dos de menor dimensión, también de planta ovalo, con axialidad trasversal. El resultado es una composición espacial basada en los mismos conceptos espaciales de yuxtaposición pulsante, donde el nervio alabeado del caso anterior se diluye hasta convertirse en una superficie de transición entre las dos cúpulas principales adyacentes (figura 8).

Ya no existe un nervio de refuerzo alabeado que resuelve la intersección, la solución responde más a la intersección de dos superficies de doble curvatura, controlando la arista viva intersección que se produce en el intrados. La solución constructiva adoptada pierde sensación de movimiento, y se compensan con la realización de sendos nervios postizos que no tienen ningún reflejo estructural.

La distinta disposición del ladrillo induce a pensar que las dos superficies no están completamente tra-

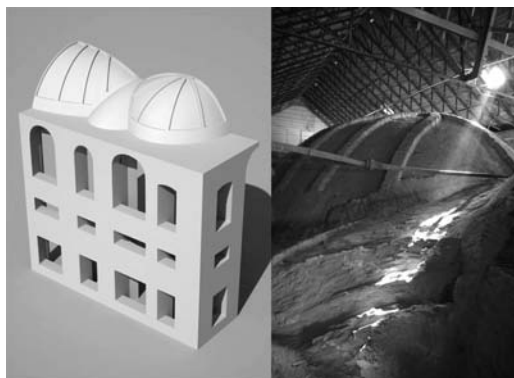


Figura 9  
Cubierta de la Capilla de la Residencia de Würzburg

badas, y que se produce una cierta discontinuidad entre ambas, estabilizadas exclusivamente mediante el peso propio de la propia cubierta y la adherencia del mortero de contacto (figura 9).

Las cúpulas principales están resueltas mediante fabrica de ladrillo de una sola capa de 30 cm de espesor reforzadas en la base mediante el aumento de la lámina en 15 cm (Otto 1979). La colocación de varios nervios radiales de  $45 \times 45$  cm de sección, ejecutados al mismo tiempo que la cúpula. Mientras que las superficies trasversales intermedias son simples láminas de 30 cm de espesor sin ningún tipo de refuerzo, la disposición de los ladrillos responde más a una adaptación a la geometría de doble curvatura, que a una respuesta estructural.

Esta solución constructiva modifica la fluencia de las tensiones a cimentación, cambiando de manera significativa el comportamiento frente a la solución constructiva realizada por la familia Dientzenhofer en Capilla de Banz.

Pero la obra más interesante respecto a un verdadero comportamiento laminar, es la solución adoptada en la Basílica de los Catorce Santos (Hansmann 1999) «Vierzehnheiligen», obra diseñada por Balthasar Neumann cuya construcción no pudo completarse, ya que falleció cuando se encontraba la ejecución de los muros a la altura de la cornisa. La solución de cubierta es completamente diferente al caso anterior, no solamente por la escala y la falta de refuerzos, sino también por el cambio de material (figura 10).

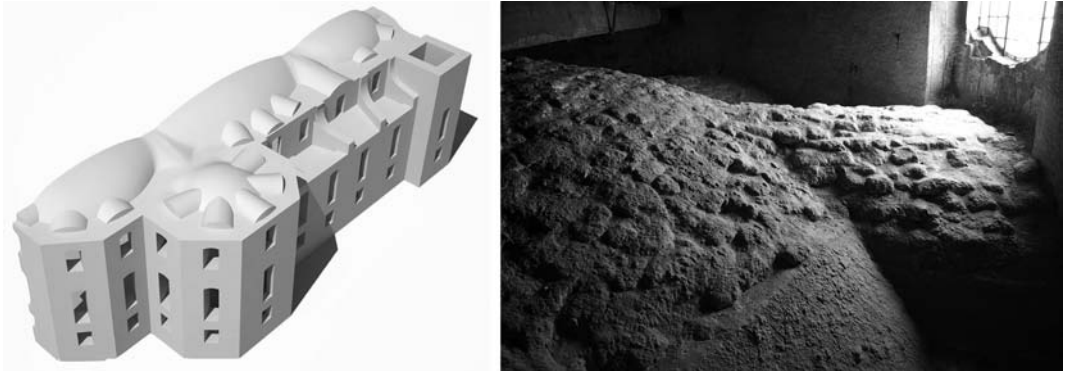


Figura 10  
Modelo Espacial y vista del trasdós de la Cubierta de la Basílica de los Catorce Santos

La traza geométrica responde a las mismas premisas establecidas en la Capilla de la Residencia de Würzburgo (Eckert), pero aumentadas de escala. En este caso la composición de la planta se organiza según un cruz latina de tres naves laterales y un transepto rematado por sendas cúpulas esféricas (figura 11).

Se trata de una cubierta de 30 cm de espesor sin ningún tipo de refuerzo estructural en las intersecciones de la cúpulas y realizadas mediante una piedra sedimentaria llamada «Tuff», extraída de un río cercano. (Ludwig 1982).

## CONCLUSIONES

La falta de conocimiento geométrico tridimensional, no ha sido justificación suficiente para la realización de grandes geometrías. La respuesta ofrecida al diseño del nervio alabeado anteriormente comentado es realmente innovadora, así como su solución constructiva.

El gran tecnología que disponían para el tratamiento y manipulación de la madera no solo ha permitido realizar con éxito las cubiertas de obra de fábrica, sino que la solución de sobrecubierta basadas en grandes cerchas planas biapoyadas en sus extremos ha contribuido tanto a la ligera de la cubierta de obra de fábrica como a centrar los empujes horizontales provocados.

El buen comportamiento estructural está basado más en la geometría final del conjunto que en las pro-

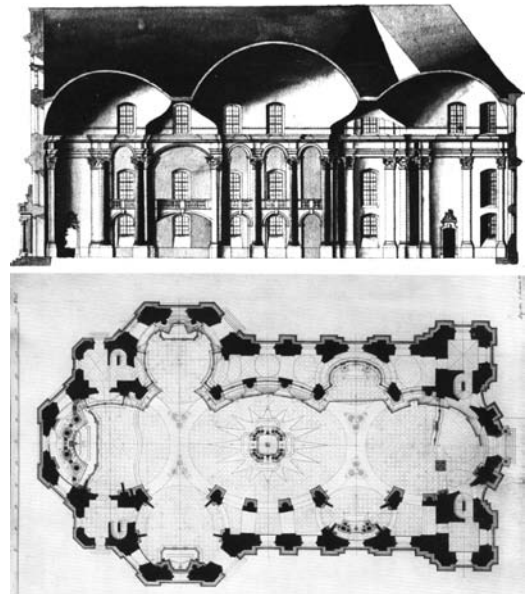


Figura 11  
Planta y sección de la Basílica de los Catorce Santos

pias decisiones constructivas, como tipo y/o orientación del material, etc.

En general el nivel de tensiones es bajo excepto en zonas sensibles donde si se produce una cierta redistribución de tensiones debido a microfisuras por tracción, como pueden ser las zonas cercanas a los



nervios alabeados, donde se produce una cierta concentración de tensiones.

La relación espesor ladrillo/mortero cercanas al 50% y la solución de mortero de cal favorecen una cierta redistribución de tensiones, que colaborará más al comportamiento de membrana frente al de lámina.

Aunque los ejemplos más interesantes son debidos principalmente a Balthasar Neumann, como la Capilla de la Residencia de Würzburgo o la Basílica de los Catorce Santos, realmente no habrían sido posibles sin la estimada colaboración de la Familia Dientzenhofer.

#### LISTA DE REFERENCIAS

- Eckert, Sammlung. *Aus Balthasar Neumanns Baubüro*. Mainfränkisches Museum.
- Hansmann, Wilfried. 1999. *Balthasar Neumann*. Dumont.
- Ludwig, Franzl. 1982. *Balthasar Neumann, Dachwerke Seiner Landkirchen*, Technischen Universität Berlin.
- Meek, H.A. 1988. *Guarino Guarini and his architecture*. Yale University Press.
- Müller, Werner. 2002. *Von Guarino Guarini Bis Balthasar Neumann*. Michael Imhof, Petersberg Verlag.
- Norberg-Schulz, Christian. 1985. *Weltgeschichte Der Architektur, Spätbarock Und Rokoko*. Deutsche Erlagsanstalt Stuttgart.
- Otto, Christian F. 1979. *Space Into Light. The Churches Of Balthasar Neumann*, Mit Press Series.
- Roidl, Wolf Hartmut. 1995. *Die Kurvierten Sakralräume Des Christoph Dientzenhofer*. Tuduv-Studien.
- Sedlmaier, R. y Pfister, R. 1923. *Die Fürstbischöfliche Residenz Zu Würzburg*. München Verlegt Bei Georg Müller.
- Vilímková, Milada. 1989. Johannes Brucker. *Dientzenhofer*, Rosenheimer Verlagshaus.
- Zimmer, Hans. 1976. *Die Dientzenhofer*. Rosenheimer Verlagshaus Forg.

