

# El método de los conos como desarrollo gráfico-analítico de la forma y del trazado geométrico en las construcciones abovedadas de los Vandelvira. La capilla desigual por lados cuadrados como caso de estudio singular

Antonio Estepa Rubio  
Jesús Estepa Rubio

Abordaremos un análisis gráfico estricto sobre la morfología, la configuración y la planificación desplegadas por Alonso de Vandelvira en su tratado y por Andrés de Vandelvira en su obra ejecutada para poner en pie los novedosos sistemas de abovedado esférico que, gracias a ellos, hemos recibido en herencia.

Para conseguir con exactitud los patrones necesarios para acometer el desbaste del material pétreo extraído de la cantera, Vandelvira recurre al artificio geométrico de inscribir un cono en cada hilada esférica, de forma que las dovelas, por decirlo de un modo visual, habrían dejado impresa su silueta de intradós en cada cono antes de desarrollarlos por niveles y obtener los correspondientes patrones.

Dentro del método de los conos, cabría hacer una clara diferenciación de acuerdo con la proyección que se erija como principal para el desarrollo del trazado pretendido; esto es, utilizando un léxico más vulgar, podemos decir que existen diferencias en la formalización del método de cálculo en función de que el trazo final que queramos obtener, ya sea un segmento, o por el contrario, un arco de circunferencia. Ello irremediamente nos obliga a resolver el cálculo gráfico de dos formas distintas, por un lado desde la intrusión en la proyección vertical de un cono de revolución con su eje de giro perpendicular al plano horizontal, lo que engendraría un trazo circular en la proyección de la planta, o por otro lado, si en la planta buscamos una proyección de despiece en tramos rectos, la intrusión del cono en la proyección

vertical la haremos de forma que el eje de giro del cono sea paralelo al plano horizontal.

Soportaremos esta explicación a partir de dibujos en proyección diédrica sobre los que levantaremos tridimensionalmente el caso de estudio que vamos a desarrollar en profundidad, esto es, la capilla desigual por lados cuadrados.

## APROXIMACIÓN CONCEPTUAL

Como sabemos la esfera es una superficie ideal cuya construcción por adición de fragmentos planos resulta matemáticamente imposible, salvo en el caso de que redujésemos las partes a sumar en elementos infinitesimales, lo cual desde el punto de vista de la construcción resulta también materialmente imposible. Por ello fue imprescindible encontrar un método de aproximación iterativa que les permitiera reducir el problema a otro similar, que ahora sí, pudiese ser atajado desde las posibilidades de las técnicas constructivas, que cómo cualquier otra actividad que nace de la mano del hombre, se caracteriza por tolerar en mayor o menor medida la imperfección (figuras 1 y 2).

Para conseguir los patrones necesarios para el desbaste de las piedras extraídas de la cantera, Vandelvira recurre al artificio geométrico de inscribir un cono en cada hilada, de forma que las dovelas, por decirlo de un modo gráfico, habrían dejado impresa su silueta de intradós en cada cono antes de desarrollarlos

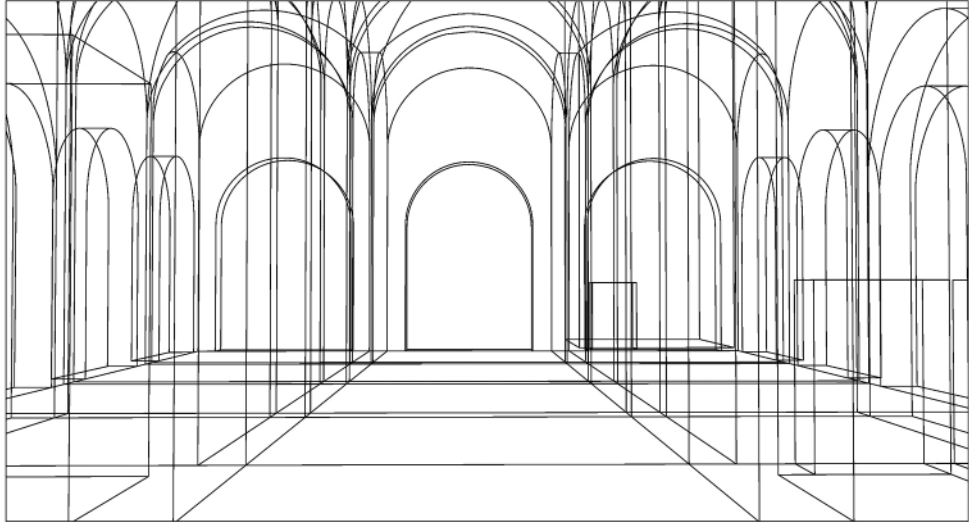


Figura 1  
Esquemización del espacio interior de Iglesia Parroquial de la Inmaculada Concepción en Huelma. Dibujo de Antonio Estepa Rubio.

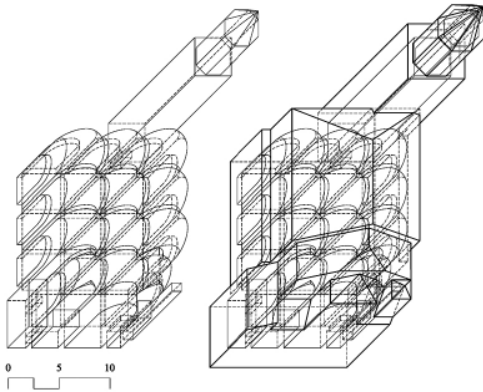


Figura 2  
Perspectivas militares sobre las secuencias espaciales de configuración formal de la Iglesia Parroquial de la Inmaculada Concepción en Huelma. Dibujos de Antonio Estepa Rubio.

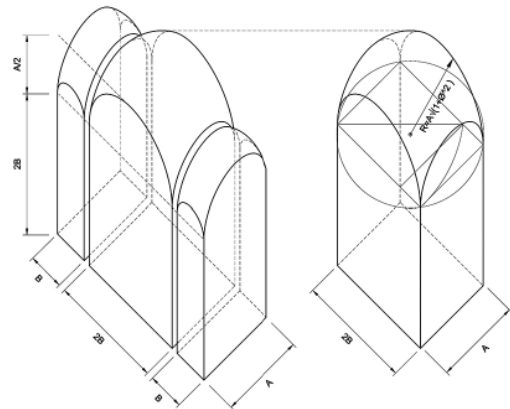


Figura 3  
Esquema de cubrición espacial por bóvedas vaídas. Dibujo de Jesús Estepa Rubio.

por niveles y obtener los correspondientes patrones (figura 3).

El método de los conos que emplea Vandelvira para la determinación de los cortes exactos que tenía que ir acometiendo para la resolución de cada uno de

los casos y posteriormente para el cálculo de cada una de las familias de dovelas y/o los casos particulares que fuesen resultando, se fundamenta en los teoremas de intersección de cuádricas (figura 4), más concretamente a la intersección de cuádricas de revolución, y de forma específica en el caso de intersección de superficies de ejes paralelos; los enunciados

de estos teoremas fundamentales son estos (Izquierdo Asensi 2000, 116):

1. Cuádricas con un plano de simetría común. La intersección de cuarto orden se proyecta sobre este plano, según una curva de segundo orden.
2. Cuádricas bitangentes. Se cortan, según dos cónicas que pasan por los puntos de tangencia puntos dobles de las superficies.
3. Ejes concurrentes. La intersección se proyecta ortogonalmente sobre el plano de los ejes, según una hipérbola.
4. Ejes concurrentes y circunscritos a una esfera. Se cortan según dos cónicas que se proyectan sobre el plano de los ejes según dos rectas.
5. Ejes paralelos. La intersección se proyecta sobre el plano de los ejes, según un arco de parábola de eje normal al de las cuádricas.

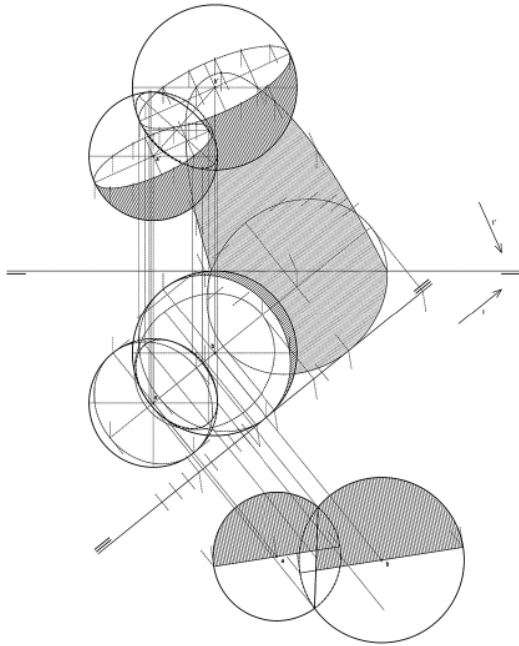


Figura 4  
Ejemplo de aplicación de los teoremas de intersección de cuádricas para la resolución de bóvedas concatenadas. Dibujo de Antonio Estepa Rubio.

#### FORMULACIÓN TEÓRICA Y GRÁFICA

Dentro del método de los conos, cabría hacer una clara diferenciación, de acuerdo con la proyección que se erija como principal para el desarrollo del trazado pretendido; esto es, utilizando un léxico más vulgar, podemos decir que existe una diferenciación en la formalización del método de cálculo en función de que el trazo final que queramos obtener sea un trozo de recta, o por el contrario sea un trozo de circunferencia. Ello irremediablemente nos obliga a resolver el cálculo gráfico de dos formas distintas, por un lado desde la intrusión en la proyección vertical de un cono de revolución con su eje de giro perpendicular al plano horizontal, lo que engendraría un trazo circular en la proyección de la planta, o por otro lado, si en la planta buscamos una proyección de despiece en tramos rectos, la intrusión del cono en la proyección vertical la haremos de forma que el eje de giro del cono sea paralelo al plano horizontal.

Para entender cómo trabaja este método nos apoyaremos en la figura que se muestra, para la cual se ha supuesto la premisa de que el desarrollo estereotómico anhelado tiene trazado circular, esto es, la intrusión del cono auxiliar en la proyección vertical (alzado) tiene eje de giro perpendicular al plano horizontal de proyección (planta), y además, para que la intersección sea una curva cónica en el espacio (y no cuártica tal cual determinan los teoremas generales) se hace que el centro de la esfera quede contenido en el eje de revolución del cono (figura 5).

Este cono auxiliar pasará por los puntos extremos que definen la dovela en el alzado, para el croquis representado, los puntos A y B, que son los extremos por donde pasarán las curvas de intersección de la esfera y el cono<sup>1</sup>, que estará acotado por un desarrollo angular, con un ángulo de valor  $\beta$ , que es el que acota el trazado del despiece, y que en definitiva es el que se traza en el dibujo. El valor angular  $\beta$  se obtiene por un procedimiento gráfico que nos permite calcular la verdadera magnitud del desarrollo, que evidentemente en la proyección horizontal no se conoce de un modo directo, pues como sabemos pierde su magnitud al ser estirado de acuerdo con la parte proporcional equivalente que le corresponde.

En realidad la transformación plana de un sector de esfera no se puede hacer con un único cono que pasa por su intradós, en tanto que la equidistancia entre las cotas verticales (para nuestro dibujo llamadas

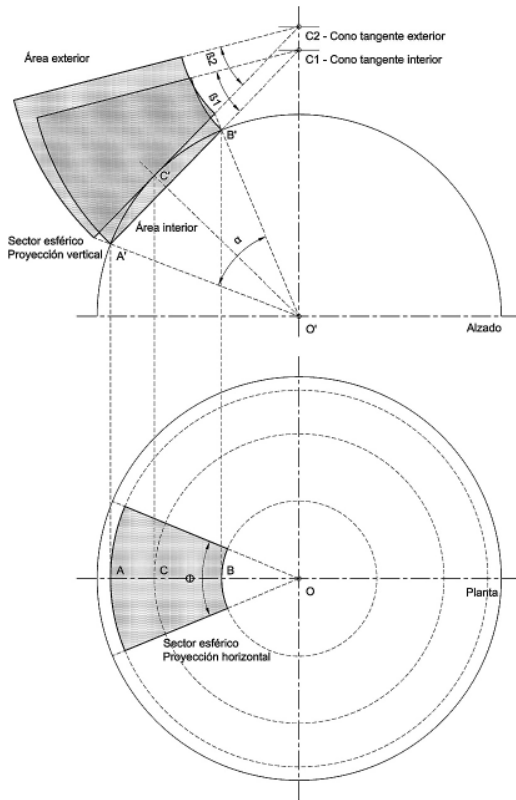


Figura 5  
Procedimiento geométrico de cálculo de un fragmento de esfera a partir de la intrusión de un cono equivalente. Dibujo de Antonio Estepa Rubio.

A y B) implican una imperfección directamente proporcional a la magnitud de ésta. Por lo tanto para acercarnos a una solución exacta existen dos procedimientos de carácter geométrico; la primera opción pasa por disminuir el tamaño de la pieza que estamos calculando, lo que de algún modo se contradice con el espíritu global del procedimiento, que pretende construir una idea de *lo moderno* claramente separada de *lo romano* (en lo compositivo y en lo constructivo) y que se aleja del modelo conceptual estereotómico para reencontrarse con la albañilería<sup>2</sup>; el segundo método, es sin duda alguna más complejo, enrevesado, toda vez que enfermizamente minucioso y purista, consiste en calcular cada pieza un mínimo de dos veces, una vez de acuerdo con las premisas generales que hemos determinado, es decir, pasando

un cono por el intradós de la esfera a partir de las cotas máximas definidas por sus equidistancias extremas en proyección horizontal (en el dibujo al que nos referimos A y B), y por segunda vez pasando un cono tangente al trasdós de la esfera, en el punto definido por la intersección de una recta perpendicular al segmento definido por la unión de las cotas extremas (A y B) y el contorno aparente de la proyección vertical de la esfera (punto C de nuestro dibujo), o lo que es lo mismo, el punto definido por la bisectriz del valor angular de la proyección vertical  $\alpha^3$  y el contorno aparente vertical de la esfera; una vez calculadas estas dos operaciones, la superficie exacta del desarrollo matemáticamente perfecto (resuelto de un modo gráfico) sería la media de las superficies halladas por el desarrollo del cono del trasdós y el intradós<sup>4</sup>.

#### JUSTIFICACIÓN FORMAL

Para resolver este planteamiento es necesario y de clara aplicación el conocimiento sobre cómo intersectar superficies en el espacio, como vemos no solamente para el diseño del arquetipo, sino irremediablemente para su transformación en dovelas que permitiesen edificarlo, y una vez resuelta la composición tener la suficiente pericia para poder reducir la geometría a patrones extraídos de un cono de revolución, por lo cual será pertinente saber qué procedimiento de cálculo gráfico se empleaba para acometer esta empresa.

Dicho lo anterior habría que matizar diciendo que las reflexiones geométricas a las que nos hemos referido tienen un carácter absolutamente abstracto y conceptual, en tanto que la proporción entre la definición espacial del vano a cubrir y la formalización de la pieza de construcción empleada, hace que la imperfección fruto de la transfiguración del sector esférico del intradós en un sector de cono, sea absolutamente despreciable e imperceptible (aun cuando estas piezas, vistas y comparadas con la escala humana resulten ciertamente voluminosas).

Cuando la superficie de la dovela se complejice en geometrías poligonales, deformaciones ovales o elípticas del círculo, se originarán conos auxiliares de muy diversas naturalezas y características. No estamos hablando del cono en cuanto figura rígidamente definida, sino en cuanto a manipulación instrumental de la convergencia de un punto de líneas tangentes a

una cierta diversidad de superficies (Ampliato Briones 1996, 125). Se trata de un planteamiento geométrico que, procediendo de un campo de aplicación completamente diferente, resulta perfectamente análogo al utilizado para la resolución de los problemas perspectivos (Barrañón 2006, 149–158) mediante la conocida pirámide visual de Alberti. Cantería y perspectiva constituyen en definitiva dos vertientes diferentes de una serie de experiencias en geometría aplicada (que se amplía a otras disciplinas) de las que va surgiendo progresivamente, por diversas vías y mediante consolidaciones parciales, todo un sistema de relaciones que se corresponden con un nuevo concepto de *espacio geométrico*, que en hoy día denominamos como *espacio proyectivo* (Ampliato Briones 1996, 126).

Aunque en principio, y pese a las analogías geométrica detectadas, puedan parecer dos mundos diversos o difícilmente relacionables, no podemos descartar en absoluto el que pudiera haber surgido en un determinado momento, con la consiguiente inven-

ción de ciertos juegos formales específicos, una convergencia intencionada de experiencias tan aparentemente diversas como las que rodean al control visual del espacio perspectivo, por un lado, y a la resolución de los despieces de cantería por otro. Así, un ejercicio interpretativo aparentemente trivial es el que nos propone el profesor Antonio Ampliato Briones para comprender esta semejanza, y se fundamenta en que la trompa avenerada que Andrés de Vandelvira diseña para el Convento de La Guardia en Jaén (figura 6), se reviste a la luz de la anterior hipótesis de una inesperada densidad conceptual, en tanto que la solución ideada plantea con sencilla elocuencia la superposición de las dos sistematizaciones geométricas<sup>5</sup> puestas en juego por el arquitecto (Ampliato Briones 1996, 127).

Esta investigación pretende ser especialmente purista en cuanto a la definición de los supuestos teóricos que soportan idealmente los procedimientos empleados por los tracistas, por ello ahondamos en los mecanismos que deben ser empleados para resolver convenientemente las operaciones gráficas a las que nos hemos referido anteriormente.

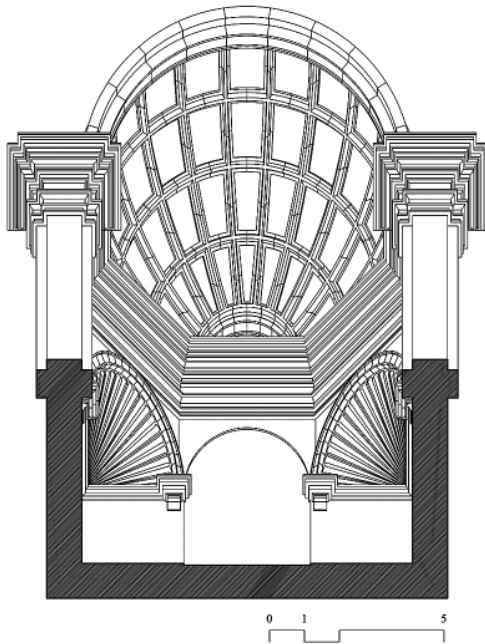


Figura 6  
Axonometría egipcia cenital del ochavo de La Guardia. Dibujo de Antonio Estepa Rubio.

#### CÁLCULOS GRÁFICOS DE APOYO

Con arreglo a lo expuesto, se hace especial hincapié en que la ponderación planimétrica del desarrollo de una superficie cónica se obtiene a través de la definición de un valor angular que acote cuál es la generatriz inicial y cuál es la generatriz final entre las que se pueden encerrar las infinitas generatrices que componen el cono.

Este valor angular es hallado a partir de una proporción constante entre el radio de la circunferencia que limita la longitud de la generatriz y esta misma longitud definida en la cota de giro; así la fórmula empírica que define el ángulo que nos interesa calcular para conocer el desarrollo vendrá dada por la expresión siguiente: .

Pero la formulación empírica citada resulta incómoda, además de impertinente, pues parece más operativo obtener este valor angular también desde una operativa de cálculo apoyada en su totalidad sobre un código gráfico.

Para resolver el valor angular se parte del trazo de una circunferencia de valor la generatriz del cono  $G$  (figura 7); en el cuadrante inferior de ésta hacemos



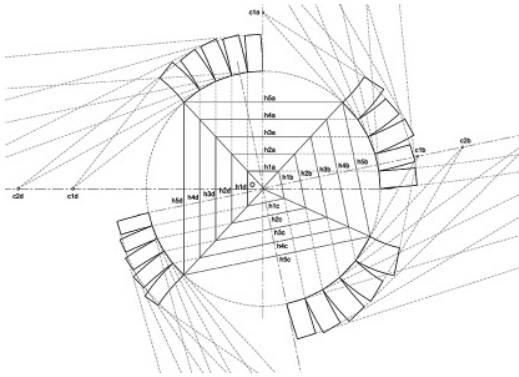
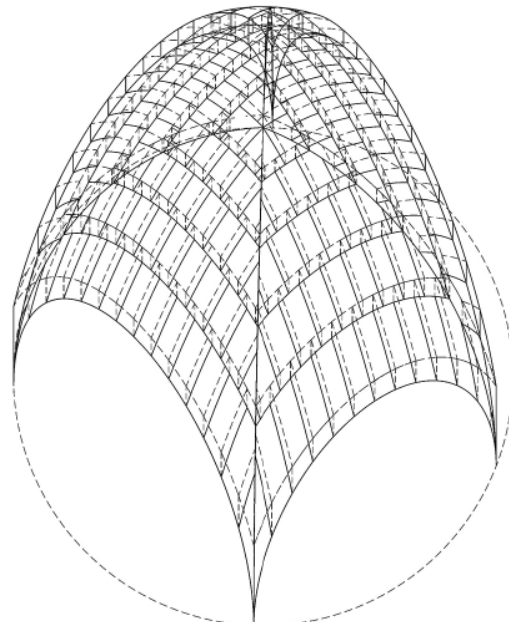
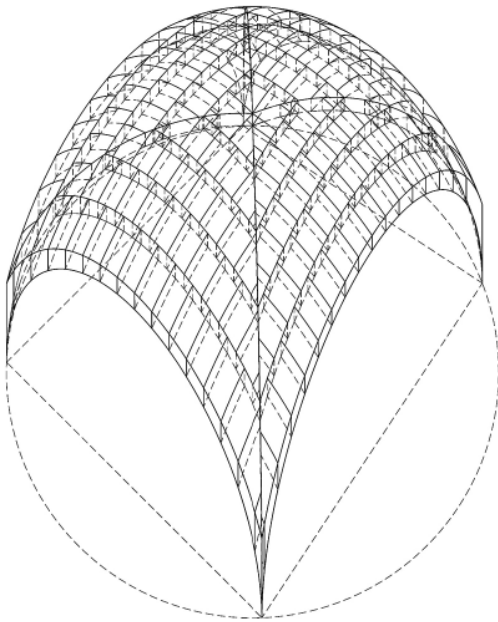


Figura 8  
Trazado geométrico de la «capilla desigual por lados cuadrados» definida por Alonso de Vandelvira. Dibujo de Antonio Estepa Rubio.

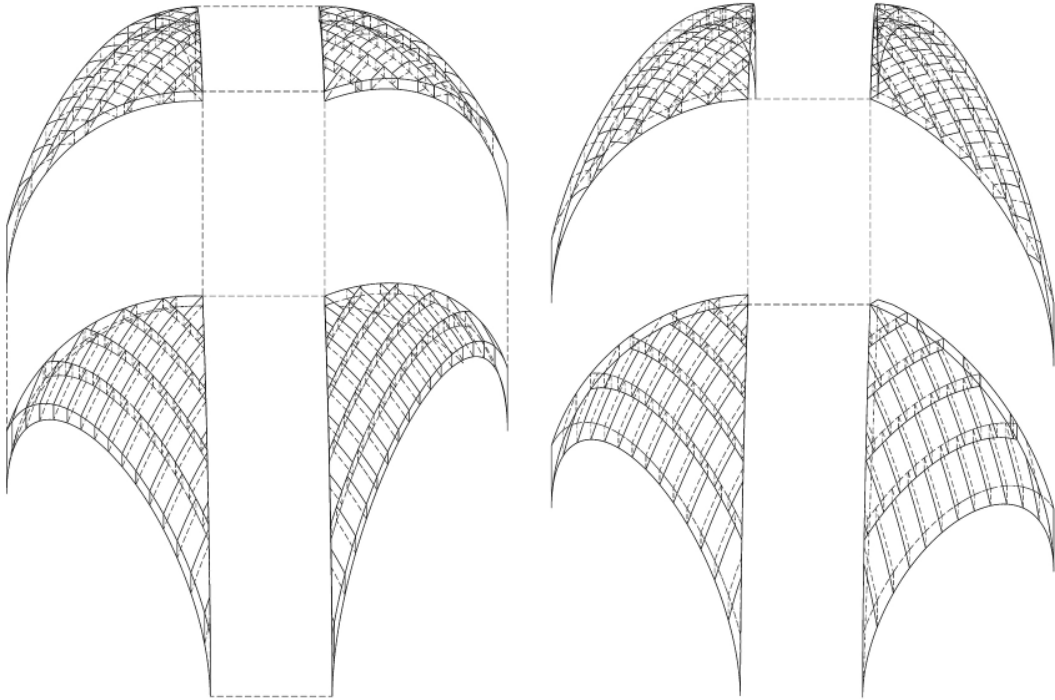
superficie esférica, puesto que la solución de disgregación estereotómica en cuatro procedimientos diferenciados solamente responde a una forma de demos-

tración de que con una misma geometría también se puede dar cobertura a un espacio definido por un polígono de lados desiguales. Cada uno de los lados de la perimetral de la capilla engendrará una familia de conos sectores de eje horizontal, que sobre la planta se dibujan como segmentos paralelos a la perimetral exterior, y que como es natural, se encontrarán con la familia de cortes que tiene, a cada uno de sus lados, en las bisectrices que se trazan desde las maestras sobre los contornos que definen la capilla por su exterior (figuras 9 y 10).

Si en la *capilla redonda en vuelta redonda* existe una simetría biaxial que simplifica la ejecución notablemente, y por ende su trazado, para la *capilla desigual por lados cuadrados* no cabe emplear la simetría como mecanismo de reducción de las operativas gráficas. No obstante habría que tener en consideración que esta solución se utilizó normalmente como sistema de cierre de estructuras mayores, fundamentalmente cuando tocaba acomodar un diseño sobre una disposición concreta, siendo su solución por tanto residual (figuras 11 y 12).



Figuras 09 y 10  
Axonometrías militares aérea y cenital del despiece estereotómico de la «capilla desigual por lados cuadrados». Dibujos de Antonio Estepa Rubio.



Figuras 11 y 12

Axonometrías militares explosionadas aérea y cenital del despiece estereotómico de la «capilla desigual por lados cuadrados». Dibujos de Antonio Estepa Rubio.

### CONCLUSIONES

De acuerdo con lo dicho podemos concluir que Andrés de Vandelvira, conjuntamente con otros maestros de su tiempo, supo definir un nuevo lenguaje para dar respuesta a las complicadas situaciones geométricas con las que se enfrentaban.

En este sentido, el desarrollo y la puesta a limpio de esta forma de proceder, de este método gráfico, vine a confirmar nuestra tesis de que en aquel momento se generó un profundo interés por aunar diseño y construcción, o lo que es lo mismo, se procuró ser muy eficiente a la hora de resolver las decisiones ejecutivas que implicaban a elementos parciales del diseño.

Como colofón final, simplemente apuntar que este método no es sino la base sobre la que posteriormente se implementaron operativas más complejas, que en definitiva no hacían sino buscar la forma más sencilla para poder abatir sobre el plano fragmentos de

distintas superficies, en general, con secciones de varias curvaturas.

### NOTAS

1. Las curvas de intersección del cono y la esfera se resuelven como dos circunferencias homotéticas (una de entrada y otra de salida, por ser una intersección «tipo penetración») con sus centros contenidos en el eje de giro del cono. La intersección cuártica se reduce a dos cónicas (dos curvas de segundo grado que sumadas equivalen a una curva de cuarto grado en el espacio), por el hecho de que el eje de giro contiene al centro de la esfera. De acuerdo con los teoremas generales, la proyección vertical en el plano de los ejes (o uno paralelo a él) reduce su grado a la mitad, de forma que en la intersección del cono y la esfera (intersección de cuádricas de ejes paralelos) la proyección se toma en un arco de parábola, si bien al ser coincidentes los ejes de revolución de ambas superficies (paralelismo infinitamente



- próximo), el vértice de la parábola estará en el infinito, por lo cual el arco de parábola muta en dos segmentos de rectas paralelas (que no son sino las ramas de una parábola degenerada por su distancia extrema).
2. Si esta fuera la solución, el método se caería por su propio peso, puesto que si disminuimos excesivamente el tamaño de la dovela, entonces la forma específica de cada una de las hiladas distorsionan en semejanza hasta una proporción intermedia que permitiría que todas ellas pudiesen ser homogeneizadas, esto es, las dovelas distorsionarían en lo que vulgarmente llamamos ladrillos.
  3. El valor angular de la proyección vertical igualmente proyecta su valor en verdadera magnitud, si bien este ángulo no nos sirve para el desarrollo de la superficie, puesto que tanto sólo es una entidad referencial que nos sirve de soporte para el cálculo de la tangencia extrema de la pieza. El punto de tangencia real de este cono en el espacio será el que se define de este modo en su proyección vertical, y cumple la particularidad de estar contenido en el plano bisector de la dovela, esto es, tiene su proyección horizontal contenida en la bisectriz del ángulo  $\beta$ .
  4. Ciertamente, si hacemos infinitesimal la distancia entre A y B, resulta que el punto C se hace coincidente con los dos anteriores, y por ende los dos conos (del intradós y el trasdós) se hacen igualmente coincidentes entre sí.
  5. El vértice del cono desde el que se desarrollan las superficies de las dovelas es exactamente el mismo vértice que simboliza el punto de fuga del imaginario espacial ideal en el que permanecen suspendidas las figuras. Se demuestra así (con este fabuloso ejemplo de Andrés de Vandelvira) como el maridaje de los dos procedimientos geométricos, de composición y de dominio constructivo del espacio físico arquitectónico, tienen una lógica teórica e intelectual común que se sustenta en procedimientos abstractos que pudieron ser empleados en casos y situaciones dispares, y es por ello por lo que ciertas imágenes pueden alcanzar un cierto valor paradigmático del contexto teórico en el que se desenvuelve la arquitectura que venimos analizando.
  6. Hemos de posicionarnos en el hecho de que en el siglo XVI no existían procedimientos mecánicos avanzados que permitieran la repetición seriada, por lo cual resultaba fundamental ahondar en la economía de los medios empleados. Es por ello por lo que el desarrollo de estrategias de simplificación formal adquiere una importancia mayúscula, en tanto que según lo explicado, el uso inteligente de una misma plantilla de desbaste ahorra el tener que hacer un modelo para cada traza, lo cual irremediablemente implicaría un aumento del tiempo repercutido para la extracción de cada una de las dovelas de la fábrica y paralelamente un aumento del coste por jornales.

## LISTA DE REFERENCIAS

- Ampliato Briones, A. 1996. *Muro, orden y espacio en la Arquitectura del Renacimiento Andaluz: Teoría y práctica en la Obra de Diego Siloé, Andrés de Vandelvira y Hernán Ruiz*. Sevilla: Universidad de Sevilla y Consejería de Obras Públicas y Transportes.
- Barbé Coquelin De Lisle, G. 1977. *El tratado de arquitectura de Alonso de Vandelvira: Edición con introducción, notas, variantes y glosario hispano-francés de arquitectura*. Madrid: Confederación Española de Cajas de Ahorros.
- Barrañón, A. 2006. La pirámide visual en la Physica de Fray Alonso de la Veracruz. *Memorias del Congreso Nacional de la Sociedad Mexicana de Historia de la Ciencia y la Tecnología*, 149–158. México: Academia Mexicana de Ciencias.
- Calvo López, J. 2002. Superficies regladas desarrollables y alabeadas en los manuscritos españoles de cantería. *IX Congreso internacional de Expresión Gráfica Arquitectónica. Re-visión: Enfoques en docencia en investigación (9º:2002: La Coruña)*, 337–342. La Coruña: Universidad de A Coruña.
- Calvo López, J. 2005. Estereotomía de la piedra. *I Máster de Restauración del Patrimonio Histórico*, 115–152. Murcia: Colegio de Arquitectos - Colegio de Aparejadores y Arquitectos Técnicos.
- Castaño Perea, E. 2012. Trazas renacentistas en dos cúpulas de Vandelvira: Teoría y Praxis. En *Revista de Expresión Gráfica Arquitectónica*. Nº 21, 140–149. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- Chueca Goitia, F. 1995. *Andrés De Vandelvira, Arquitecto*. Jaén: Ed. Riquelme y Vargas.
- Cruz Isidro, F. 2001. *Alonso de Vandelvira (1544–ca. 1626/7) tratadista y arquitecto andaluz*. Sevilla: Universidad de Sevilla. Secretariado de publicaciones.
- Estepa Rubio J. y Estepa Rubio A. 2013. Análisis formal y trazado geométrico de la bóveda vaída en el espacio sacro del arquitecto Andrés de Vandelvira. *International Workshop Architecture, Education and Society. International Seminar Architectonics Network (6º:2013: Barcelona)*. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña.
- Estepa Rubio A. y Estepa Rubio J. 2016. El método de los gajos como sistema de control en el trazado y la construcción de las cubriciones abovedadas vandelvirianas. En *Revista de Expresión Gráfica Arquitectónica*. Nº 27, 232–241. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- Galera Andreu, P. 2000. *Andrés De Vandelvira*. Tres Cantos (Madrid): Ed. Akal.
- Izquierdo Asensi, F. 2000. *Geometría Descriptiva (24º Edición)*. Madrid: Ed. Paraninfo.
- Natividad Vivó, P. 2012. Las pechinas de las bóvedas baídas en el manuscrito de Alonso de Vandelvira. *XI Congreso Internacional de Expresión Gráfica Aplicada a la*

- Edificación (11º:2012: Valencia). Investigación gráfica*, 321–328. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- Natividad Vivó, P. y Calvo López, J. 2012. Precisión del trazado de plantillas para pechinas de báidas por hiladas redondas según el manuscrito de Vandelvira. *VI Jornadas de introducción a la investigación* de la UPCT, abril 2013, nº 6, 16–18. Cartagena: Universidad Politécnica de Cartagena.
- Rabasa Díaz, E. 2013. Estereotomía: teoría y práctica, justificación y alarde. En *Informes de la construcción*. Nº 65 (Extra nº 2), 5–20. Madrid: Centro Superior de Investigaciones Científicas.