

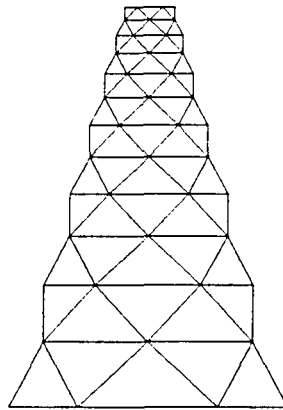
Tesis doctoral

**LOS CUERPOS GEOMÉTRICOS
EN LA
ARQUITECTURA DE GAUDÍ**

*Las chimeneas del Palau Güell.
Construcción y geometría práctica en un ejemplo*

TOMO I

UPC
BIBLIOTECA RECTOR GABRIEL FERRATE
Campus Nord



GUSTAVO J. NOCITO
Departament d'EGA I. ETSAB. UPC. Barcelona
Tesis dirigida por Lluís Villanueva Bartrina

CAPÍTULO IV LA CHIMENEA DEL PALAU GÜELL

EL PALAU GÜELL

Un punto álgido de la construcción geométrica gaudiniana.

Cuenta Ràfols que mientras Gaudí acababa los edificios de entrada de la finca que Eusebi Güell i Bacigalupi poseía en Les Corts, recibió un nuevo encargo de su protector para "alzarle un gran palacio en la calle del Conde del Asalto"¹. En ese momento el arquitecto estaba trabajando además en el proyecto de *El capricho* en Comillas y avanzaba en la construcción de la cripta de la Sagrada Familia. Estamos en el año 1885 y, a pesar de que sólo llevaba unos ocho años de ejercicio profesional, su actividad comenzaba a multiplicarse en distintas direcciones. Después de un período de elaboración y consultas con el propietario, Gaudí acaba unos planos definitivos del Palau en junio de 1886. Finalmente, la solicitud de permiso de obra -firmada por Güell- junto a los planos definitivos son presentados al Ayuntamiento de Barcelona el 12 de julio de 1886 y el 27 de julio del mismo año el Ayuntamiento aprueba en sesión extraordinaria el proyecto².

Según los datos recopilados en las distintas fuentes, las obras pudieron haberse iniciado los últimos meses de 1886³. Sobre la fecha de finalización no existe, sin embargo, un dato preciso, aunque la mayoría de los autores coinciden en situar el final de las obras hacia finales de 1890. No obstante, algunos detalles fueron acabados posteriormente a esa fecha, como por ejemplo los hierros forjados del dormitorio de Eusebi Güell -fechados en 1895- y, probablemente, un par de chimeneas en la terraza que servían para ventilar el hueco del ascensor el hogar de la sala de confianza del segundo piso, una en ladrillos vistos y la otra revestida en *trencadís* de material cerámico⁴.

Los planos de arquitectura presentados al Ayuntamiento, tal como acostumbraba Gaudí, eran los estrictamente necesarios para obtener el permiso de edificación; o sea las

¹ RÀFOLS, José F., *Antonio Gaudí*, Barcelona, Ed. Canosa, 1929, p.48.

² BASSEGODA NONELL, Juan, *El gran Gaudí*, Sabadell, Ed. AUSA, 1989, p.285.
AAVV, *El Palau Güell*, Barcelona, Diputació de Barcelona, 1990, p.27.

³ AAVV, *El Palau Güell*, op. cit., p.27.
TORII, Tukotoshi, *El mundo enigmático de Gaudí*, Valencia, Artes Gráficas Soler, 1983, p.120

⁴ AAVV, *El Palau Güell*, op. cit., p.27.

plantas, las dos fachadas y una sección transversal⁵ (Fig.1).

Estamos en condiciones de suponer que aquí Gaudí sigue un poco ese sistema de trabajo que esbozábamos en el capítulo anterior; un proceso -no exento de cierta experimentación- en que el arquitecto se encuentra implicado de una manera directa en el día a día de la obra. La ausencia de indicios de documentación gráfica de ejecución y el elevado costo de las obras son, en este sentido, argumentos que confirman este supuesto⁶.

La cantidad de colaboradores con que se rodeó Gaudí para construir este edificio era realmente importante e indica en alguna manera la importancia del encargo, ya que se trataba de cuidar al extremo hasta el más mínimo detalle constructivo⁷.

La obra tuvo una favorable repercusión una vez acabada, ya que fue ampliamente difundida a finales de siglo por publicaciones de Barcelona y en algunas revistas especializadas del extranjero⁸. Unos planos conteniendo las plantas del palacio y algunos detalles de arquitectura fueron dibujados posteriormente por ayudantes de Gaudí con el

⁵ BASSEGODA NONELL, Joan, *L'Estudi de Gaudí. Selecció d'articles publicats a la revista Temple entre 1971 i 1994*, Barcelona, Ed. Junta const. del Temp. Exp. de la Sag. Fam., 1996, p.104.

⁶ Es un hecho conocido lo costoso que habrá resultado para Eusebi Güell construir el palacio. Ramon Picó i Campamar, que era su auxiliar administrativo, se desesperaba al comprobar la indiferencia con que el propietario recibía las facturas que elevaban constantemente los presupuestos iniciales de las obras. (AAVV, *El Palau Güell*, op. cit., p.20)

⁷ Los colaboradores más importantes de Gaudí en la construcción del Palau Güell fueron: Francesc Berenguer i Mestres (Arquitecto y diseñador), Camil Oliveras i Gensana (Maestro de obras Y Arquitecto), Joan Torras i Guardiola (Tallers Torras, Ferreria i Construccions), Agustí Massip (Albañil), Hermanos Ventura (Marmolistas), Antoni Oliva (Carpintería y ebanistería), Eudald Puntí (Carpintería y ebanistería), Joan Oñós y sus colaboradores, Josep y Lluís Badia Miarnau y Salvador Gabarró i Torrents (Cerrajería), Francesc Vidal i Jevellí (Acabados y ornamentación interior) y Aleix Clapés i Puig (Pintor). (AAVV, *El Palau Güell*, op. cit., p.223)

⁸ Entre las primeras publicaciones locales acerca del Palau Güell podemos citar:
RUSIÑOL, Santiago y UTRILLO, M., "La Barcelona de 1889: Notas locales", en *Van*, Año IX, nº 1272, 28 diciembre 1889, Suplemento, p.8.
Van, cuatro artículos: "Al lector", "Descripción de la morada del Señor Güell", "Lista", "Palacio Güell en Barcelona. Planeado y construido por Gaudí", Año X, nº 1540, 3 agosto 1890.
I.H.A., "Barcelona: Palacio Güell", Año XII, nº 532, 11 enero 1891.
PUIGGARÍ, Joseph, *Monografía de la Casa Palau Güell*. Centre excursionista de Catalunya, Barcelona, Imprenta i Llibreria de *L'avenç*, 1894.
Entre las publicaciones extranjeras destacan:
L'A., "A Modern House in Barcelona", en *American Architect and Buildings News*, Boston, 9-07-1892, p.27.
Academy Architecture and Architectural Review, VIII, vol.9, Londres, primer semestre de 1896, p.121.

propósito de ser presentados en la exposición gaudiniana de París de 1910 y se difundieron más tarde en la biografía de Bergós (Fig.2). En publicaciones posteriores fueron redibujados los planos del edificio en más de una oportunidad, lo que constituye un aporte inestimable al vacío de documentos gráficos que existía hasta ese momento⁹.

En 1936 el edificio fue confiscado y expoliado, y la entonces propietaria Mercè Güell (hija de Eusebi) se encontraba huída. Después de la guerra, y una vez recuperado el Palau por su propietaria, la Diputació de Barcelona se hace cargo del mismo mediante un convenio de cesión. La Diputació comienza las primeras obras de restauración del edificio en 1945 bajo la dirección del arquitecto provincial Manuel Baldrich i Tibau para alojar las dependencias del Institut del Teatre. En esta restauración se realizan obras de reparación de carpintería, reconstrucción de las vidreras de la tribuna de la fachada principal, pintura e instalaciones. Entre 1971 y 1979 se realiza una segunda restauración dirigida por el arquitecto Jordi Querol i Piera para intervenir básicamente en la fachada y la terraza, ya que se detectan graves problemas estructurales y desperfectos varios. La tercera intervención se produce a partir de 1985 cuando el entonces Servei de Catalogació i Conservació de Monuments -hoy Servei del Patrimoni Arquitectònic- encarga a los arquitectos Buxadé y Margarit un informe acerca del estado de conservación y de la estructura del edificio que evidencia las patologías y el estado general de la construcción¹⁰. A partir de este informe se inicia una nueva etapa de fases de restauración que se continua llevando a cabo en la actualidad¹¹.

⁹ Entre estos dibujos destacan los difundidos por Joan Bergós en su biografía y los realizados por el arquitecto Lluís Bonet Garí.

BERGÓS, Joan, *Gaudí, l'home i l'obra*, Barcelona, Ariel, 1954.

BONET GARÍ, Lluís, "Arquitectura en el Palacio Güell", *San Jorge*, Barcelona, nº15, julio 1954.

¹⁰ Buxadé, C. y Margarit, J., "Dictamen sobre l'estat de solidesa del Palau Güell a Barcelona". *Memòria 1981-1982*, Servei de Catalogació i Conservació de Monuments de la Diputació de Barcelona, Barcelona, 1983.

¹¹ Este proceso de restauración ha servido además para confirmar en alguna medida el peculiar modo de trabajo de Gaudí apuntado en varias ocasiones en esta tesis. En los informes técnicos de los arquitectos destinados a la rehabilitación del Palau Güell se ponen en evidencia los problemas estructurales de base que tiene el edificio. En el informe del arquitecto Jordi Querol, encargado de las obras de restauración iniciadas en 1971, se dice que "En primer lloc, els d'estabilitat, com són les descoincidències axials en diverses columnes, voladissos equilibrats amb carreus de dimensió excessiva, enteixinats de fusta d'aparença purament decorativa que en realitat són autoportants, grans sobrecàrregues de materials diversos per assegurar aïllaments acústics,..."(p.29).

Estos problemas son confirmados posteriormente, en la fase de rehabilitación iniciada en 1985, con el informe de los arquitectos Margarit y Buixadé, en donde se reconocen los problemas de la concepción estructural del edificio. (AAVV, *El Palau Güell*, op. cit., p.40)

Otro estudio acerca de las patologías constructivas en la obra de Gaudí, llevado a cabo a principios de 1980, revela también los inconvenientes que presenta el palacio debido a los innumerables problemas de

Con el Palau Güell estamos en un punto muy especial de la arquitectura de Gaudí. Es el punto en donde el arquitecto comienza a cuestionarse seriamente la concepción tradicional acerca de la idea de *estilo*. Sus biógrafos se encuentran en serios apuros a la hora de definir el estilo en que está proyectada esta obra; para Ràfols la disposición adoptada en el conjunto "hace pensar un poco en ciertos palacios venecianos"¹²; sin embargo Bergós ve en este edificio un estilo de transición que se vale claramente de elementos compositivos del lenguaje gótico¹³.

Lo cierto es que basta una breve recorrida por las distintas zonas del palacio para constatar el fuerte eclecticismo que dominaba en esta obra¹⁴. La ciclópea desnudez de los pilares de ladrillos del sótano nos evoca el arcaísmo propio de las grandes obras antiguas de infraestructura, una sensación que se desvanece rápidamente con las esbeltas arquerías parabólicas de la planta principal en mármol de Garraf delicadamente pulido. La disposición espacial de la sala central de triple altura tiene claras reminiscencias

sobrepresiones, asientos diferenciales y roturas por compresión y flexión debidas al complejo sistema de apeos y brochales que posee su estructura. La descripción que se hace en este estudio de la estructura del Palau Güell no puede ser más elocuente: "La estructura es de tipo mixto: lineal (muros) y adintelada, desarrollándose en forma compleja a través de apeos y brochales para conseguir una secuencia espacial muy fluida.

Es en la planta baja en donde la estructura en vertical queda más rota, posiblemente para mejorar el acceso a la escalera principal, las columnas de la zona del vestíbulo cargan directamente sobre las bóvedas del forjado de planta sótano.

La alternancia de los elementos componentes de la estructura: pilares, muros, arcos parabólicos y lobulados, bóvedas tabicadas, etc., hacen difícil el control funcional de tan complicado "collage". (BELLMUNT, R., MAÑÀ, F., "Aproximación a la patología en la obra de Gaudí", *CAU, Construcción, Arquitectura, Urbanismo*, Col. Of. Aparej. y Arq. Téc., nº70, marzo 1981, p.71)

Esta conclusiones -que desmitifican en alguna medida el Gaudí de *Structure and Form*- ponen en evidencia los mecanismos de un *modus operandi* que privilegia determinados aspectos de la obra arquitectónica en lugar de otros. Gaudí, en su urgente necesidad expresiva para plasmar formalmente sus imágenes espaciales, dejará en un segundo plano la concepción integral de la estructura del palacio.

¹² RÀFOLS, José F., *Antonio Gaudí*, op. cit., p.50.

¹³ BERGÓS, Joan, *Gaudí, l'home i l'obra*, op. cit., p.76.

¹⁴ El palacio tiene seis plantas. En el sótano, Gaudí dispuso las cuerdas para los caballos, a las que se accede desde la planta baja por dos rampas situadas al fondo del solar. Desde esta planta que tiene una doble altura, suben centralmente la escalera de honor y lateralmente una escalera de servicio. La planta principal posee una sala central -auténtica protagonista del espacio interior del palacio- sobre la que se vuelcan tres plantas superiores y que está cubierta con una particular doble cúpula que recibe iluminación desde el exterior. La cúpula interior es una especie de *volta bufada* en forma de paraboloides elíptico de revolución. La cúpula exterior -de forma acusadamente de cónica- es el auténtico nexo espacial entre exterior e interior al hacer las veces de linterna y permitir el paso de la luz natural por medio de una cantidad de aberturas de distintos tamaños y formas.

renacentistas, pero la cúpula que lo ilumina nos recuerda inevitablemente a la arquitectura musulmana. El mismo aire morisco se puede identificar en el trozo de fachada en ladrillos correspondiente a las zonas de servicio que difiere totalmente de las fachadas principales, de un rigor casi racionalista. En el tratamiento de los espacios interiores también se puede experimentar este fuerte eclecticismo, en donde contrastan las complejas *lacerías* y estructuras de los artonados de madera con la simple contundencia geométrica de algunos cielos rasos. Será finalmente en la azotea en donde resultará prácticamente imposible aplicar cualquier referencia estilística al sorprendente paisaje de cúpulas y chimeneas que allí puede verse (Fig.3).

Si, en cambio, examinamos esta obra de Gaudí tomando como punto de partida esta cierta actitud *fragmentaria* que era característica en el modo de trabajo del arquitecto y que comentábamos más arriba, las conclusiones pueden ser bien diferentes.

Desde este punto de vista, el Palau Güell se nos presenta como una especie de ensayo de laboratorio que le sirve a Gaudí para poner a punto una serie de imágenes formales -algunas ya experimentadas en obras anteriores y otras completamente nuevas- mediante el ensayo de los procedimientos constructivos más idóneos para cada caso en particular.

La técnica del *acartelado* en ladrillos que domina enteramente la planta del sótano y la aberturas de la fachada de servicio estará dentro de la línea iniciada en la casa Vicens y la finca Güell y se continuará desarrollando en el colegio de las Teresianas y la cripta de la Colònia Güell.

El delicado modelado de las superficies de transición entre las arquerías parabólicas y las columnas en mármol de la sala principal anticipa claramente el tratamiento plástico de muchas de sus obras posteriores como la casa Milà y en especial el trabajo con superficies alabeadas de las bóvedas de la Colònia Güell y la Sagrada Família.

El tipo de tratamiento y generación formal de los cupulines y las chimeneas de la terraza del palacio tiene, a su vez, un antecedente claro en la casa Vicens y la finca Güell, pero se proyectará con más fuerza aún en las casas Milà y Batlló, encontrando su máxima expresión plástica en las formas del parque Güell.

Es decir, que si analizamos el Palau Güell desde este aspecto estrictamente constructivo, nos encontramos aquí con uno de los puntos más complejos de toda la producción gaudiniana, en donde confluyen un poco modo de experimentación una buena parte de los recursos geométricos y constructivos que el arquitecto empleará en el futuro.

En esta obra se puede constatar un extenso empleo del vocabulario de la técnica del ladrillo -ya adquirida solidamente en obras anteriores-, especialmente en la utilización de los métodos de agregación típicos de los *acartelados* (cocheras en el sótano, ventanas en zonas de servicio, lunetos de la terraza) y en el trabajo con tabicados cerámicos, principalmente en la construcción de bóvedas. En el exquisito trabajo del mármol de

Garraf, en cambio, se puede detectar con facilidad la particularísima y complicada estereotomía de la piedra que desarrollará en muchas obras posteriores como la casa Milà o la Sagrada Família. Simultáneamente, en su cada vez más decidida utilización del revestimiento como un elemento protagonista dentro de lógica geométrico-constructiva del conjunto, Gaudí se preparará para emprender algunas de sus obras más significativas.

Una cuestión esencial se hace necesario subrayar aquí, y es la que tiene que ver con el fuerte control geométrico que gobierna la mayoría de estos procesos constructivos del Palau Güell. Aquí estamos frente a una de las obras en donde Gaudí quizá investigue más a fondo las posibilidades que le brinda la geometría, tanto para la configuración exterior de formas como para la aplicación de procedimientos geométricos dentro del propio sistema constructivo.

Este rigor geométrico se hace evidente en algunas de las operaciones comentadas más arriba. Basta para ello observar la cantidad de variaciones formales que se pueden obtener con el simple recurso de la técnica de los *acartelados* en ladrillos, todas estas reguladas por una geometría orientada generalmente por las formas equilibradas estáticamente. De igual manera, la complejidad de las superficies alabeadas utilizadas como *superficies de acuerdo* entre los capiteles y los arcos parabólicos de mármol denotan un afinado estudio de la generación geométrica de cada una de ellas¹⁵ (Fig.4).

El gobierno de la geometría resulta aún más patente en la cúpula interior de la sala central. Aquí todo parece responder a un preciso ordenamiento que equilibra admirablemente las relaciones entre el espacio interno y el espacio externo de la terraza. La cúpula de perfil parabólico, las cuatro bóvedas que la sostienen y la cúpula cónica exterior forman un sistema perfectamente equilibrado estática y constructivamente, en cuya descripción no nos detendremos aquí para no desviar el objetivo de nuestro trabajo¹⁶ (Fig.5).

Sin embargo, en la cúpula interior nos llama especialmente la atención la disposición de las piezas de revestimiento y la manera en que estas se adaptan a la geometría de la superficie de este paraboloides elíptico. Como puede observarse, las piezas hexagonales que cubren la entera superficie del intradós de la bóveda van disminuyendo progresivamente sus dimensiones en cada hilada horizontal a medida que ascienden hacia la clave de la misma. Este fenómeno de reducción anular, que se verifica siempre que se

¹⁵ El tratamiento geométrico de estas arcadas -que significa el primer paso de Gaudí en su avance hacia la buscada eliminación de la distinción entre *sustentante* y *sustentado*- fue en alguna medida sugerido por los dibujos de Bergós pero explicitado posteriormente por Pane en su biografía. (PANE, Roberto, *Antoni Gaudí*, Milano, Edizioni di Comunità, 1964, p.115)

¹⁶ Una descripción detallada del sistema constructivo y mecánico de las cúpulas puede verse en AAVV, *El Palau Güell*, op. cit., p.105.

quiera revestir interior o exteriormente una superficie curva con unidades poligonales, requiere necesariamente de un procedimiento geométrico o matemático adecuado para dimensionar las unidades correspondientes a cada anillo horizontal.

El método concreto que Gaudí pudo haber aplicado para determinar los valores de esta reducción es un tema que no tocaremos aquí pero, a la luz de lo expuesto hasta este momento, parece bastante sensato pensar que estas proporciones pudieron ser fácilmente obtenidas por algún sistema ligado a un trazado geométrico practicado directamente en el propio proceso de obra. Es decir, un procedimiento que involucre la noción de *geometría práctica* definida en el capítulo anterior.

Podríamos intentar una aproximación al método empleado por Gaudí sin temor a estar demasiado lejos. En efecto, si tenemos en cuenta que esta bóveda está levantada en *hojas* de tabicados cerámicos, es evidente que para su construcción se ha debido utilizar algún procedimiento que involucre su propia generatriz parabólica, sea bajo la forma de una cercha móvil o mediante cualquier otro elemento sujeto a rotación, capaz de ir configurando en cada anillo de revolución el perfil generatriz¹⁷.

Teniendo en cuenta la sencillez y efectividad de un proceso como el que acabamos de describir, también resulta lógico pensar que Gaudí haya aprovechado sus principios geométricos para definir el dimensionado de las piezas de revestimiento. Le bastaría con determinar previamente la dimensión, proporción y número total de las unidades que compone el primer anillo circular. Trabajando en una franja definida por el trazado de unas pocas generatrices parabólicas sobre la propia superficie interior de la cúpula podrá entonces ir determinando gráficamente -y en verdadera magnitud- las reducciones progresivas que experimenta la figura inicial trazando las directrices circulares que fuesen necesarias. Manteniéndose constante el número de piezas que componen cada circunvalación, las variaciones dimensionales afectarán las medidas en ancho y alto de cada pieza de manera de mantener la misma relación proporcional.

Es evidente que un sistema de este tipo puede adoptar una cantidad de variaciones prácticas que ahora no viene al caso investigar. El objetivo principal de nuestra búsqueda

¹⁷ Habíamos visto en el capítulo III que los procesos geométricos de generación por revolución eran los más utilizados para la construcción de cúpulas. En las cúpulas tabicadas se tiende normalmente a emplear un perfil de la curva generatriz como guía del proceso. Este perfil puede estar materializado en una cercha, generalmente fabricada en madera, que se va rotando alrededor del eje de la cúpula a medida que se van agregando los ladrillos que conforman cada uno de los anillos de radio decreciente.

A partir del mismo principio existe otro método aún más sencillo, que parte de un trazado previo del perfil generatriz al tamaño natural o una escala conocida y que se tiene a mano durante el proceso de la obra. Para construir la cúpula bastará con disponer un elemento capaz de materializar una recta, como una regla delgada o una cuerda tensa. Si se fija este elemento al centro de la curva directriz de arranque y se lo hace rotar horizontalmente describiendo cada una de las hiladas con la dimensión correspondiente recabada de este trazado base, se generará una cúpula de revolución que tiene por sección generatriz la curva definida previamente.

no consiste en el descubrimiento del método constructivo empleado por Gaudí sino en la definición del principio geométrico que lo sustenta.

Veremos inmediatamente como esta manera particular de integrar los elementos del revestimiento a las propias leyes geométricas que rigen la generación de la forma será una de las características más acusadas en el tratamiento de las chimeneas de la azotea.

Las chimeneas de la terraza.

Con una superficie total de aproximadamente unos 480m² -que viene a ser la planta total del edificio- la terraza del palacio tiene cuatro niveles. El de mayor superficie constituye el cuerpo básico del palacio en donde se sitúan catorce de las veinte chimeneas existentes. El segundo nivel en importancia es el que está situado sobre el cuerpo anexo a la fachada del mediodía y contiene las seis chimeneas restantes, construídas en fábrica de ladrillo a la vista. Existe el tercer nivel de la caja de escalera y un cuarto accesible sólo desde el interior de la linterna a través de una pasarela y que está situado sobre la caja del órgano (Fig.3).

Respecto al número total de chimeneas existentes en el palacio, se hace necesario hacer una advertencia, ya que casi toda la bibliografía histórica de esta obra de Gaudí habla de dieciocho chimeneas en lugar de las veinte actuales. El motivo de dicha confusión se origina en una de los primeros escritos de la época sobre el Palau Güell, en donde se habla de las "divuyt xemeneyas, de capitell cónich, que semblan sobre lo terrat un boscalló de xiprerets"¹⁸. Lo cierto es que en el proyecto inicial de Gaudí había efectivamente dieciocho chimeneas, a las que fueron agregadas pocos años después de acabadas las obras las dos restantes. Como suele pasar en estos casos, los tratadistas posteriores repitieron la cifra sin verificarla.

En la última fase de rehabilitación del edificio emprendida por la Diputació de Barcelona fueron restauradas las veinte chimeneas y el resto de los componentes arquitectónicos de la terraza. A raíz de esta restauración fueron numeradas y catalogadas la totalidad de las chimeneas y se realizó un levantamiento gráfico convencional de cada una de ellas que posteriormente fue publicado en un volumen dedicado al Palau Güell¹⁹. Será ésta, pues, la catalogación que adoptaremos como documentación inicial, tanto para el proceso de toma fotogramétrica como para el posterior estudio comparativo de las distintas unidades (Fig.6).

¹⁸ PUIGGARÍ, Joseph, *Monografía de la Casa Palau Güell*, Centre excursionista de Catalunya, Barcelona, Imprenta i Llibreria de L'avenç, 1894, p.8.

¹⁹ AAVV, *El Palau Güell*, op. cit., p.97.

Un primer intento de clasificación del conjunto pasará inevitablemente por asociar determinados grupos según las características constructivas comunes, una clasificación que tomaremos como punto de partida provisional, ya que más adelante será efectuada una reagrupación de las chimeneas según otros parámetros en relación con los objetivos de la tesis.

En principio podemos dividir a las veinte chimeneas en dos grandes grupos: las chimeneas de obra vista de ladrillos y las que presentan algún tipo de revestimiento. Las chimeneas de obra vista son seis en total y se encuentran agrupadas en la zona de terraza más elevada que corresponde al área de servicios del palacio. Cinco de ellas (las números 16, 17, 18-19 y 20) están construidas con *aparellat per llarg* en todos los elementos; en la restante (la 12, una de las no previstas en el plano original) la base y el tronco son de *aparell d'través* y el sombrero de *per llarg*.

En cuanto a las chimeneas revestidas, las bases y los troncos de once de ellas están hechos con fábrica de ladrillo macizo *aparellat per llarg* y el sombrero es de *rajola borda doblada*. Las tres restantes están construidas en *fàbrica de totxo massís de solera*, a excepción de los sombreros que son de dos gruesos de *rajola* común.

Respecto a los revestimientos originales, en cinco de estas chimeneas los tres elementos básicos -base, tronco y sombrero- están revestidos del mismo material: cerámica fragmentada (*trencadís*), mármol blanco fragmentado o fragmentos de *pises* o porcelanas de uso doméstico. En las restantes se alterna la cerámica y el mortero de cal, las bases pueden estar recubiertas con mortero en su totalidad o enmarcadas en las aristas con piezas enteras o fragmentadas de cerámica blanca o polícroma. Los troncos y los sombreros de estas chimeneas pueden estar revestidos en cerámica fragmentada, en vidrio blanco o polícromo fragmentado o en la misma piedra de marés vitrificada que se usó en la linterna.

Conviene puntualizar aquí que para la restauración del conjunto de las chimeneas, el equipo técnico de la Diputació de Barcelona no ha seguido un criterio homogéneo. En una sucinta memoria de los trabajos realizados en el edificio, los autores advierten que para la restauración de las veinte chimeneas se ha aplicado un criterio de *eclecticismo* y *elasticidad*, ya que en algunos casos se ha optado por una reconstrucción totalmente mimética y en otros se ha operado en distintos niveles de intervención²⁰. En todos los casos, sin embargo, se ha respetado la morfología original de las chimeneas y la actuación

²⁰ GONZALEZ, Antoni, CARBÓ, Pau, "La restauración del Palau Güell de Barcelona", separata de la revista *ON/Diseño*, nº156, noviembre 1994.

se ha limitado solamente al revestimiento exterior²¹.

El modelo de estudio.

Cuando uno se encuentra frente al hecho un poco compulsivo de tener que decidir sobre el ejemplo concreto para un estudio determinado siempre actúa en gran medida guiado por una cierta intuición.

Las veinte chimeneas del Palau Güell, teniendo todas ellas unos rasgos generales comunes, se presentan muy diferentes a una observación detenida. Las bases de forma piramidal, los troncos cilíndricos y las envolventes cónicas de los sombreretes son sólo unas simplificaciones geométricas que ocultan una mayor complejidad en su estructuración morfológica. De esta manera, a medida que se va avanzando en un reconocimiento más detallado, se comienzan a descubrir ciertas singularidades que en un primer momento no parecían tan evidentes. Así se comprueba, por ejemplo, que las bases de los sombreretes no son siempre circulares, que algunos sombreretes presentan superficies alabeadas de tipo helicoidal, o que otros responden a una orientación vertical siguiendo las generatrices del cono envolvente. En algunos casos parece dominante una configuración en base a elementos puntuales distribuidos con un orden determinado sobre la superficie y en otros, sin embargo, la forma es modelada de una manera continua. Si a todo esto le agregamos la diversidad en el tratamiento exterior que presentan cada una de las chimeneas, acabamos por encontrarnos con un panorama bastante complicado a la hora de elegir el ejemplo idóneo para la investigación.

Sin embargo, y como generalmente ocurre en estos casos, a la tercera o cuarta visita a la terraza del Palau ya tenía claro que el modelo de estudio sería la chimenea

²¹ Las características básicas de la actuación podrían resumirse de la siguiente manera:

En las chimeneas de ladrillo visto se optó en todos los casos por la reconstrucción mimética. En las chimeneas 11 y 13 fue repuesto el material de revestimiento perdido o dañado (piedra de marés y mármol). En los casos en donde se perdió la totalidad del revestimiento cerámico o que estaban inicialmente sin revestir, se siguieron dos procedimientos básicos:

a) en entrepaños y caperuzas desnudas se optó por revestir según criterios que definan una intervención contemporánea;

b) en las chimeneas que tuvieron decoración pero la perdieron con el tiempo se consultó la documentación disponible y se decidió respetar el tipo de material original, confiando el diseño a diferentes artistas plásticos. Un dato de interés recogido aquí nos dice que, según los documentos fotográficos de la época, las cuatro chimeneas de la fachada (1, 2, 3 y 4) estaban revestidas íntegramente y perdieron posteriormente el material cerámico. El actual diseño de estas chimeneas no corresponde al original de Gaudí, ya que fue confiado a diferentes artistas con la condición de preservar la geometría original y utilizar los mismos materiales. (GONZALEZ, A., CARBÓ, P., *op. cit.*, s.p.)

número 13²². Encontraba en ella muchos de los rasgos de las otras que le confería, a mi entender en ese momento, una cierta *representatividad* dentro del grupo.

Esta chimenea es una de las pocas que no han sufrido alteración alguna respecto a su configuración original y que ha sido restaurada con un criterio puramente conservativo²³, lo que le daba a su vez una mayor autenticidad a los planteamientos iniciales de la investigación.

En una primera impresión, la morfología singular del sombrerete superior de esta chimenea presentaba ese impulso ascendente tan característico de las hélices cónicas, pero al mismo tiempo conservaba una cierta estabilidad debido a las figuras de los cuadriláteros ordenados en una relación proporcional. A su vez, cada uno de los cuadriláteros se encontraba enteramente configurado por una superficie alabeada, un fenómeno que le confería una modulación muy particular al conjunto. De esta manera la entera superficie -engañosamente cónica- adquiría una vibración un tanto inquietante que iba cambiando según los puntos de vista adoptados por un hipotético observador que la circundara desde la terraza.

Ante los bocetos iniciales de la chimenea realizados en las primeras visitas a la azotea del Palau Güell se me iba revelando paulatinamente una fuerte impresión de que había escogido el ejemplo adecuado y que su aparente simplicidad escondía una cierta complejidad en su propia estructuración y generación geométrica. Si bien es cierto que existían otras chimeneas más espectaculares en cuanto a la singularidad de las formas de los sombreretes o a las particularidades del tratamiento superficial, seguía pensando -en principio más guiado por la intuición que otra cosa- que esta chimenea, la número 13, ostentaba una cierta autoridad geométrica sobre las restantes que valía la pena investigar.

²² Es importante señalar aquí que existen unas discrepancias respecto a la numeración de las chimeneas en las dos publicaciones de la Diputació de Barcelona editadas durante el último proceso de restauración del edificio y a las que ya nos hemos referido con anterioridad.

En el libro aparecido en 1990 (AAVV, *El Palau Güell*, op. cit. p.98) existe una planta en donde aparecen numeradas las chimeneas comenzando por un extremo de la fachada y siguiendo un movimiento aproximado en el sentido de las agujas del reloj.

Este mismo criterio de ordenamiento fue adoptado en la segunda publicación (GONZALEZ, A.- CARBÓ, P., *La restauración...* op. cit., s.p.) pero es alterado el criterio de numeración a partir de la chimenea número 12, por lo que nuestro ejemplo adopta un número diferente.

Finalmente se ha seguido el criterio de adoptar la clasificación de la primera publicación, por lo que nuestra chimenea de estudio será la número 13.

²³ Esta chimenea, revestida con fragmentos de azulejos policromados (*trencadis*), fue reparada en 1992. Las piezas perdidas o muy deterioradas fueron sustituidas por otras de época o realizadas de acuerdo con el modelo antiguo. Las piezas nuevas fueron fabricadas por I. Mayolas y Taller El Sot. (GONZALEZ, A.- CARBÓ, P., op. cit., s.p.)

Esta primera impresión, guiada básicamente por aspectos perceptuales y un elemental control métrico, se iba confirmando a medida que dibujaba los aspectos más significativos del objeto en estudio.

De entrada sorprende un poco la dimensión total de la chimenea -cuya altura se mantiene bastante constante respecto al resto de sus compañeras- que aparece con una mayor monumentalidad de la que podría predecirse en una visión del conjunto dentro del contexto del edificio. Así, la base del sombrero se encuentra por encima de la altura humana (unos 2,40m), dimensión que -aparte de solucionar un problema técnico con una altura de ventilación adecuada- permite una observación casi frontal del conjunto a una distancia de unos pocos metros. Podríamos describir los componentes de la estructura morfológica de la chimenea en tres cuerpos geométricos básicos: una *base* levemente piramidal, un *tronco* cilíndrico de directriz circular y un remate o *sombrero* de forma aproximadamente cónica. Esta configuración se mantendrá más o menos constante para el resto de las chimeneas de la terraza, con algunas variaciones que no alteran demasiado la unidad esquemática del grupo²⁴ (Fig.7).

Un cuarto componente -presente en las veinte chimeneas de la terraza- son las ménsulas de soporte de los sombreros. Estos elementos, que podríamos denominar *secundarios* ya que no afectan a la volumetría global de la chimenea, son sin embargo importantes -aparte de su lógica función estructural- como complemento morfológico y visual del conjunto. En todos los casos estos soportes de los sombreros se resuelven constructivamente por medio de ménsulas *acarteladas*, como ya era costumbre en Gaudí. El escalonamiento producido por el deslizamiento en cada hilada de ladrillos queda directamente expresado en la forma de estas cartelas aún en el caso de las chimeneas revestidas. Nuestro ejemplo posee seis de estas unidades de apoyo distribuidas radialmente alrededor de la base del sombrero y cada uno de ellos se resuelve por medio de cuatro escalones regulares (Fig.8).

La base presenta la forma de una pirámide muy esbelta de base cuadrada, de aproximadamente un metro de lado, que se macla con el cilindro circular del tronco. La intersección de los cuatro planos inclinados de la pirámide con el cilindro generan por

²⁴ En las chimeneas de la fachada (números 1,2,3 y 4) la base piramidal queda reducida a su mínima expresión al estar apoyadas en los remates escalonados que forman parte de la composición general de la propia fachada. En algunos casos estas bases están parcialmente incompletas debido a su proximidad con una pared lateral (números 5 y 6), se entregan al pavimento con una forma prismática (número 11), sus caras dejan de ser planas (número 9) o adoptan una forma cónica que acaba en un cilindro (número 12).

En cuanto a los elementos intermedios, la forma dominante es la del cilindro, salvo en los casos de los números 6 y 7 de las chimeneas revestidas y todas las de obra vista -excepto la número 12- en donde este *tronco* adopta la forma de un prisma de base cuadrada.

En todos los sombreros podría trazarse una envolvente cónica, sin embargo sus morfologías individuales resultan claramente singulares, tal y como tendremos oportunidad de analizar en el capítulo VIII.

intersección unas elipses visualizadas sólo parcialmente sobre la superficie común de ambos cuerpos (Fig.9). Estas elipses, al estar definidas por la sección de un plano que presenta una pendiente muy pronunciada respecto al plano base, presentan unos ejes muy diferenciados que definen una cónica de forma extremadamente esbelta. Debido a la intersección de los planos contiguos de la pirámide estas elipses no llegan a cerrarse, dibujando una porción muy limitada de su trazado.

El cuerpo del cilindro que hace de nexo de unión con el sombrero tiene un diámetro aproximado de unos 50 centímetros y lleva empotradas las seis ménsulas descritas anteriormente. Su dimensión desde el inicio de la elipse hasta la base del sombrero no llega a un metro de largo, penetrando unos centímetros en la base de dicho remate.

El punto más interesante de este primer estudio de la morfología de la chimenea vendrá, sin embargo, al efectuar el primer reconocimiento gráfico del sombrero superior.

Este elemento de remate tiene como hemos dicho una forma asimilable a un cono truncado, cuya base mide unos 95 cm de diámetro y su orificio superior no excede de los 25 cm de diámetro. La altura total del cuerpo es de aproximadamente 1,50 metros, según una primera medición a cinta.

Observando con detenimiento, lo que en principio parecía una forma decididamente cónica se ve afectada en cambio por un facetado en la zona inferior que define una configuración hexagonal en la base del sombrero. De esta manera, las ménsulas están distribuidas regularmente coincidiendo una a una con los vértices de este hexágono. De cada uno de estos vértices saldrán, en direcciones opuestas, dos hélices que se enrollan alrededor de la completa superficie del cuerpo. Estas hélices definen en su entrecruzamiento unas figuras regulares que van reduciendo progresivamente su tamaño hasta alcanzar el extremo superior del sombrero (Fig.9).

Observando más detenidamente estas figuras podemos comprobar que sus lados son en realidad aproximaciones a líneas rectas, de lo que se deduce inmediatamente que:

- a) estas hélices están formadas por una sucesión de tramos rectos cuyas dimensiones van disminuyendo a medida que ascienden por el cuerpo;
- b) las figuras que describen serán cuadriláteros en tanto que sus lados están formados por rectas.

La materialización de estas poligonales en forma de hélice se evidencia con la junta de mortero que separa unos milímetros los cuadriláteros entre sí y ordena la distribución del revestimiento de *trencadís*.

Repartidos regularmente por todo el cuerpo del sombrero se pueden ver unos pequeños orificios de ventilación que, ubicados en el centro de los cuadriláteros, se ordenan alternativamente a razón de tres unidades por cada anillo de figuras.

Gran parte de la particularidad de esta chimenea reside, sin duda, en el suave modelado de las superficies encerradas en cada uno de los cuadriláteros del sombrero.

Este efecto se puede percibir con claridad si uno se desplaza lentamente alrededor de la chimenea cambiando gradualmente el punto de vista. El contorno del objeto va descubriendo así una especial vibración que le otorga una cualidad dinámica de extraordinaria riqueza.

Si exceptuamos los seis triángulos de la base y las últimas tres hileras de la cúspide²⁵, el resto de los cuadriláteros se encuentra cubierto por una superficie alabeada que está contenida dentro de los límites definidos por las rectas que los componen. El facetado que presenta la primera hilera de triángulos está formado por superficies totalmente planas, al igual que la última hilera de la cúspide. A medida que vamos ascendiendo por cada una de las filas de cuadriláteros decrecientes inscritas en las generatrices de la envolvente cónica del sombrero, las superficies alabeadas tienden a acentuar los triángulos superior e inferior que definen cada uno de los cuadriláteros hasta transformarlos en dos planos intersectados en una línea recta²⁶.

El pasaje gradual por los distintos contornos puede condensarse en dos posiciones que representan los estadios inicial y final de este movimiento y que se repiten consecutivamente (Fig.10). En una de estas posiciones tenemos de frente tres de los seis triángulos de la base (uno exactamente frontal y los otros dos en escorzo) y se pueden percibir los contornos de una fila de cuadriláteros que arranca desde la propia base y que definen una sucesión de curvas muy suaves que representan la sección de las superficies alabeadas de cada uno de ellos. En la otra posición, en cambio, sólo vemos dos triángulos de frente y podemos percibir el plano de canto que define el triángulo contiguo en el contorno. De esta manera, las secciones curvas de las superficies alabeadas recién comienzan a definirse a partir de la segunda hilera de cuadriláteros.

Como se ha dicho al principio, la chimenea se encuentra íntegramente revestida con trozos de azulejos. En el *trencadís* que cubre el sombrero se puede observar un predominio de los colores claros con la inclusión de una buena cantidad de piezas blancas sin decorado. El tronco y la base presentan, en cambio, una cierta tendencia a acentuar los colores azules con piezas algo más grandes que en la parte superior. La entrega con el pavimento de la terraza se soluciona mediante una cenefa que hace las veces de zócalo y

²⁵ Convencionalmente adoptaremos la denominación de *hileras* para designar el conjunto de cuadriláteros semejantes que componen cada anillo horizontal y llamaremos *filas* o *series* a los grupos de cuadriláteros decrecientes alineados sobre las generatrices de la envolvente cónica.

²⁶ Es evidente que este proceso de transformación, que reduce las superficies alabeadas de los cuadriláteros a dos planos a medida que estos reducen su tamaño, está vinculado de manera directa con un problema de ejecución. Es necesario tener en cuenta que al trabajar con piezas planas de revestimiento como estos fragmentos de azulejos, las posibilidades técnicas para modelar las superficies alabeadas de los cuadriláteros decrecen a medida que éstos reducen su tamaño. Llegado a un punto, se impone la simplificación de la superficie en dos planos con una arista común.

que está formada por piezas rectangulares que tienen la función de regularizar la línea de pendiente de la terraza.

Observando por la parte inferior del cuerpo del sombrerete, se puede constatar la ejecución de una forma cónica mediante un tabicado plano de ladrillos. La ausencia de revoque por el interior nos permite observar que esta cúpula está construída en base a una única hoja de ladrillos y que éstos se encuentran dispuestos con su lado mayor en posición vertical. A medida que los anillos de la cúpula van reduciendo su diámetro se van cortando los ladrillos en trozos más pequeños, de manera tal que posibiliten una adecuada respuesta a la curvatura de la superficie.

De este primer examen es posible deducir las condiciones operativas iniciales de las tomas fotográficas que permitirán la concreción de un modelo fotogramétrico; será ésta la próxima etapa necesaria para una evaluación morfológica precisa y objetiva del conjunto de la chimenea.

PROCESO FOTOGRAMÉTRICO

Objetivos y condiciones técnicas: el proyecto de toma fotográfica.

El proceso fotogramétrico, como todo procedimiento instrumental, requiere del máximo rigor conceptual a la hora de plantear las necesidades reales de la investigación morfológica. Estas necesidades deben sintetizarse en unos objetivos generales que garanticen óptimos resultados con el mínimo esfuerzo técnico y operativo posible.

Para el caso de la programación fotogramétrica de esta chimenea del Palau Güell y antes de pasar a la operativa específica de las fases de toma fotográfica y restitución fotogramétrica, resulta necesario puntualizar la orientación técnica y metodológica a la que se ajustó el proceso de levantamiento de datos para su posterior restitución y representación gráfica²⁷.

En este sentido, y dadas las exigencias planteadas en las hipótesis del Capítulo I de esta tesis, uno de los objetivos fundamentales de este levantamiento fotogramétrico sería

²⁷ La programación de las tareas de toma fotográfica deberá apoyarse necesariamente en el conocimiento de la secuencia lógica de las operaciones de campo y gabinete, poniendo especial atención en los extremos inicial y final del proceso; es decir, por un lado la definición clara del sentido y la finalidad del levantamiento y por el otro el resultado que se pretende conseguir.

En síntesis, es fundamental regular los parámetros técnicos y operativos de la programación en función de la dirección y el contenido que se quiera imprimir al proceso fotogramétrico. De igual manera, el resultado final de los trabajos estará en estrecha relación con los fines perseguidos. En este sentido cabe advertir que, más allá del producto gráfico convencional, el relevamiento fotogramétrico se complementa con dos importantes formas de expresión: la numérica y la fotográfica.

el de posibilitar una *reconstrucción tridimensional completa* de la chimenea. En efecto, la única manera de determinar con suficiente rigor la entera configuración morfológica y los procesos de generación geométrica que rigen la forma exterior del objeto se puede dar sólo a través del análisis de un modelo restituido en su completa definición espacial.

Esta circunstancia nos obligaba a poner especial atención en la etapa de programación de las tomas fotográficas, ya que éramos conscientes de determinadas dificultades operativas respecto a la ubicación física de la chimenea en la terraza. La consideración de tridimensionalidad total del modelo requería, como veremos inmediatamente, la disposición del número de tomas fotográficas necesarias para cubrir la entera superficie de la chimenea, y esta condición tropezaba con ciertos inconvenientes de índole práctico. El hecho de que la chimenea elegida se encontrara situada en una posición no exenta y con uno de sus lados prácticamente alineado con la fachada posterior nos obligaba a replantearnos la estrategia a seguir (Fig.11). El lado orientado al patio interior de la manzana era prácticamente inaccesible fotográficamente debido a la importante distancia a que se encontraban los edificios vecinos. Esta circunstancia exigió alguna concesión a los presupuestos teóricos iniciales.

Por otra parte, este objetivo de completa espacialidad representaba en alguna medida una exigencia importante a los medios fotogramétricos en cuanto a sus posibilidades de restitución tridimensional. Estábamos frente a un caso en donde era necesario reconstruir la entera configuración espacial de la chimenea y no se trataba -como en la mayoría de los casos de fotogrametría arquitectónica- de la simple determinación de profundidades a partir de un plano principal dominante representado por la fachada del edificio.

Desde el punto de vista técnico-operativo podría decirse que estábamos más próximos a los métodos de la fotogrametría de esculturas, o incluso de la cartografía terrestre, que de la fotogrametría arquitectónica convencional. Geométricamente hablando, esto significaba que era indispensable poder recabar a partir del modelo restituido la exacta posición de cada punto de su superficie en relación a sus tres coordenadas cartesianas. Ésta era, pues, la única posibilidad de estudiar determinadas entidades espaciales como las hélices o las superficies alabeadas y la única posibilidad de poder deducir un sistema de generación constructiva basado en el desarrollo tridimensional de una geometría aplicada.

Otra de las ventajas derivadas de esta restitución tridimensional sería la de poder realizar, en un posterior proceso de *edición* en sistema CAD, un despiezo de los componentes básicos del cuerpo de la chimenea para su estudio morfológico y geométrico. Este procedimiento permitiría una descripción del *ensamblaje* constructivo de la chimenea, poniendo en evidencia las características individuales de sus componentes y sus articulaciones con el conjunto.

El segundo objetivo esencial para la programación del levantamiento fotogramétrico de la chimenea está vinculado al grado de precisión métrica que se pretendía conseguir en el momento de la restitución, factor éste también ligado íntimamente con el tipo y las

características de la representación gráfica deseada.

La necesidad de determinar con cierto rigor las oscilaciones dimensionales de los patrones modulares en el sombrerete de la chimenea y los desarrollos de las hélices como poligonales nos obligaba a trabajar con un entorno de cierta precisión que convenía dejar en claro desde el inicio de la programación.

Como sabemos, aparte de las condiciones técnicas derivadas de los equipos de restitución y de las cámaras fotográficas empleadas, uno de los factores que influyen decisivamente en la precisión métrica obtenible de los modelos fotogramétricos es la relación entre la escala de la imagen fotográfica y la escala del dibujo que se pretende restituir gráficamente. Esta relación viene dada, como es natural, por la distancia a que es fotografiado el modelo y los objetivos utilizados en la propia cámara fotográfica.

La chimenea elegida, al encontrarse en la situación descrita anteriormente presentaba uno de sus lados prácticamente inaccesible, pero permitía sin embargo una aceptable relación de distancias en el ámbito de la propia terraza del edificio. Considerando la propia chimenea como centro, era posible retirarse hasta un radio de más de tres metros y girar alrededor de la chimenea sin encontrar obstáculo alguno (Fig.12, Fig.13). Esta era una distancia que, de acuerdo con unos primeros cálculos aproximados, se presentaba como bastante aceptable para cubrir con un único fotograma la entera chimenea utilizando un objetivo fotográfico de focal media o gran angular, por lo que supuestamente no encontraríamos problemas para la programación de estas tomas.

El punto más importante, sin embargo, era el de determinar la escala de imagen que necesitábamos para satisfacer unas determinadas condiciones de precisión.

Dadas las características del objeto, los objetivos concretos respecto al análisis geométrico de su superficie y la particularidad de los elementos de revestimiento, nos imponíamos desde un principio la necesidad de trabajar con escalas de dibujo no inferiores de 1:10 para el conjunto de la chimenea y 1:5 para determinados particulares de interés, como el sombrerete de remate²⁸.

²⁸ Este es un tema que por lo general es enfocado de manera distinta por los arquitectos y los topógrafos o los ingenieros especialistas en fotogrametría. Nuestra profesión, más vinculada a la imagen gráfica como medio de control geométrico de la forma, tiende por lo general a establecer los parámetros de precisión en base a la escala de dibujo con la que se pretende trabajar. De esta manera, a unos contenidos gráficos determinados para cada escala gráfica le corresponderán unas condiciones de precisión específicas. Estas condiciones vienen influenciadas a su vez, entre otros factores, por la cantidad de información que es capaz de condensarse en un registro gráfico concreto sin comprometer la claridad expresiva del dibujo y por las posibilidades de recabar determinados datos métricos del propio material gráfico. En este sentido también resulta importante evaluar en cada caso los espesores de líneas utilizados, tratamientos de texturas, etc. Los valores que maneja el topógrafo son, sin embargo, referidos casi siempre a datos numéricos que representan tolerancias y márgenes de error y que son traducidos finalmente en una relación proporcional entre dimensiones lineales.

El compromiso del arquitecto está entonces en relacionar esta precisión métrica con una determinada escala

El trabajar con estas escalas significaba, por otra parte, un compromiso entre el rigor gráfico necesario para la descripción de cada uno de los elementos de revestimiento que definen la superficie de la chimenea y la caracterización general de la morfología y el ensamblaje de los cuerpos que la componen.

De este primer enfoque global del proyecto fotogramétrico surge necesariamente una prefiguración de los resultados gráficos que se desean alcanzar. Es así como para este caso de la chimenea, se comienza inversamente por descartar determinadas modalidades gráficas que no tendrían sentido alguno en relación con los objetivos fijados al comienzo del trabajo. Este proceso de selección, aunque parezca obvio, resulta sumamente importante para la orientación definitiva de los trabajos fotogramétricos.

La representación por planos acotados (utilizada con considerable éxito en otras obras de Gaudí, como en el propio ejemplo de las bóvedas de la cripta de la Colonia Güell que puede verse en el *Apéndice D* de esta tesis) no parecía ser una descripción gráfica adecuada para el análisis geométrico que pretendíamos llevar a cabo en este ejemplo. La nítida delimitación espacial definida por las líneas de juntas de los cuadriláteros alabeados así como las características del material de revestimiento que cubre por completo la chimenea estaban sugiriendo, por el contrario, un tratamiento gráfico apoyado en la definición material de cada una de las piezas del *trencadís* cerámico. Estos elementos, definidos como planos individuales, irían de este modo configurando por contigüidad la entera volumetría del cuerpo y definirían con absoluto rigor la superficie de la chimenea. De este modo, a partir de estas consideraciones iniciales, es posible conciliar nuestro objetivo inicial de tridimensionalidad con un adecuado rigor métrico que permita una descripción fehaciente del objeto de estudio.

Una vez definidas estos *objetivos iniciales* de trabajo se produce la primera reunión con el equipo técnico encargado de llevar adelante las operaciones de toma y restitución fotogramétrica, con el fin de cambiar opiniones y precisar las condiciones operativas del proceso²⁹. En esta reunión se tuvo que dar respuesta a una serie de condiciones técnicas

gráfica de trabajo. Una excesiva desproporción entre estos parámetros se traduce en un gasto innecesario o en un dibujo confuso desde el punto de vista técnico y expresivo.

²⁹ El equipo técnico encargado de las operaciones de toma fotográfica y levantamiento topográfico de la chimenea del Palau Güell estaba integrado por:

-Yolanda Sàez Duch y Jordi Calmet Bayond, alumnos del último curso de Ingeniería Técnica Topográfica de la Escola Universitària Politècnica de Barcelona, cuyo T.F.C. *Comparatiu de diversos mètodes topogràfics i fotogramètrics aplicats a aixecaments arquitectònics* a servido como documentación técnica de base para desarrollar esta tesis doctoral.

-Felipe Buil Pozuelo, Ingeniero Técnico Topógrafo, profesor de la Escola Universitària Politècnica de Barcelona.

-Andrés de Mesa Gisbert, arquitecto, profesor de la Escola Tècnica Superior d'Arquitectura de Barcelona.

-Xavier Moliner, alumno y becario de la Escola Tècnica Superior d'Arquitectura de Barcelona.

específicas que considero oportuno comentar brevemente aquí debido a su importancia dentro del propio proceso fotogramétrico. Estas condiciones podrían resumirse de la siguiente manera:

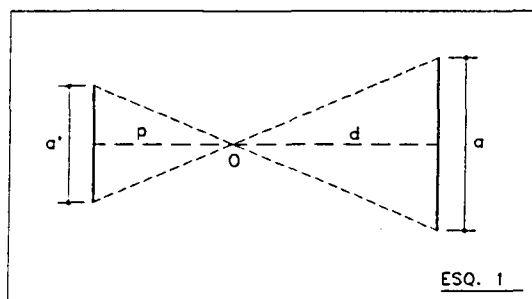
a) La definición *a priori* de las escalas gráficas a conseguir -que ya vimos oscilaban entre valores correspondientes entre 1:10 y 1:5- y la disponibilidad de ópticas fotográficas de 40mm y 80mm, permite en primer lugar una aproximación a la determinación de la distancia necesaria para fotografiar el objeto. En nuestro caso particular -contando con un objetivo de 40mm en formato 6x6, que tiene un ángulo de campo de $88^{\circ}/69^{\circ}$ ³⁰- pudimos comprobar rápidamente con un simple esquema que a una distancia aproximada de 3m era posible abarcar la totalidad de la chimenea, por lo que podíamos trabajar en el espacio de la terraza con una cierta comodidad (Fig.13). De igual manera, si deseábamos una aproximación al elemento de remate o *sombrerete* podíamos abarcarlo con el objetivo de 80mm a una distancia similar a la anterior con el único recurso de elevar la altura de la cámara fotográfica con el propósito de mantener el eje óptico más o menos perpendicular a un supuesto *plano de referencia* que determinaríamos posteriormente con mayor exactitud (Fig. 14).

En estas condiciones de trabajo podíamos deducir unas escalas aproximadas en los fotogramas (las llamadas *escalas de la imagen*) que oscilarían entre 1:70 y 1:40 para el caso de utilizar el objetivo de 40mm y el de 80mm respectivamente, por lo que nos situábamos dentro de unas relaciones aproximadas a 1/7 y 1/8, lo que nos permitía movernos dentro de unos márgenes suficientemente generosos para conseguir las escalas gráficas deseadas durante el proceso de restitución³¹.

-El autor de esta tesis doctoral.

³⁰ Para una información detallada acerca de los equipos y el material técnico utilizado en el proceso fotogramétrico consultar el *Apéndice B*: "Proceso Fotogramétrico. Datos técnicos".

³¹ En el caso de que el eje óptico de la cámara fotográfica esté dispuesto más o menos perpendicularmente a un determinado plano de referencia del objeto, podríamos convenir que la escala será aproximadamente la misma para toda la imagen fotográfica (Esq.1).



Es decir, que a partir de esta primera condición específica que vincula ángulos de campo, escalas gráficas y distancia al objeto, estábamos en condiciones de elaborar los esquemas iniciales de nuestro proyecto de toma fotográfica y poder determinar de esta manera el número de tomas necesarias y demás condiciones operativas con el objeto de reducir al máximo posible el tiempo de trabajo en el edificio³².

b) A la hora de realizar los esquemas en planta para ubicar la disposición de las tomas surge otra de las condiciones técnicas específicas y es la que determina la llamada *relación de base* y el recubrimiento longitudinal³³.

En nuestro ejemplo concreto, al no estar vinculada directamente la distancia de la base a una sucesión encadenada de tomas -como sería en el caso de una fachada plana- y

Bajo estas condiciones, si a' es la imagen de un objeto a , d la distancia desde el centro de perspectiva del objetivo a dicho objeto y p la distancia principal, se tiene que el *factor de escala* m resulta igual a :

$$m = d/p = a/a'$$

la *escala M* será por tanto:

$$M = 1/m = p/d = a'/a$$

De esta manera, la escala de la imagen puede ser calculada entonces conociendo la distancia desde el plano de la película al objeto y la distancia principal de la cámara fotográfica.

Resta ahora saber cuál es la relación idónea entre esta escala de la imagen fotográfica y la escala gráfica para que se pueda trabajar con un cierto rigor gráfico durante la fase de restitución.

Se suele afirmar que la relación entre la escala del dibujo y la escala de la imagen no debería sobrepasar la proporción de 1/8, no obstante la experiencia demuestra que con valores próximos a la relación 1/10 es posible un resultado gráfico óptimo si se trabaja con películas de grano fino y aberturas de diafragma suficientemente cerradas. (Sobre este tema ver, CIPA, *La optimización de los levantamientos fotogramétricos de arquitectura*, UNESCO, 1981, p.61; IPPOLITO, Lmberto, "Problemi di ottimizzazione grafica nella restituzione fotogrammetrica dei monumenti", *Bolletino degli Ingegneri*, nº1, Firenze, gennaio 1981; CUNDARI, Cesare, *Fotogrammetria Architettonica*, Roma, Edizioni Kappa, 1983, p.47; NOCITO, Gustavo, *Toma fotogramétrica del arco Gaudí-Les Cortes*, Doctorado, Barcelona, julio 1990, p.10.)

³² Ésta es una condición indispensable para cualquier trabajo de campo en fotogrametría debido a un problema de costos. En nuestro caso en particular el problema del tiempo se tornaba más crucial, habida cuenta que por las fechas en que realizamos las tomas fotográficas, el Palau Güell se encontraba cerrado al público por obras y su acceso era muy restringido, por lo que tuvimos que pedir un permiso especial a la Diputació de Barcelona para poder acceder al mismo.

³³ La relación entre la distancia que separa a dos estaciones sucesivas de la cámara fotogramétrica y la distancia al objeto se denomina *relación de base*. El *recubrimiento longitudinal*, en cambio, está referido a la magnitud X de superposición de ambos fotogramas y se expresa en porcentaje sobre la medida del largo total de una fotografía. El *recubrimiento transversal* será del 100% siempre que los puntos de toma se encuentren a una misma altura.

dado el objetivo inicial de estricto rigor tridimensional del objeto, parecía lógico trabajar con bases cercanas a los valores óptimos de visualización durante el proceso de restitución. De esta manera, fueron adoptadas unas distancias entre estaciones que estaban alrededor de los 50cm, lo que permitía unas relaciones de base cercanas a la proporción 1/6 y nos ofrecía la posibilidad de una tridimensionalidad bastante acentuada dentro de unas condiciones operativas aceptables³⁴.

En todos los casos fueron ensayados recubrimientos longitudinales mayores del 90%.

c) Finalmente, se debía considerar el aporte indispensable del apoyo topográfico para establecer los puntos de control sobre la propia chimenea y los correspondientes vértices de estación que posibilitasen la visualización de dichos puntos³⁵.

³⁴ Es evidente que a medida que se reduce la distancia de la base aumenta proporcionalmente el recubrimiento longitudinal, pero también es cierto que la precisión de la restitución aumenta al aumentar la base debido a un mayor efecto tridimensional. Este beneficio, sin embargo, se encuentra limitado por los problemas que puede producir en el operador el trabajar con bases muy grandes. En efecto, está demostrado que durante el trabajo de restitución una excesiva exaltación de la tridimensionalidad del modelo produce inconvenientes fisiológicos en el operador, lo que le obliga a interrumpir con frecuencia el trabajo por problemas derivados de una cierta fatiga visual.

Sin embargo, no son únicamente éstas las exigencias que han de considerarse para la determinación de una relación de base adecuada, ya que comúnmente deben conciliarse simultáneamente otras condiciones tales como la escala de la imagen, las necesidades operativas, las dificultades de campo, etc. En este sentido resulta muy difícil hablar de un número óptimo de relación de base y que sea aplicable a cualquier caso. Los expertos en el tema se limitan, por lo general, a fijar un cierto entorno de trabajo deseable que oscila entre valores que van de la relación 1/5 a 1/15. (CIPA, *La optimización de los levantamientos...*, op. cit., p.62.)

³⁵ La eficacia de la información contenida en los pares fotogramétricos depende fundamentalmente de la correlación de los datos métricos entre el objeto del levantamiento y sus imágenes fotográficas, a fin de permitir su más amplia aplicación. Por tanto, es práctica fundamental en cada levantamiento de este tipo el realizar un cierto número de mediciones topográficas sobre determinados puntos del objeto en cuestión, lo que permitirá posteriormente en fase de gabinete la orientación absoluta del modelo y facilitará las operaciones de restitución gráfica a la escala deseada.

El conocimiento de las distancias recíprocas entre los distintos puntos de control sobre el objeto es suficiente para reconstruir las dimensiones propias de este objeto pero no dice nada acerca de la posición de este objeto respecto al espacio circundante. Para lograr esto es necesario que las respectivas posiciones de las señales correspondientes a los puntos de control estén determinadas también respecto al espacio exterior según una red o estructura topográfica de referencia. (Sobre este tema ver, TERNRYD, C - LUNDIN, E., *Topografía y fotogrametría en la práctica moderna*, México, Ed. Continental, 1973; DOCCI, M. - MAESTRI, D., *Il rilevamento architettonico. Storia, metodi e disegno*, Roma, Laterza, 1984; CRAMER, Johannes, *Levantamiento topográfico en la construcción*, Barcelona, Gustavo Gili, 1986; NOCITO, Gustavo, *Apoyo topográfico en el relevamiento arquitectónico*, Doctorado, Barcelona, julio 1990.)

En una primera aproximación se convino la determinación de cuatro vértices de estación sobre la propia terraza del edificio alrededor de la chimenea en cuestión, desde donde podrían visualizarse correctamente los distintos puntos de control distribuidos sobre su superficie.

En esta etapa de programación previa se consideró asimismo el inconveniente derivado de la imposibilidad de cubrir la entera superficie de la chimenea, lo que determinó no sólo la ubicación de los vértices y las condiciones operativas de trabajo sino además obligó a la previsión de un número mayor de puntos de control de los que serían necesarios para un levantamiento de estas características. Se programaron entre 10 y 15 puntos de control que serían identificados en la superficie de la chimenea mediante unas señales adhesivas y se realizó una estimación del tiempo necesario para realizar todas las operaciones en una sola jornada de trabajo.

De esta manera, pudieron realizarse los primeros esquemas de trabajo en escala en donde quedaban reflejadas las posiciones tentativas de las estaciones, relaciones de base, distancias y la geometría elemental de los ángulos de campo y las superposiciones obtenidas. Quedaba pendiente, sin embargo, la elección del plano de referencia de la chimenea que, dada su especial configuración, sería estudiado directamente al inicio de las tareas de campo.

En principio fueron previstas tres bases de toma (seis estaciones de cámara) para el caso del conjunto de la chimenea (objetivo de 40mm) y dos bases (cuatro estaciones de cámara) para el caso del detalle del sombrero superior (objetivo de 80mm). En el *Apéndice B*, se pueden ver todos los esquemas realizados en esta etapa del proyecto de toma.

El material gráfico de partida se completaba con un fragmento de la planta de la terraza del edificio en donde estaba situada la chimenea de estudio, un alzado esquemático de la misma a escala aproximada de 1:50 y una buena cantidad de copias de un modelo de ficha fotogramétrica para ser completado durante los trabajos de levantamiento.

Se volvieron a revisar las previsiones acerca del tiempo de duración de las tareas y la utilización del equipo necesario, para poder realizarlas en una única sesión de trabajo debido a los inconvenientes operativos mencionados anteriormente.

Las tomas fotográficas.

Una buena costumbre de los expertos en trabajos de campo de este tipo indica que siempre que sea posible es importante realizar una visita previa a la zona en cuestión poco tiempo antes de que vayan a efectuarse las tareas de levantamiento. Puede verificarse de esta manera si las condiciones originalmente previstas se siguen manteniendo o si, por el contrario, han aparecido nuevos elementos que puedan modificar las primeras

observaciones y obliguen a alguna variación de la estrategia inicial.

En el caso del Palau Güell esta verificación no pudo llevarse a cabo debido a la circunstancia ya comentada y que obligó al cierre temporal del edificio, por lo que tuvimos que conformarnos con las visitas que yo mismo había realizado mucho tiempo atrás, en noviembre de 1995, en la que había tomado algunas fotografías de la chimenea y dibujado los croquis de estudio comentados al inicio de este capítulo.

De la orientación que adoptaba la chimenea en la terraza pudimos deducir que nos encontrábamos en unas condiciones de iluminación natural bastante deficientes, ya que toda el área *fotografiable* del objeto se encontraba en contraluz debido a su orientación dominante del norte. Esta particularidad motivó ciertas discusiones en el grupo acerca de las horas del día más convenientes para realizar las tomas. Finalmente se acordó realizar los trabajos durante las últimas horas de la tarde, tratando de evitar la situación más desfavorable del sol.

En una reunión del equipo de trabajo realizada pocos días antes de la salida de campo fueron ultimados los preparativos y el instrumental necesario. Del cálculo de la duración total de los trabajos surgió, por ejemplo, la necesidad de contar con dos teodolitos en lugar de uno -previsto inicialmente- para acelerar el proceso de medición topográfica, ya que contábamos con un tiempo limitado de permanencia en el edificio. Estos teodolitos eran de marca Wild, del tipo T-2 y de propiedad de la Escola Universitària Politècnica de Barcelona³⁶. Todas las mediciones y comprobaciones mediante estos aparatos fueron realizadas por los estudiantes Yolanda Sàez y Jordi Calmet, dirigidos por el profesor Felipe Buil.

De esta manera se preparó un maletín con todos los elementos auxiliares necesarios: dos cintas métricas de 3 y 20 metros de largo respectivamente, rotuladores especiales para señalar posiciones, una plomada, cuerdas, un nivel de agua, una regla graduada de 2 metros y una buena cantidad de dianas triangulares adhesivas.

Por otra parte, se organizó en una carpeta todo el material gráfico auxiliar de que disponíamos en ese momento. Debidamente organizados se encontraban los esquemas del proyecto de toma con la situación prevista para las estaciones, varias copias de la planta parcial de la terraza y el alzado de la chimenea, las copias de las fichas individuales de toma para rellenar³⁷, los bocetos y las fotografías previas.

³⁶ Estos equipos, de gran robustez y dilatada utilización en el campo topográfico, presentan unas prestaciones que se adaptaban muy bien a nuestras necesidades de precisión métrica. (Para más datos técnicos consultar las especificaciones que recoge el *Apéndice B* de esta tesis)

³⁷ El modelo de *ficha de toma fotogramétrica* contiene todos los datos relativos a las características ambientales, técnicas y operativas de las condiciones bajo las que se efectúa cada una de las estaciones fotográficas, así como las características propias de la cámara y las ópticas utilizadas y del material sensible empleado.

En cuanto al material fotográfico contábamos con una cámara de tipo semi-métrica de marca Rolleiflex 6006, propiedad del Departament EGAI de la Escola Tècnica Superior d'Arquitectura de Barcelona, con un magazin para film formato 120 y un tamaño útil de fotograma de 6x6cm³⁸. Los objetivos de que disponíamos eran los dos ya comentados anteriormente en la fase de proyecto de toma: un granangular de 40mm y otro con un ángulo de campo más reducido correspondiente a una focal de 80mm.

El día escogido para las tareas de levantamiento topográfico y tomas fotográficas fue el 19 de junio de 1996, merced a una autorización expedida por la Diputació de Barcelona para poder acceder a la terraza del Palau Güell. Las condiciones ambientales no podían ser más favorables, ya que el día se había presentado con un cielo nublado claro que suavizaba en gran medida los contrastes lumínicos. Inmediatamente se dispusieron los elementos de trabajo y dieron comienzo las tareas de levantamiento topográfico, que por sus características requerían un tiempo mayor de desarrollo.

La primera operación realizada consistió en la colocación de 15 dianas adhesivas distribuidas por las distintas zonas de la chimenea comprendidas dentro del campo a fotografiar. Estas dianas de color rojo y de forma triangular servían en principio para

A un modelo más o menos *standard* de ficha fotogramétrica hemos añadido en este caso algunos datos adaptados a nuestro instrumental y de interés específico para nuestro trabajo como la codificación de los intervalos de enfoque de la cámara, altura del objetivo, etc. La gran utilidad y valor documental de estas fichas evita todo comentario añadido.

Cada una de estas fichas completadas con todos los datos de las tomas pueden ser consultadas en el Apéndice B.

³⁸ A diferencia de las cámaras métricas, las semi-métricas dejan impresas en cada fotograma una serie de puntos en forma de retícula ortogonal (en este caso particular una *red* de 121 cruces distribuidas regularmente sobre la superficie limitada por el formato de 6cm x 6cm) y las distorsiones del objetivo pueden ser controladas en relación a los datos de calibración que aporta el fabricante en forma de certificados individualizados.

Otra de las diferencias de esta cámara respecto a las cámaras métricas es que en estas últimas la distancia *objetivo-plano de la película* se mantiene inamovible, determinando una distancia mínima de enfoque para mantener constante e invariable la distancia principal. En las cámaras semi-métricas, como en la Rolleiflex 6006, es posible sin embargo variar las distancias de enfoque. Si estas variaciones se mantienen a intervalos conocidos se pueden entonces determinar las distancias principales correspondientes a cada intervalo. En muchas cámaras estas variaciones se consiguen a partir de la adición de unas *anillas de enfoque* situadas entre el objetivo y el chasis. En la Rolleiflex 6006 el problema se resuelve de una manera más práctica con la incorporación de un aro de enfoque solidario al objetivo que posee seis muescas que son las encargadas de fijar los intervalos cuyos datos son previamente tabulados. De esta manera, el fabricante entrega con cada objetivo un cuadro de mediciones en donde es posible calcular la distancia principal según una constante *C* de cada intervalo. En este cuadro figuran además las distancias al objeto con las correspondientes profundidades de campo para cada intervalo en relación con la apertura de diafragma utilizada y otros datos de interés. (Para más datos técnicos consultar las especificaciones de la cámara y los objetivos en el *Apéndice B* de esta tesis)

ubicar correctamente los vértices topográficos desde donde serían visualizadas posteriormente. Cada una de estas señales era registrada a su vez en un croquis en donde era identificada con un código numérico y con una breve descripción escrita que ayudaba a clarificar su situación física (Fig.15).

Una vez colocadas la totalidad de las dianas en la superficie de la chimenea se procedió a situar los vértices desde donde se iba a efectuar la toma de datos de los puntos de control, que a estas alturas ya habíamos asumido en un número total de 15, de modo tal de garantizar una redundancia de datos que aseguraran una mayor precisión durante la restitución. Se establecieron un total de cuatro vértices A, B, C, y D rodeando el objeto, en una disposición tal como puede verse en la Fig.16.

A partir de este momento se inician las observaciones recíprocas con los dos teodolitos al mismo tiempo, tomando visuales a los vértices y a los puntos de control³⁹. Inmediatamente se comienza la medición ordenada de cada uno de los puntos de control estacionando los aparatos en cada vértice y tomando lecturas de ángulo horizontal y vertical.

Simultáneamente al inicio de los trabajos topográficos fueron ultimados los preparativos necesarios para efectuar las tomas fotográficas previstas.

La primera alteración al esquema de tomas definido previamente se produjo con la determinación del plano de referencia de la chimenea, un tema que, como se recordará, había quedado sin definir hasta ese momento. La observación detenida de la situación espacial del objeto en relación a su morfología aconsejaba adoptar como plano de referencia a los únicos tramos de superficie que podían considerarse sensiblemente verticales y, por tanto, paralelos al plano de la película. Estos planos de reducidas dimensiones estaban configurados por los frontales de cada una de las cartelas de sustentación del sombrerete, que se distribuyen regularmente en número de seis unidades alrededor del cuerpo cilíndrico. Como sólo cuatro de estas cartelas quedaban dentro del campo fotografiable, decidimos realizar una base para cada una de ellas y aumentar de este modo el número de tomas previsto inicialmente, pasando de tres a cuatro bases de toma fotográfica.

Con el fin de clarificar la situación de las tomas, adoptamos una numeración para cada una de estas ménsulas, comenzando por la del extremo derecho y avanzando en el mismo orden de las tomas. Tenemos así las cuatro cartelas M1, M2, M3 y M4 representando los planos de referencia de las tomas homólogas y las ménsulas M5 y M6

³⁹ Para poder situar correctamente los puntos de los vértices se efectuaron visuales desde cada uno a los otros visibles. De esta manera se tomaron mediciones angulares (ángulo horizontal y vertical al suelo) y de distancia por medio de una cinta métrica desde el eje de muñones hasta el punto visado. (Para más detalles de los trabajos topográficos ver, SÀEZ, Y. - CALMET, J., T.F.C., *Comparatiu de diversos mètodes topogràfics...*, op. cit., p.28)

que quedaban fuera del campo visual.

Comprobadas estas condiciones iniciales de trabajo, nos dispusimos a realizar la primera tanda de tomas utilizando la focal de 40mm, comenzando por el extremo derecho del cuerpo de la chimenea y rotando según el sentido de las agujas del reloj. La serie de tomas quedaba de este modo reorganizada de la siguiente manera: el número de orden representaba la designación de la base y las letras A y B identifican a cada toma fotográfica. Tenemos así que este grupo de tomas se compone de las posiciones de cámara 1A-1B, 2A-2B, 3A-3B y 4A-4B, cuyos esquemas definitivos pueden ser consultados en el ya citado *Apéndice B*.

La sensibilidad de la película utilizada fue de 100 A para las tomas generales y luego se cambió a 50 A, coincidiendo con el cambio de focal a 80mm para realizar los detalles del sombrerete. En ambos casos fue utilizada película de tipo reversible marca Fujichrome en formato 120. De cada una de las estaciones se realizaron siempre dos tomas complementarias, una a exposición normal (medida con el propio fotómetro de la cámara) y una segunda con un punto de diafragma abierto para producir una leve sobreexposición, ya que las condiciones lumínicas ambientales creaban un tenue efecto de contraluz. Para cada uno de estos pares se mantenía el tiempo de exposición constante.

Para el trazado y ubicación de las bases sobre la superficie de la terraza nos valíamos de mediciones realizadas con cinta métrica y de visados en relación a la pequeña superficie de cada cartela que hacía las veces de plano de referencia del objeto. Si obviábamos las pendientes del pavimento y manteníamos la verticalidad del conjunto cámara-trípode, podíamos considerar que, respecto a este plano de referencia, nos encontrábamos trabajando dentro de los casos llamados *normales*, ya que el eje óptico de la cámara era en todos los casos perpendicular a dicho plano.

Para ubicar correctamente cada estación nos valíamos de una plomada colocada aproximadamente en el centro óptico de la cámara que hacíamos coincidir con el trazado de referencia sobre el pavimento. La nivelación del cuerpo de la cámara se realizaba en todos los casos mediante un nivel de burbuja incorporado al trípode. Las alturas del eje óptico respecto al pavimento resultaban, como es de suponer, variables debido a las pendientes de la azotea. Estas alturas oscilaban entre 1,30m y 1,50m, por lo que esta serie de tomas no ofrecía dificultades de tipo operativo y pudieron ser realizadas sin requerir medios auxiliares⁴⁰.

Cada una de estas tomas fue registrada e identificada debidamente en las ya comentadas *fichas de toma fotogramétrica*, cuyo contenido y características pueden

⁴⁰ Una vez estacionada la cámara eran comprobadas con el fotómetro las condiciones de iluminación y se ajustaba el enfoque de la distancia con el intervalo correspondiente. En ese momento se registraron todos los datos necesarios en la ficha de toma y, una vez verificados los datos de exposición y enfoque, se procedía a realizar la toma por medio de un disparador de cable con el fin de asegurar la total ausencia de vibraciones.

consultarse en el *Apéndice B* de esta tesis.

De igual manera, las configuraciones definitivas de cada una de las bases con sus correspondientes estaciones fueron dibujadas en unos croquis individualizados en donde eran indicadas sus dimensiones en cotas, su ubicación en relación al plano de referencia de la chimenea, largo de la base, identificación de las tomas, etc. Estos croquis también están recogidos en el mencionado *Apéndice*.

El tiempo empleado para realizar esta primera tanda de tomas fotográficas fue de aproximadamente 1h 15'.

Siguiendo una organización operativa similar se procedió a realizar la segunda tanda de tomas fotográficas, esta vez cambiando por el objetivo de 80mm para obtener un detalle del sombrero superior de la chimenea. En este caso sólo fueron necesarias dos bases, orientadas esta vez de manera diferente que las anteriores para obtener información suplementaria.

La base 5A-5B se situó en el eje de simetría formado por las ménsulas M2 y M3, prácticamente coincidente con uno de los lados de la base de la pirámide de la chimenea. Igualmente, en la base 6A-6B se hizo lo propio con el eje formado por las cartelas M1 y M2. En estos casos fue necesario aumentar ligeramente las distancias al objeto, que se establecieron en 4 metros. Consecuentemente, las bases fueron ampliadas a unos 60 cm para mantener las condiciones iniciales.

En estas tomas resultó necesario elevar la altura del objetivo más de 2 metros respecto al plano del suelo -se trataba de abarcar sólo el sombrero superior- por lo que fue necesario emplear una pequeña escalera para llegar al visor de la cámara.

El tiempo empleado para realizar esta segunda serie de fotografías fue de aproximadamente 20 minutos. Todos los datos de estas tomas, registrados en los croquis y en las fichas fotogramétricas correspondientes pueden consultarse igualmente en el ya citado *Apéndice B*.

El trabajo de gabinete.

Una vez llegados los carretes revelados del laboratorio fotográfico se organizó una reunión con todos los integrantes del equipo a fin de evaluar los resultados de las tareas de campo⁴¹. Se pudo comprobar que la exposición de los fotogramas fue la correcta y que no hubo ningún tipo de problema técnico con las imágenes de las tomas.

⁴¹ La primera reunión de gabinete resulta de gran utilidad por cuanto permite verificar -con la operación de toma reciente- todos y cada uno de los datos recogidos en campo, de manera tal de organizarlos para su posterior tratamiento. Es la etapa de ajuste de las alteraciones producidas en el proyecto de toma inicial por exigencias operativas y también la del pasado en limpio de lo que será el proyecto definitivo.

Tras la observación detenida de los fotogramas se separan los de exposición más correcta y se seleccionan aquellos que, a juicio de los encargados de los trabajos posteriores, serían los más idóneos para la restitución gráfica. En este sentido se consideraron suficientes las tomas provenientes de la primera serie de fotografías, aquellas en donde se utilizaba la focal de 40mm para registrar la totalidad del cuerpo de la chimenea. Las tomas de detalle 5A-5B y 6A-6B quedaban, pues, como material de apoyo para consultas durante la etapa de restitución. El total de pares fotogramétricos registrados pueden verse en el ya citado *Apéndice B* del Tomo II de esta tesis.

De estas fotografías se realizó un juego de copias ampliadas en papel para su observación detallada mediante un estereoscopio de mesa⁴², de las que fueron realizadas las primeras aproximaciones al estudio de la morfología general de la chimenea.

Éste era el momento, pues, en donde comenzaban a definirse con claridad los criterios de restitución gráfica del modelo. Ya sabíamos que la descripción gráfica se iba a apoyar en la definición lineal de cada una de las piezas de revestimiento pero ¿con qué criterios se iban a singularizar los distintos componentes morfológicos del modelo? ¿de qué manera se complementaban los datos propios de la restitución con los criterios de expresión gráfica adoptados?

De igual manera, en el proceso de edición posterior quedaban muchos asuntos por resolver, como el tipo de entidad informática generada, el modelo 3D creado, la resolución de las caras de la superficie, etc.

Muchas de estas cuestiones, iniciadas en esta primera reunión posterior a las tomas fotográficas, fueron resolviéndose paulatinamente durante los sucesivos encuentros y a la luz de los primeros resultados obtenidos.

Un capítulo de gran importancia dentro de esta etapa previa de gabinete es, sin duda, el que concierne a la organización de los datos topográficos. La determinación y cálculo de coordenadas a partir de los valores de campo obtenidos mediante los teodolitos es la tarea más importante dentro de este conjunto de operaciones.

Para calcular las coordenadas de los cuatro vértices tomados como red de referencia topográfica se procede primero a asignar unas coordenadas iniciales a uno de los vértices y un valor angular respecto a un vecino para luego, con los datos de campo y mediante

⁴² Esta observación, mucha veces pasada por alto en los trabajos de levantamiento, nos permite una primera aproximación a la realidad tridimensional del objeto y establece un vínculo inmediato con la realidad percibida poco tiempo antes durante el proceso de toma fotográfica. De esta manera, esta primera *exploración* del modelo tridimensional se convierte en una operación clave dentro del proceso fotogramétrico, ya que permite una valoración idónea de la superficie del objeto mediante el estudio, la observación e, incluso, la medición de un modelo virtual (a escala) del objeto del levantamiento.

intersecciones, obtener las primeras coordenadas aproximadas de todos los vértices⁴³. Estas coordenadas son posteriormente ajustadas mediante correcciones obtenidas a partir del cálculo de las compensaciones de las mismas mediante mínimos cuadrados⁴⁴.

El cálculo de las coordenadas de los puntos de control se efectuó a partir de las coordenadas de los vértices obtenidas en el paso anterior resolviendo las intersecciones inversas obtenidas. De esta manera se obtuvieron las coordenadas X e Y para los 15 puntos de control establecidos. La coordenada Z se obtuvo a partir de la lectura del ángulo vertical de campo y de la distancia reducida de los diferentes vértices a los puntos, obtenida a su vez a partir de las coordenadas planimétricas determinadas previamente⁴⁵.

De esta manera, a partir de la documentación de los pares fotográficos y con la totalidad de las coordenadas de los puntos de control calculadas, estábamos en condiciones de emprender la próxima etapa de restitución y el futuro proceso de edición gráfica.

La restitución.

Antes de comenzar los procedimientos previos a la restitución propiamente dicha, es decir los que comprenden el proceso de las orientaciones de los diferentes modelos y los ajustes necesarios, se tomó la decisión de establecer un nuevo sistema de coordenadas. Se pudo comprobar que el sistema de coordenadas inicial, establecido en el momento de calcular los vértices y los puntos de control, era dificultoso para el trabajo en el restituidor. Por esta razón, se decidió efectuar una transformación de coordenadas, en dos dimensiones, con el objeto de recolocar los ejes de manera más favorable.

La causa principal de esta rectificación estaba motivada por el hecho de que la posición inicial de los ejes X e Y no era paralela a la orientación de las caras de la base de la chimenea y esto provocaba una vista en proyección rotada del modelo en pantalla que dificultaba la visualización y el trabajo de restitución. Para compensar esta deficiencia se situó el eje X según la dirección que determinaban los vértices topográficos B y C y se realizaron las transformaciones que implicaban el cambio de los valores de todas las

⁴³ En este caso se eligió el vértice D, al que le fueron asignadas las coordenadas iniciales $X=10$ e $Y=10$ y un azimut de partida de D a B igual a 100° .

⁴⁴ El procedimiento completo para efectuar las correcciones de estas coordenadas puede verse en SÀEZ, Y. - CALMET, J., T.F.C., *Comparatiu de diversos mètodes topogràfics...*, op. cit., p.30.

⁴⁵ Todos los cálculos efectuados para la determinación de las coordenadas, tanto de los vértices como de los puntos de control así como la estimación de los márgenes de error pueden consultarse en SÀEZ, Y. - CALMET, J., T.F.C., op. cit., Annex I. *Càlculs*.

coordinadas, tanto de los vértices como de los puntos de control (Fig.17). De esta manera, el modelo adoptaba una disposición más favorable para el trabajo.

Como es sabido, antes de iniciar los trabajos de restitución propiamente dicho es necesario proceder a las *orientaciones* del sistema, un tema en el que no nos detendremos aquí por su especificidad técnica, pero que puede ser consultado, si así se desea, en los Secciones 13 y 15 del trabajo elaborado por los autores de la restitución y ya citado anteriormente⁴⁶.

Una vez realizadas estas orientaciones se dió comienzo al proceso de restitución, creando cuatro modelos -en principio independientes- que cubrían más del 75% de la superficie de la chimenea⁴⁷.

El proceso de trabajo se basó, tal como había sido acordado, en la restitución por puntos, completando las diferentes formas que adoptaban cada una de las piezas de revestimiento. Las tolerancias establecidas fueron de 3mm para el acabado de entidades y de 5mm para el cerrado de líneas.

De los cuatro pares fotogramétricos, fueron restituidos tres modelos que se orientaron en correspondencia con cada una de las tres caras *visibles* de la chimenea señaladas por la pirámide de base. Con tal de asegurar una perfecta unión entre las diferentes caras del objeto, se restituyeron los elementos comunes a modelos contiguos, ya que cada uno de los cuatro modelos restituidos debían ser *unidos* finalmente en un único modelo de la chimenea durante el proceso de edición.

De esta manera -y a modo de dato estadístico- acabaron por restituirse un total de 7971 líneas que conformaban las 1481 entidades que representaban las piezas del *trencadís* cerámico que cubrían el sector del cuerpo de la chimenea restituida.

Si se desean consultar los datos técnicos de la restitución, así como las características del sistema empleado, puede verse el *Apéndice B* de esta tesis.

Una vez finalizado el proceso de restitución nos encontrábamos con un material *en*

⁴⁶ SÀEZ, Y. - CALMET, J., T.F.C., *Comparatiu de diversos mètodes topogràfics...*, op. cit., A 13. Instrumentació, pp.76-82 y A 15. Precisions, pp.103-106.

⁴⁷ Para efectuar esta restitución se utilizó un estereocomparador analítico modelo *Digicart 40* de marca *Galileo Siscam* que fue operado por dos de los integrantes del propio equipo de trabajo, los alumnos Yolanda Sàez y Jordi Calmet, en el Laboratorio de Fotogrametría de la Escola Universitària Politècnica de Barcelona. El *Digicart 40* es un sistema analítico de restitución fotogramétrica de elevada precisión compuesto por diversos elementos, dispositivos y programas que pueden ser agrupados en tres componentes principales: la unidad óptico-mecánica o estereocomparador que permite la observación estereoscópica del modelo y su exploración y medición; el *hardware* formado por un ordenador que procesa los datos obtenidos por el aparato y un *interface* que posibilita el intercambio de datos y de información entre el aparato y el ordenador y, finalmente, el *software* de base compuesto por programas especiales para la gestión del sistema y otros programas de aplicación.

bruto que teníamos que adecuar convenientemente con el fin de producir un modelo 3D de todo el conjunto de la chimenea y poder producir el material gráfico adecuado. Este proceso, denominado de *edición*, requería en primer lugar de una transformación del fichero original de restitución en un fichero DXF para poder ser trabajado en un programa de CAD. En nuestro caso el programa de edición fue el AUTOCAD.

Dentro del propio programa de edición, el primer paso realizado consistió en la *limpieza* del material proveniente de la restitución, revisando una a una todas las entidades que hubieran podido quedar abiertas y efectuando las correspondientes uniones de líneas. Igualmente se corrigieron todos aquellos puntos que evidenciaban un claro error de restitución o que podían afectar en alguna medida la integridad del conjunto.

De este material, recogido en tres archivos, se realizó una edición gráfica en tres planos en escala 1:10 que representan, en proyección ortogonal, cada una de las caras de la chimenea y, en valor de línea simple y uniforme, los bordes de cada una de las piezas de revestimiento. En estos planos pueden observarse además los puntos de control y las cruces que definen las coordenadas (Planos MR1, MR2 y MR3).

La tarea más importante, sin embargo, sería la de la creación del modelo 3D de toda la chimenea como conjunto. Para ello se siguieron distintas etapas.

La primera operación consistió en la conversión de todas las líneas de los modelos en *polilíneas 3D* y para ello se hizo necesario utilizar una aplicación específica del programa⁴⁸. El paso siguiente era el de dar *materialidad* a cada una de las caras de las piezas del *trencadís*, ya que hasta ese momento los bordes del revestimiento eran sólo líneas flotando en el espacio. Dada la imposibilidad de obtener caras en 3D directamente con el programa de dibujo, fue necesario transformar una a una las polilíneas de las *rajoles* en *3D face* mediante el comando *Pface* de AUTOCAD.

A continuación se procedió a la unión de los tres archivos para crear un único modelo 3D, comprobando una y otra vez la correspondencia entre los elementos contiguos y verificando la precisión del ensamblaje.

Quedaba ahora, sin embargo, por resolver el tema más comprometido de todo el proceso y era el de tomar una decisión respecto a la porción de superficie de la chimenea que no había podido ser restituida y que, lógicamente, faltaba en el modelo recién elaborado.

¿Era realmente importante la fidelidad absoluta al objeto construido, mientras habían sido restituídas más de las tres cuartas partes de su superficie? ¿Hasta qué punto

⁴⁸ Esta aplicación fue cedida por el *Departament EGAI* de la *Escola Tècnica Superior d'Arquitectura de Barcelona*, UPC.

había que llevar esta *sinceridad* metodológica en un caso como éste?

La respuesta a estos interrogantes se produce casi inmediatamente al poner en consideración una vez más los objetivos iniciales del trabajo.

Uno de los fines esenciales de esta investigación consiste en un estudio de base geométrica para deducir ciertas leyes o principios de generación de carácter general. Ahora bien, desde este punto de vista parece poco relevante que, en un objeto de fuerte simetría radial como es el caso que nos ocupa, una pequeña porción de su superficie quede sin restituir. Muy diferente sería el caso si esta restitución fuera requerida para otros fines, como puede ser el ejemplo de una acción de tipo restaurativo o para un control de un comportamiento estático o dimensional del conjunto.

Por todos estos motivos, teniendo en cuenta los objetivos específicos del trabajo y las características propias del objeto analizado, no solamente se asume una restitución incompleta de la chimenea sino que, además, se adopta una actitud más pragmática al tomar la decisión de "rellenar" la zona faltante del modelo. Para ello se procedió a realizar una copia en *espejo* de los elementos de la cara opuesta, obteniéndose de este modo una restitución física y unitaria del cuerpo de la chimenea.

El resultado de este ensamblaje puede verse en el Plano MR4, en donde el área *artificial* ha sido diferenciada del resto por un tratamiento gráfico particular para dejar claro el artificio adoptado.

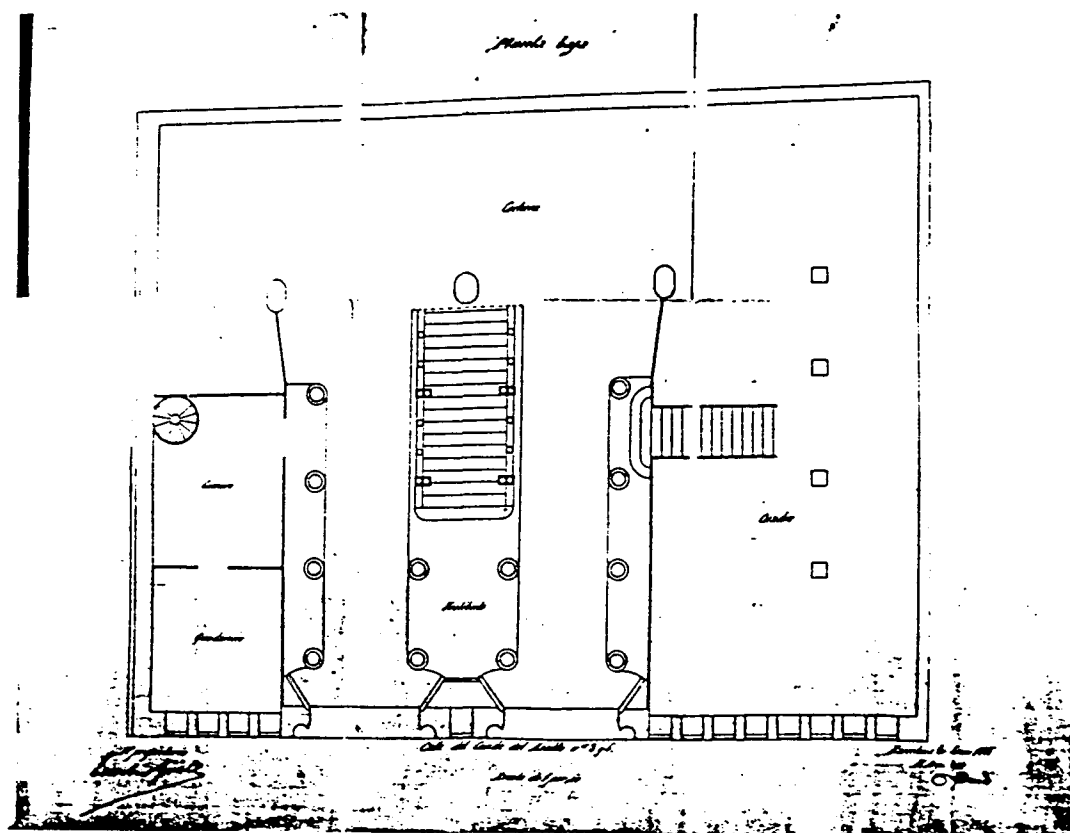


Fig. 1a

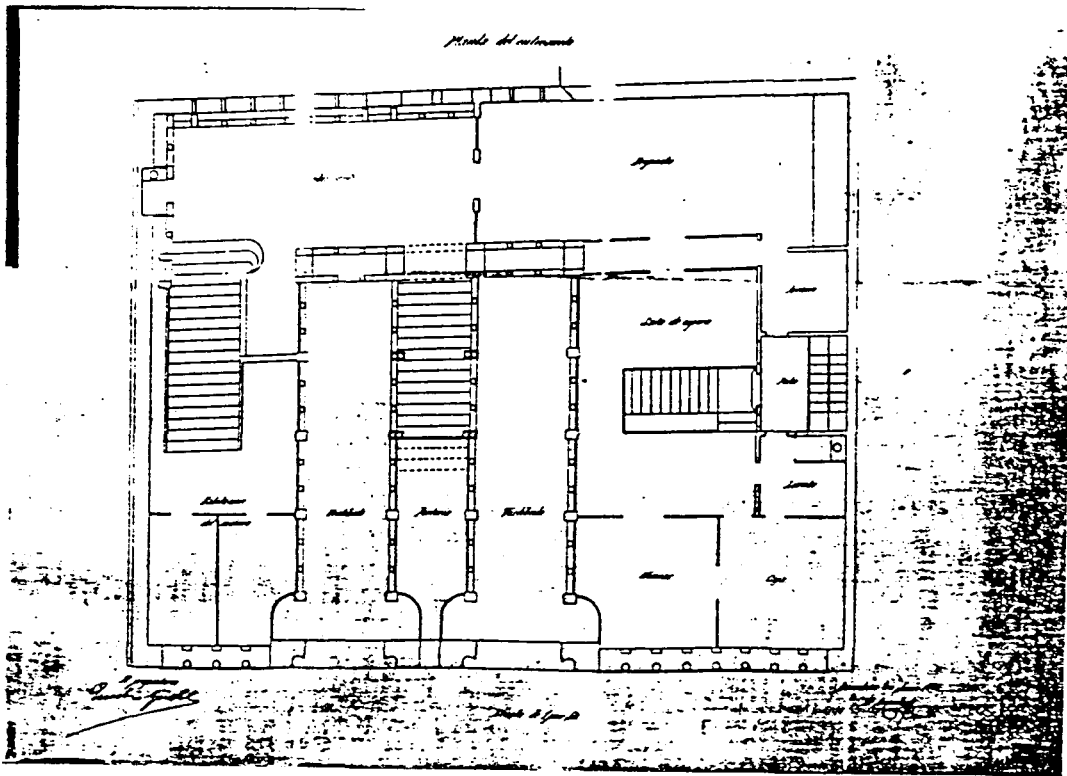


Fig.1b

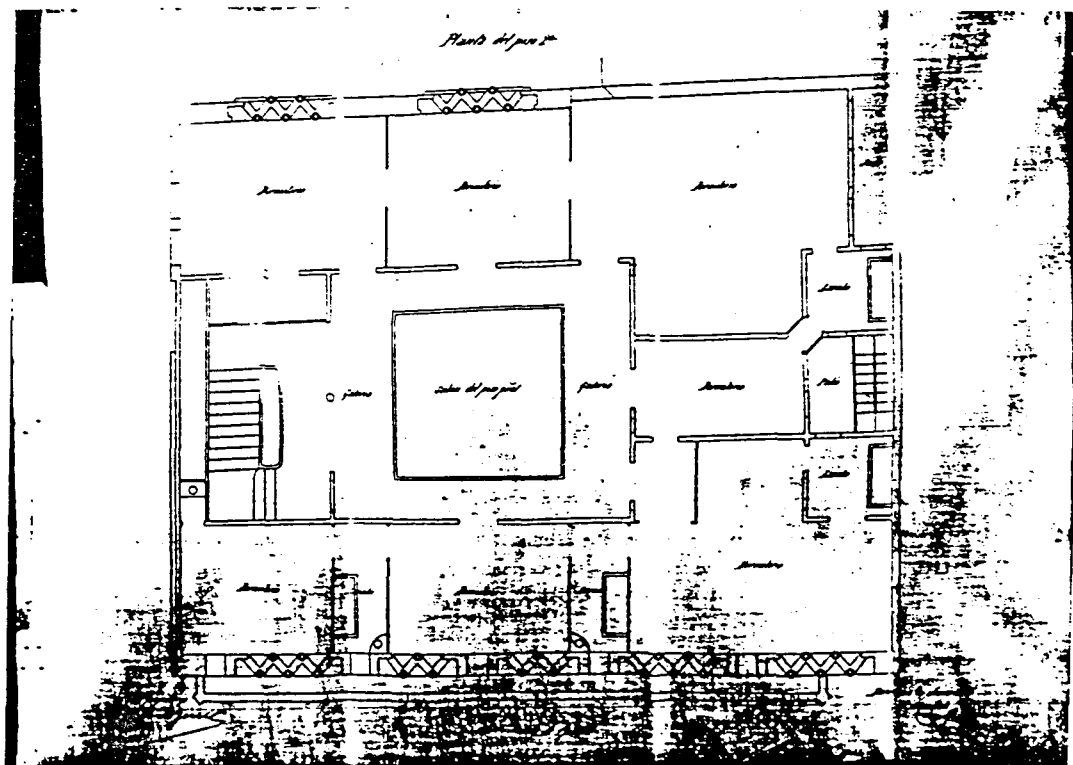


Fig. 1c

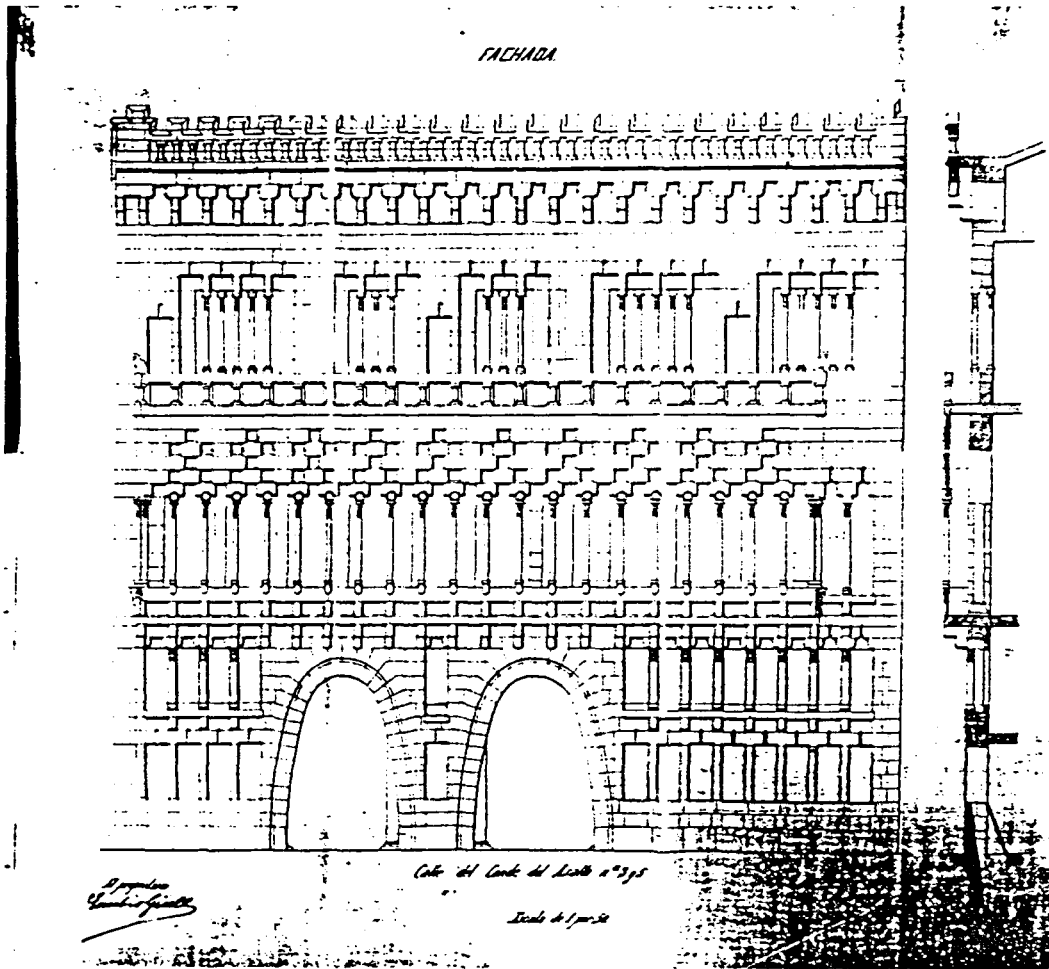


Fig. 1d

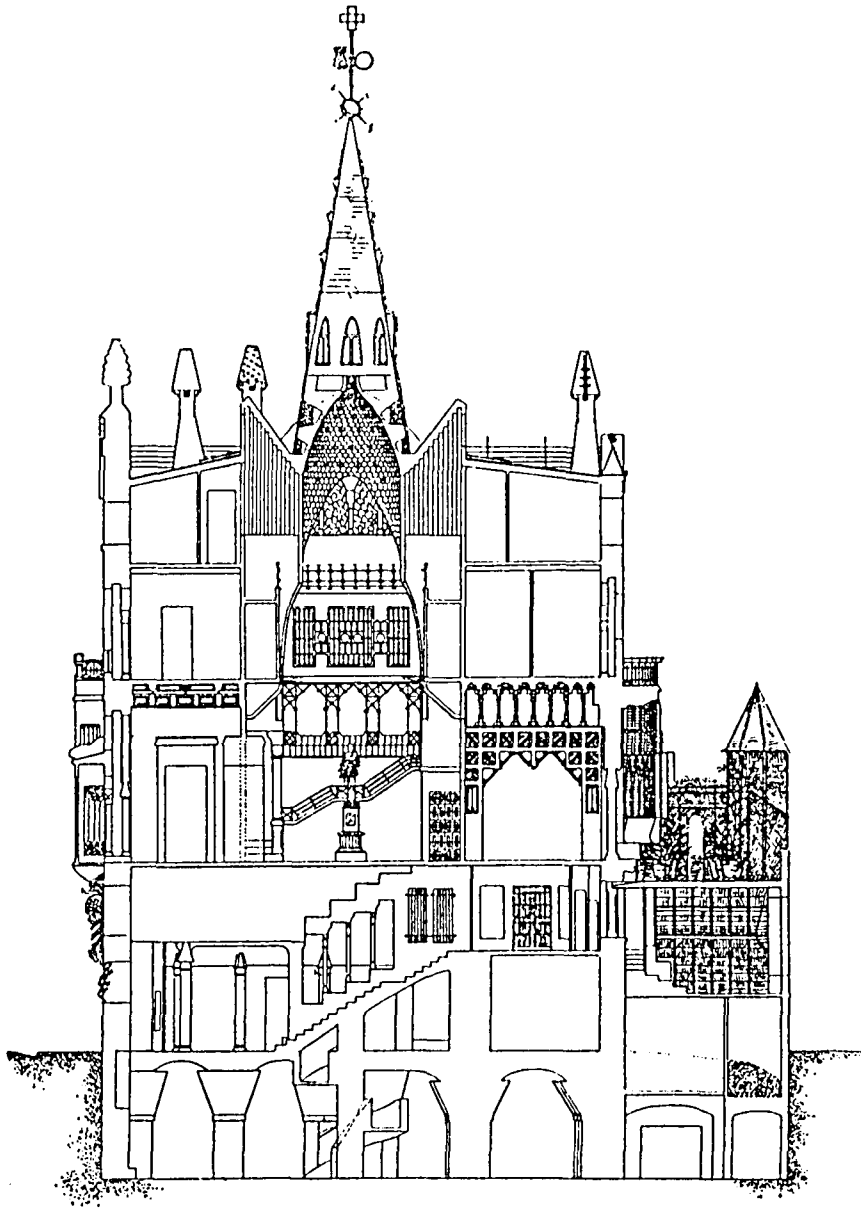


Fig.2

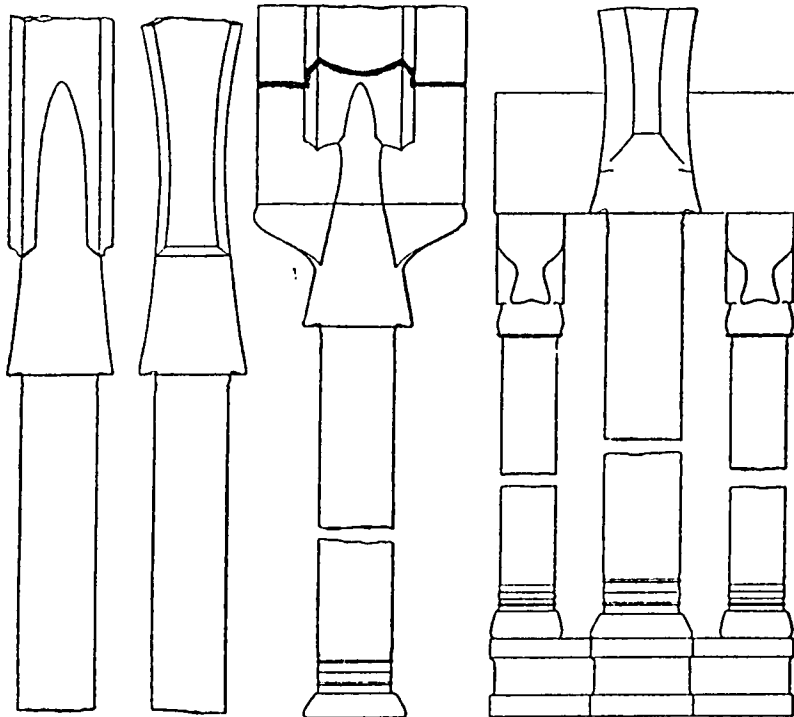
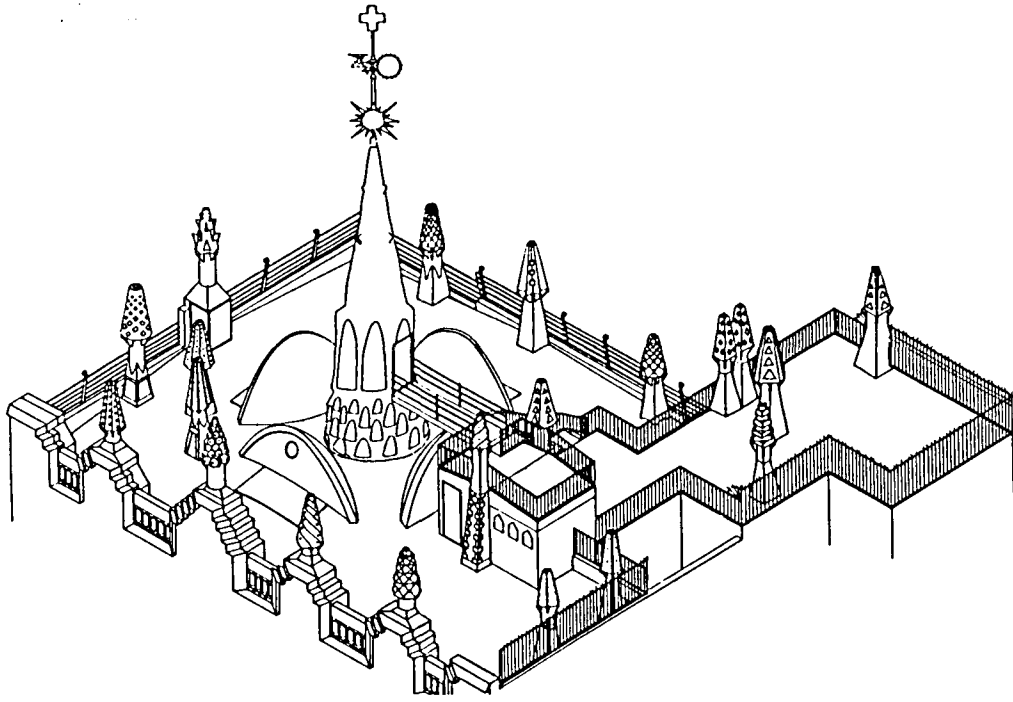


Fig.3/Fig.4

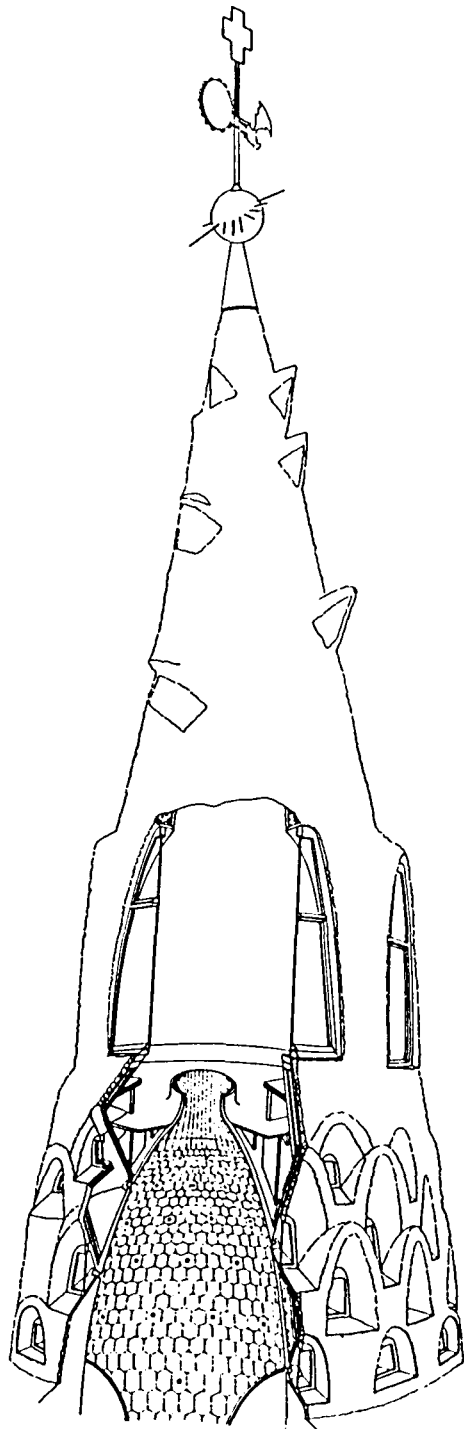
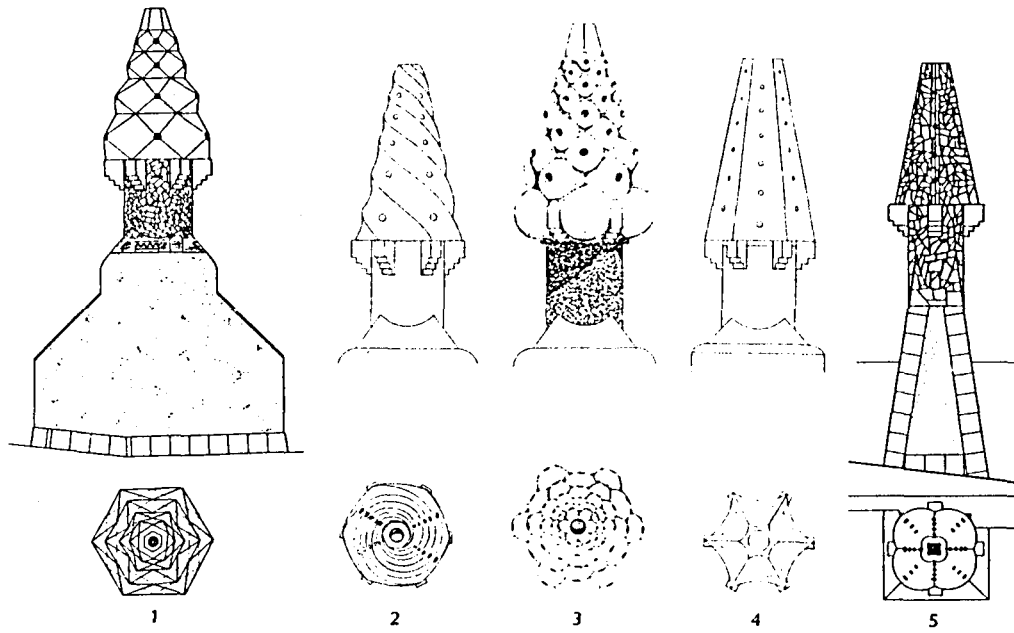


Fig.5



Els tres elements de les xemeneies
—base, tronc i barret— tenen una gran
diversitat de formes, materials i
ornamentació. Dibuixos: Maite Gómez i
Joan Suris.

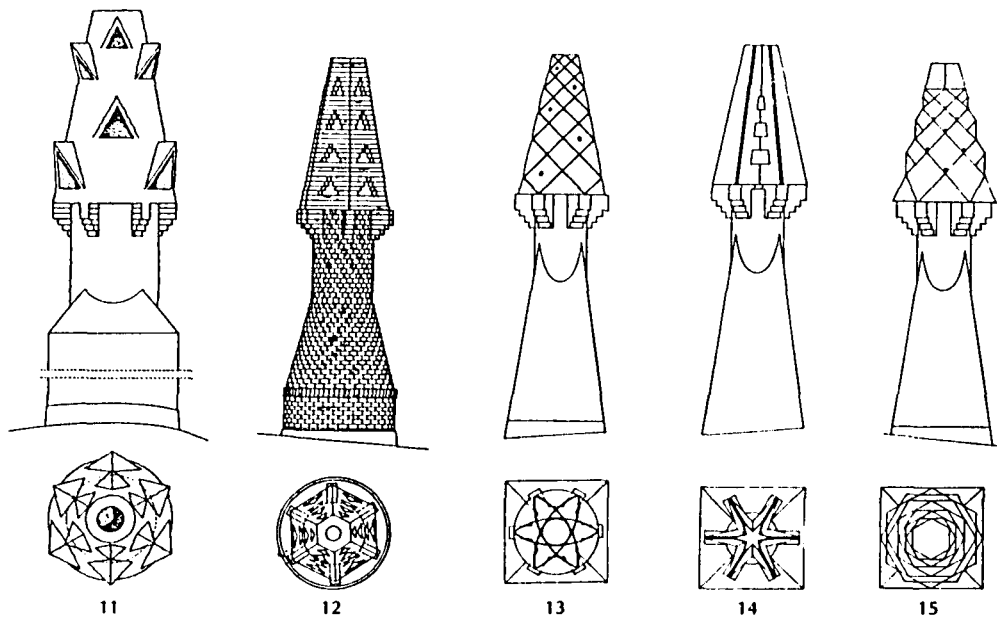


Fig.6a

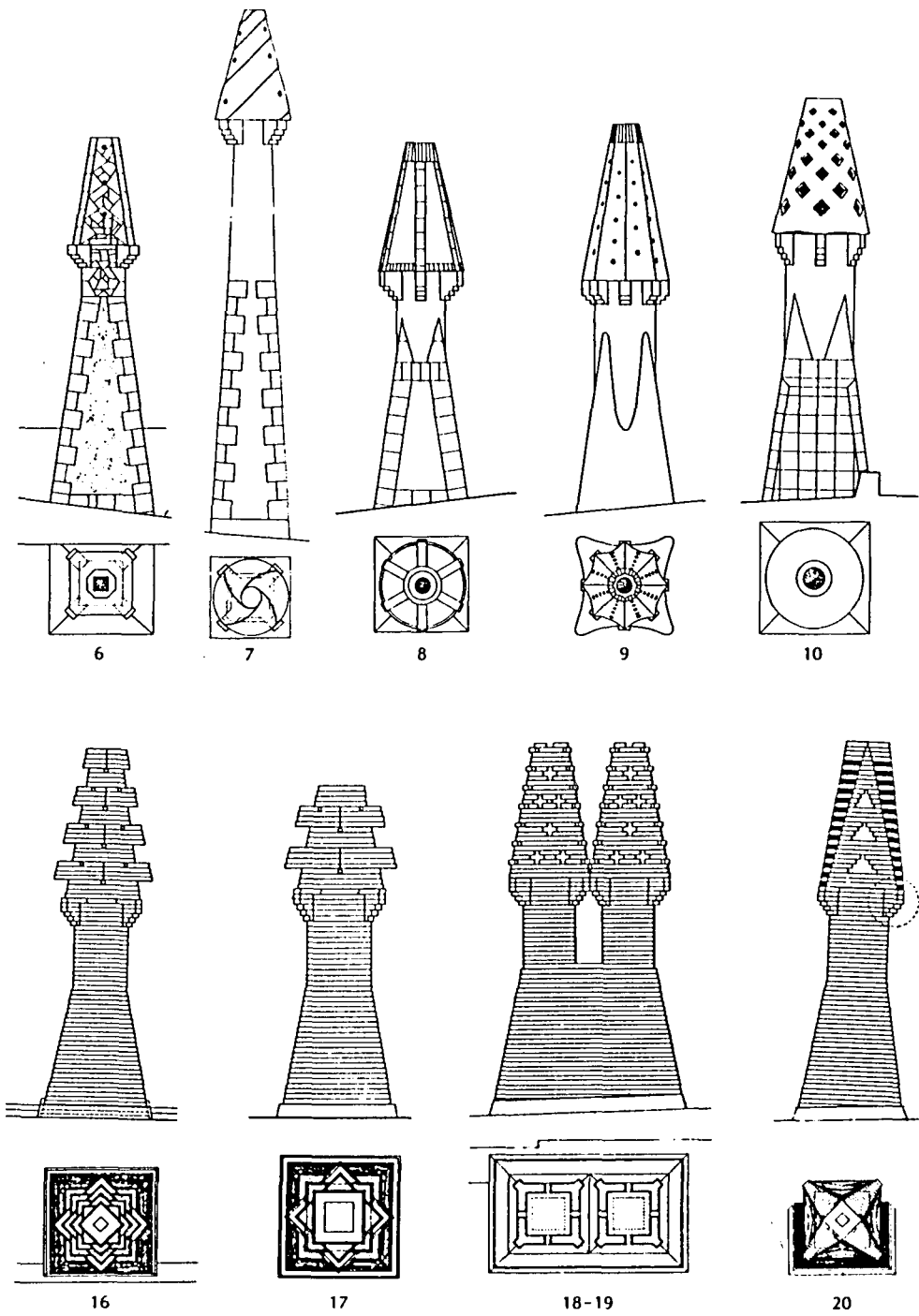


Fig.6b

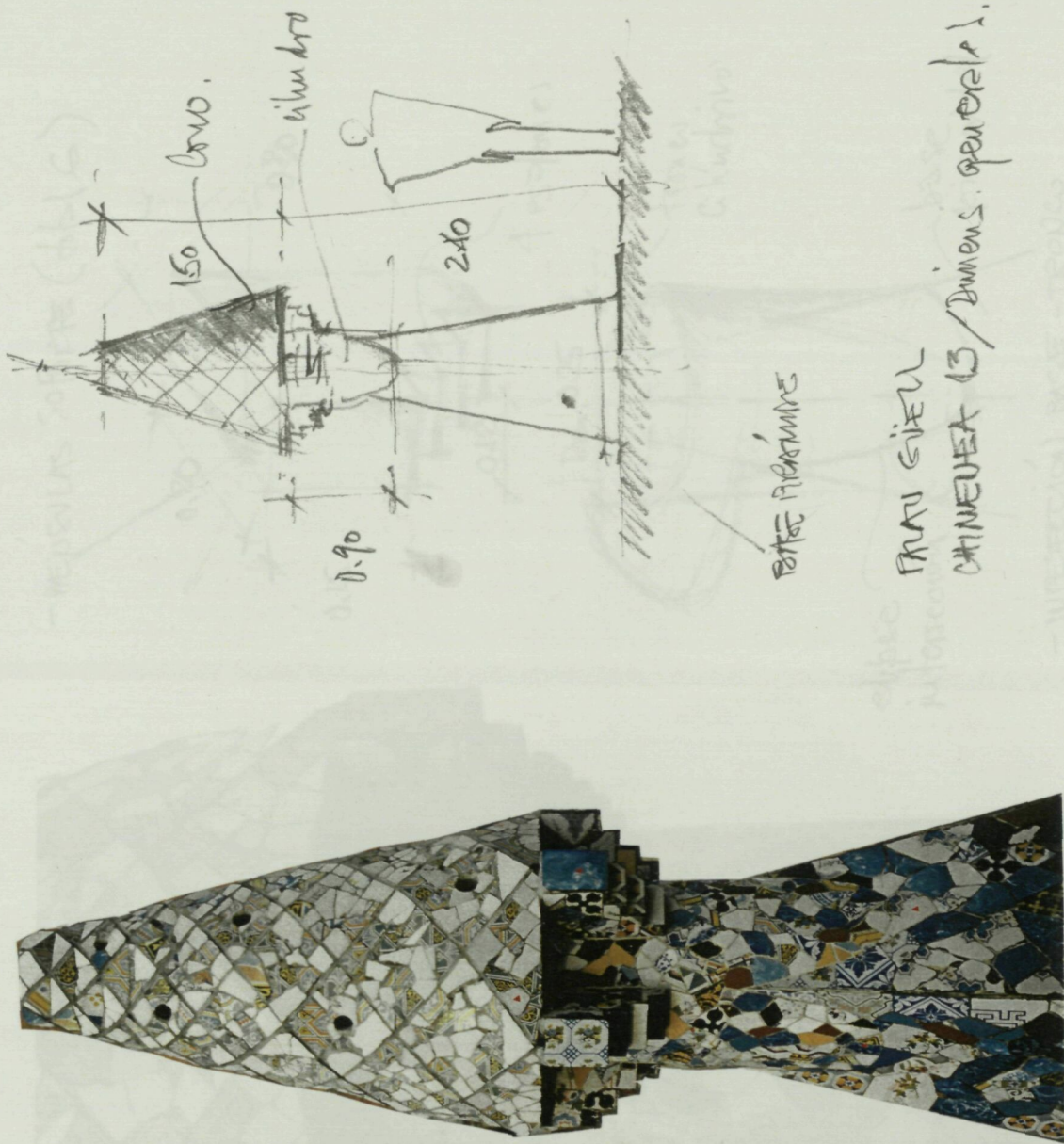


Fig.7

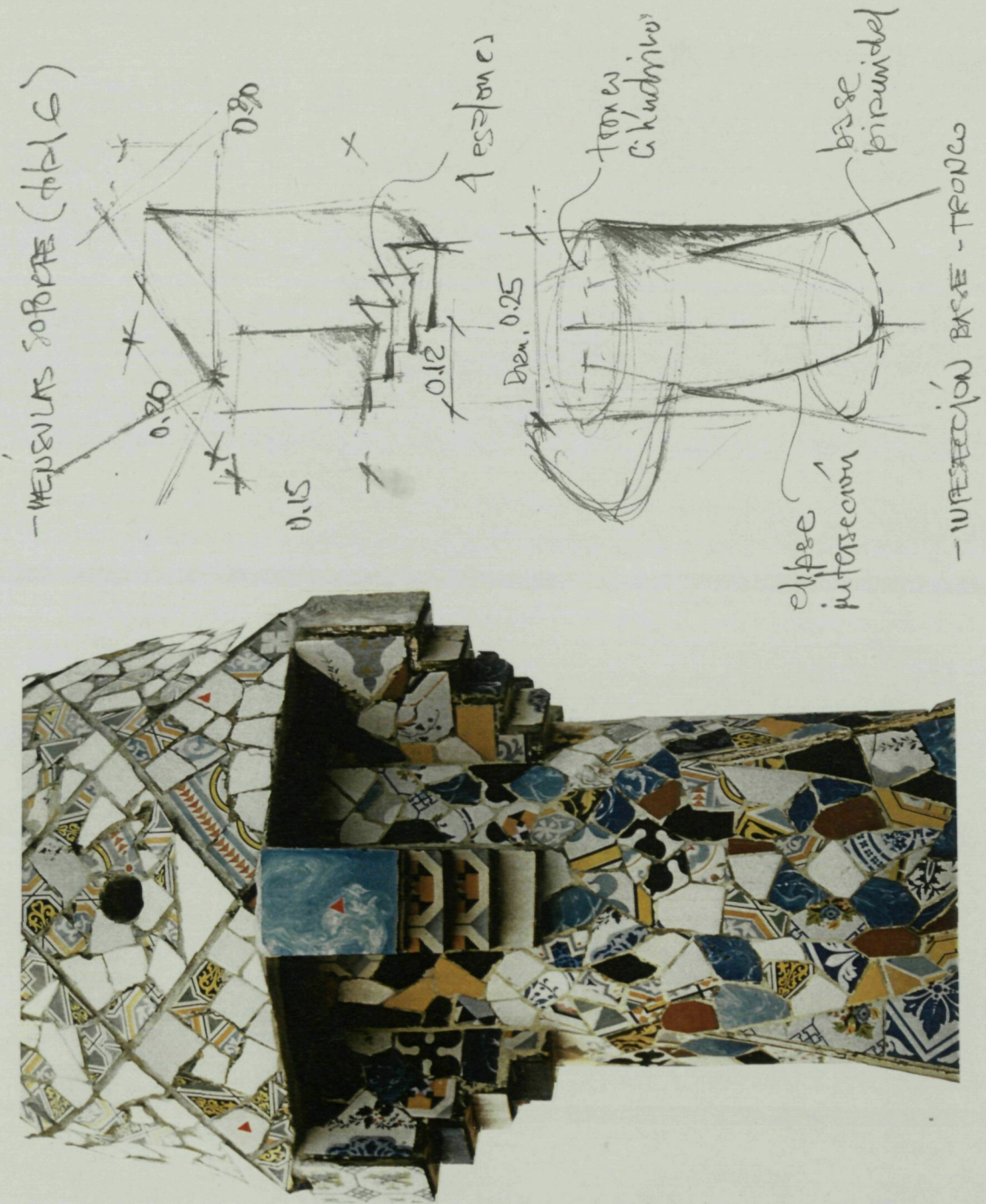


Fig.8

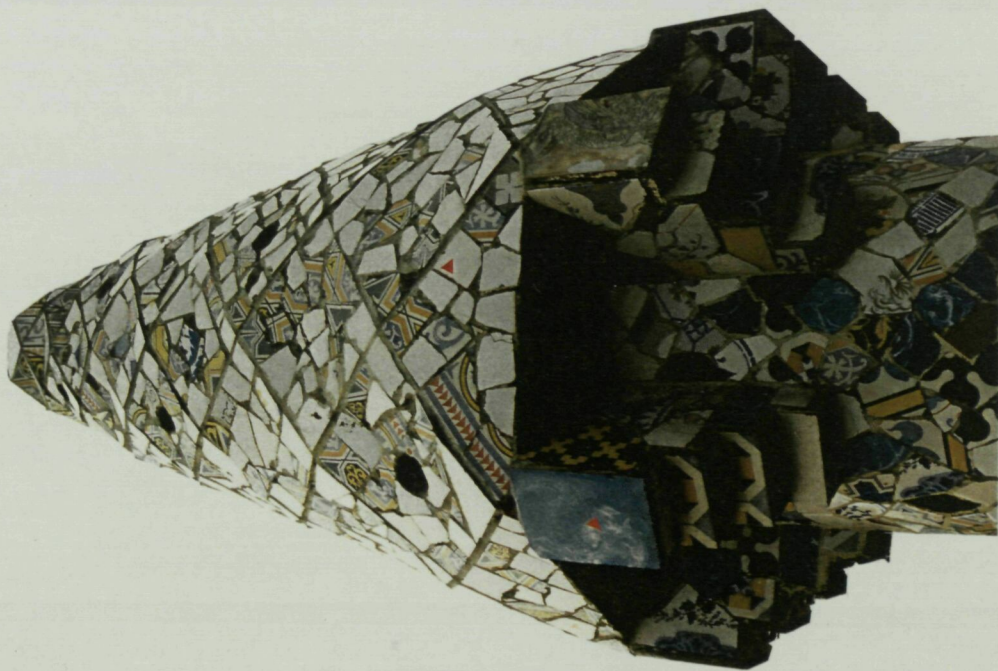
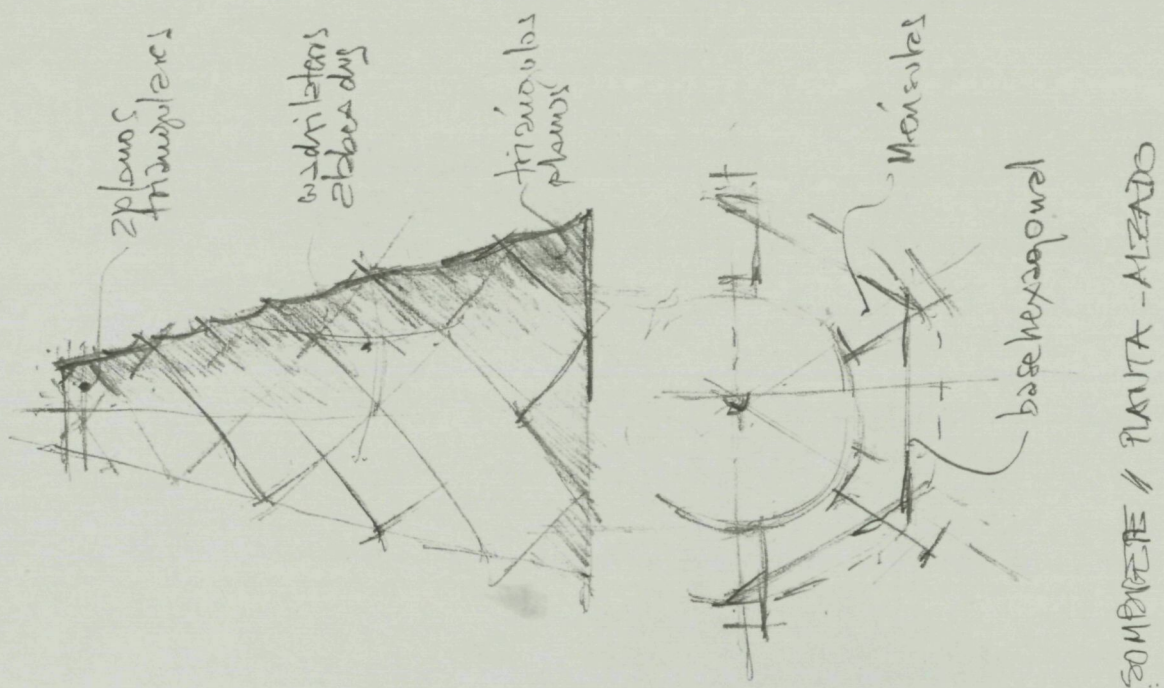


Fig.9

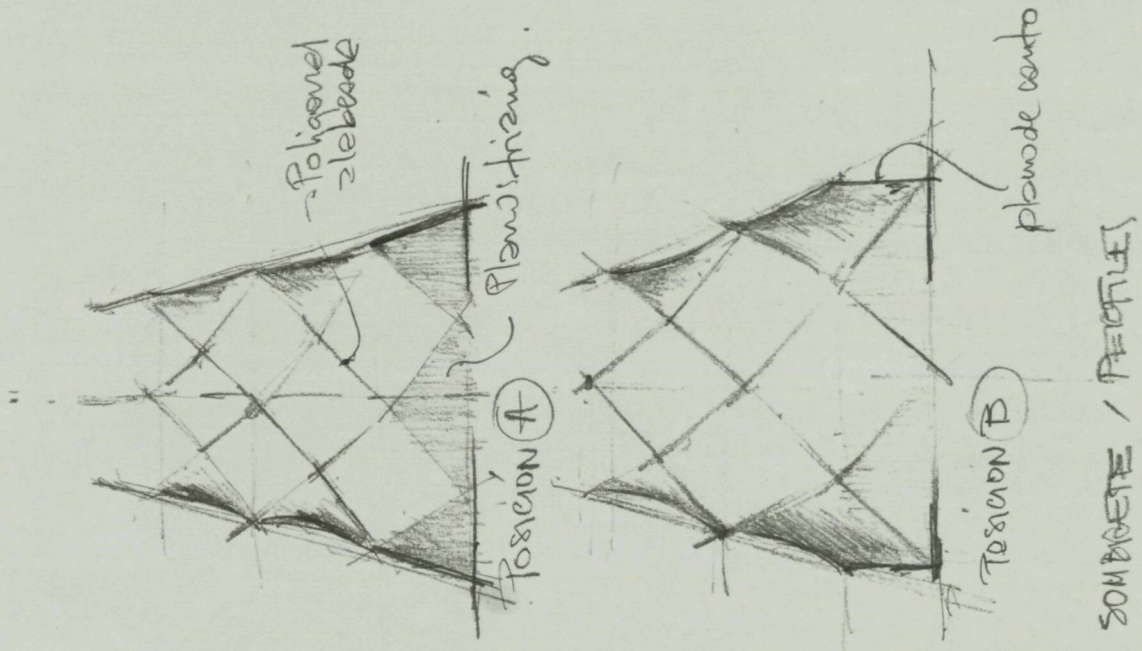


Fig.10



Fig.11

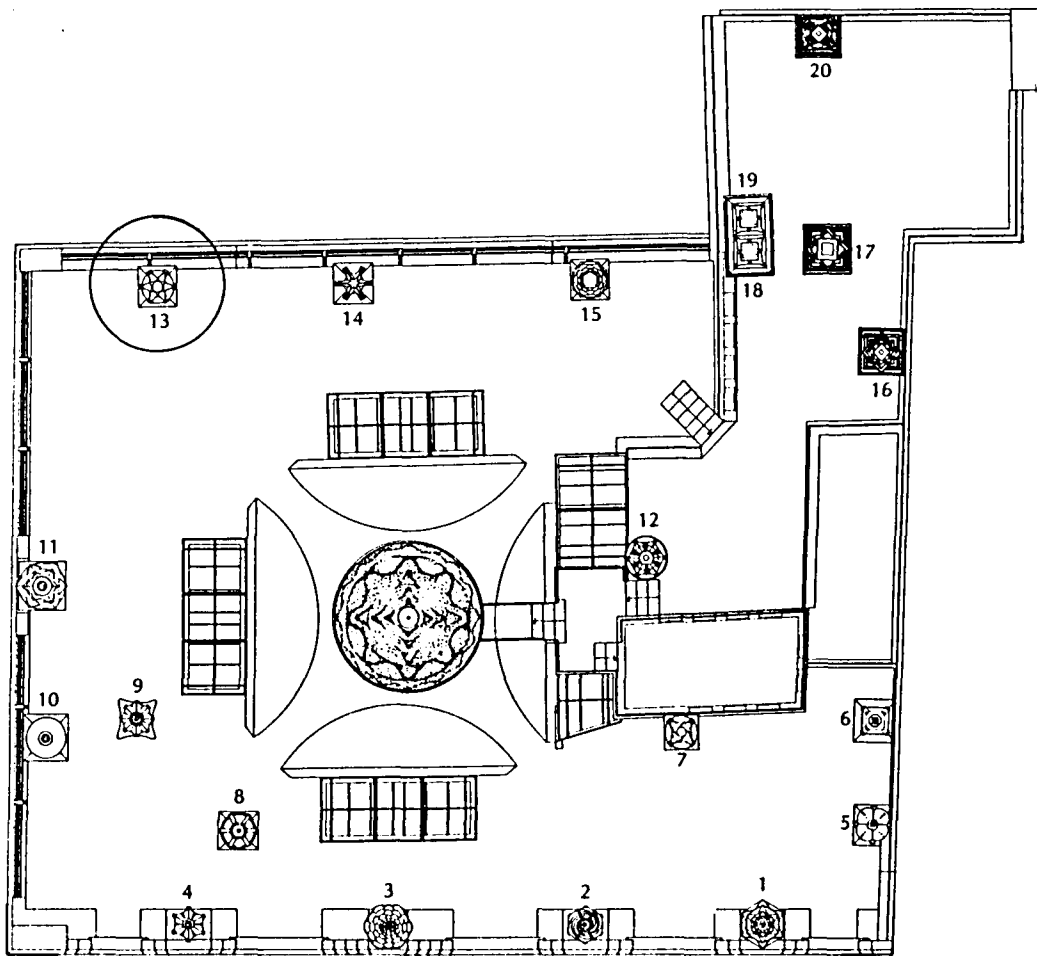


Fig. 12

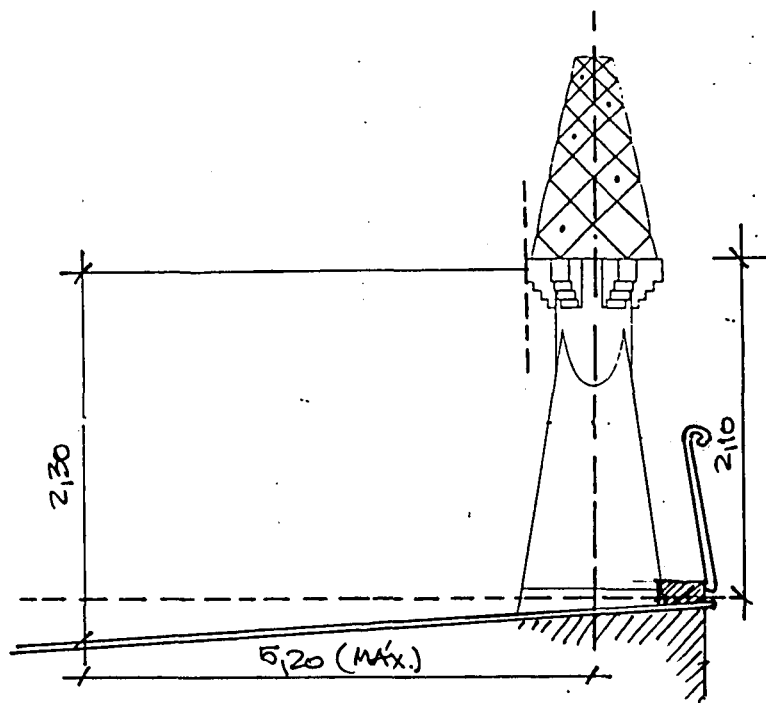
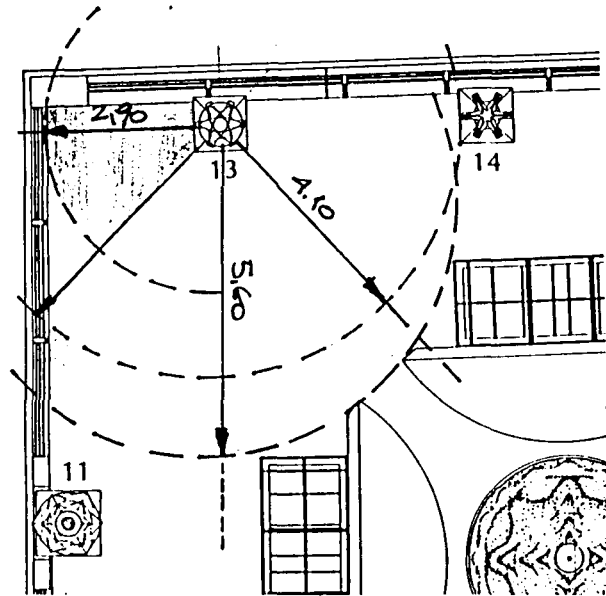


Fig. 13/Fig. 14

PUNT: 4 X: 13.353
 Y: 13.594
 Z: 11.114

Situació: Des del punt D. Vèrtex superior del triangle vermell, situat a la rajola blanca de la part superior central de la base, a prop del començament del tronc de la xemeneia.

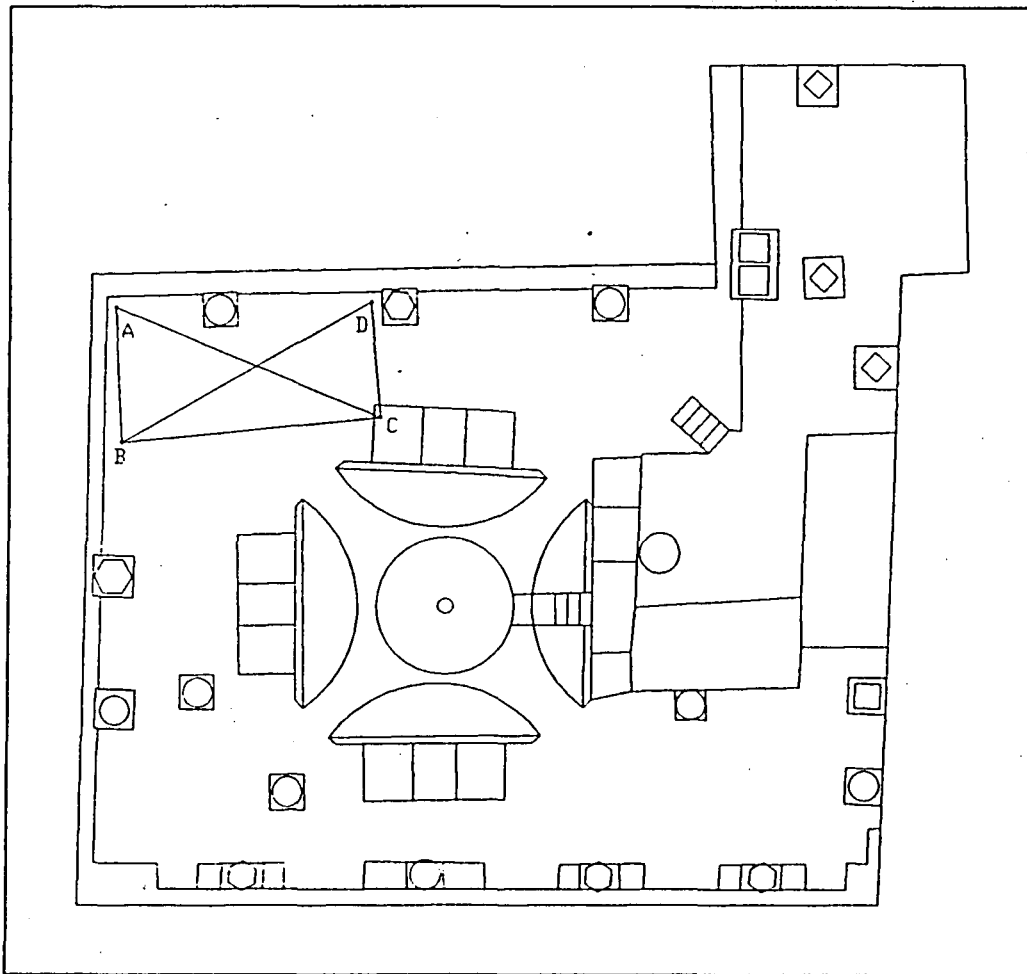
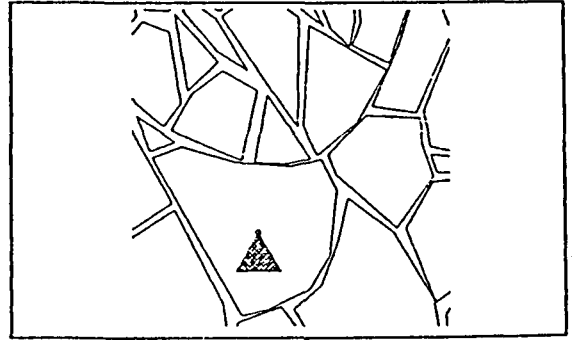


Fig.15/Fig.16

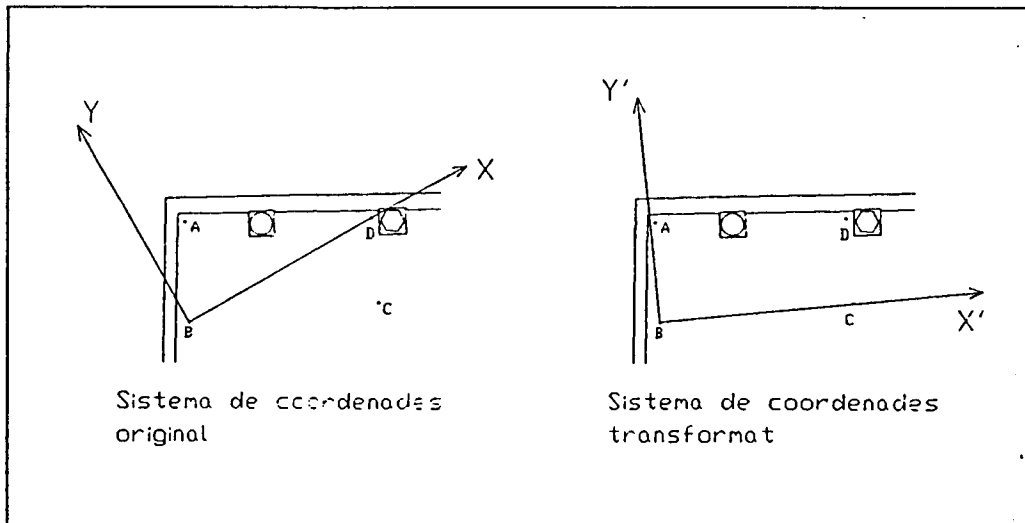


Fig.17

CAPÍTULO V EL MODELO RESTITUIDO

PRIMERAS APROXIMACIONES AL ESTUDIO GEOMÉTRICO

Tal como quedó explicitado en el capítulo anterior, el modelo restituido del que disponíamos para nuestra tarea de investigación estaba contenido en un fichero tipo DWG de AUTOCAD y ya había sido sometido a un primer proceso de edición con el fin de crear un modelo 3D de la chimenea en su totalidad. Sin embargo, antes de trabajar con el archivo fue necesario realizar una adaptación del modelo informático a nuestras propias necesidades y corregir ciertos aspectos de la configuración gráfica del material restituido.

En primer lugar se tuvo que modificar por completo la estrategia de las *layers*, que estaban organizadas, como era lógico, en grupos provenientes de la restitución¹.

Posteriormente se hizo necesario *posicionar* el modelo restituido, es decir, adaptarlo a nuestro sistema de coordenadas de dibujo. Como se sabe, la restitución se realiza considerando al eje Z como perpendicular al plano definido por el llamado *plano de referencia*, o sea según la dirección del eje óptico de la cámara. Para solucionar este problema de índole convencional fue necesario, por lo tanto, efectuar una rotación tridimensional del triedro contenido en el modelo restituido para adecuarlo a la posición de las coordenadas habituales de dibujo.

Otra de las operaciones de *ajuste* efectuadas al modelo consistió en realizar un pequeño giro del conjunto sobre el ahora plano XY del dibujo para corregir una leve desviación de la ortogonalidad que definían los ejes del hexágono de la base del sombrero. De esta manera era posible una mayor comodidad en relación al manejo del cursor del ordenador en posición *ortho*.

Finalmente, se tuvieron que retocar levemente algunas de las posiciones espaciales de las piezas de *trencadís* que, a pesar del procedimiento de edición ya realizado en la fase anterior, presentaban ciertas desviaciones que creímos oportuno corregir. Este fenómeno resultaba particularmente evidente en la superficie del sombrero superior de la chimenea, en donde podían observarse ligeras imprecisiones en el ajuste de las diferentes zonas de la restitución, especialmente en el encuentro con aquella "zona negra" invisible a la restitución en donde se tuvo que *adherir*, por simetría, un fragmento de la cara opuesta de la chimenea.

¹ En este sentido cabe mencionar que el criterio adoptado para la organización de capas no fue unitario, ya que la estrategia iba variando conforme a las necesidades propias de cada *submodelo* de trabajo.

La primera intención que aparece cuando se tiene por delante el modelo restituido en 3D es la de cotejarlo con los croquis iniciales de la chimenea tomados en el propio sitio. En este acercamiento un poco primario y asistemático al modelo de estudio, se intentaba verificar si las primeras impresiones generales acerca de la configuración geométrica de la chimenea eran las correctas.

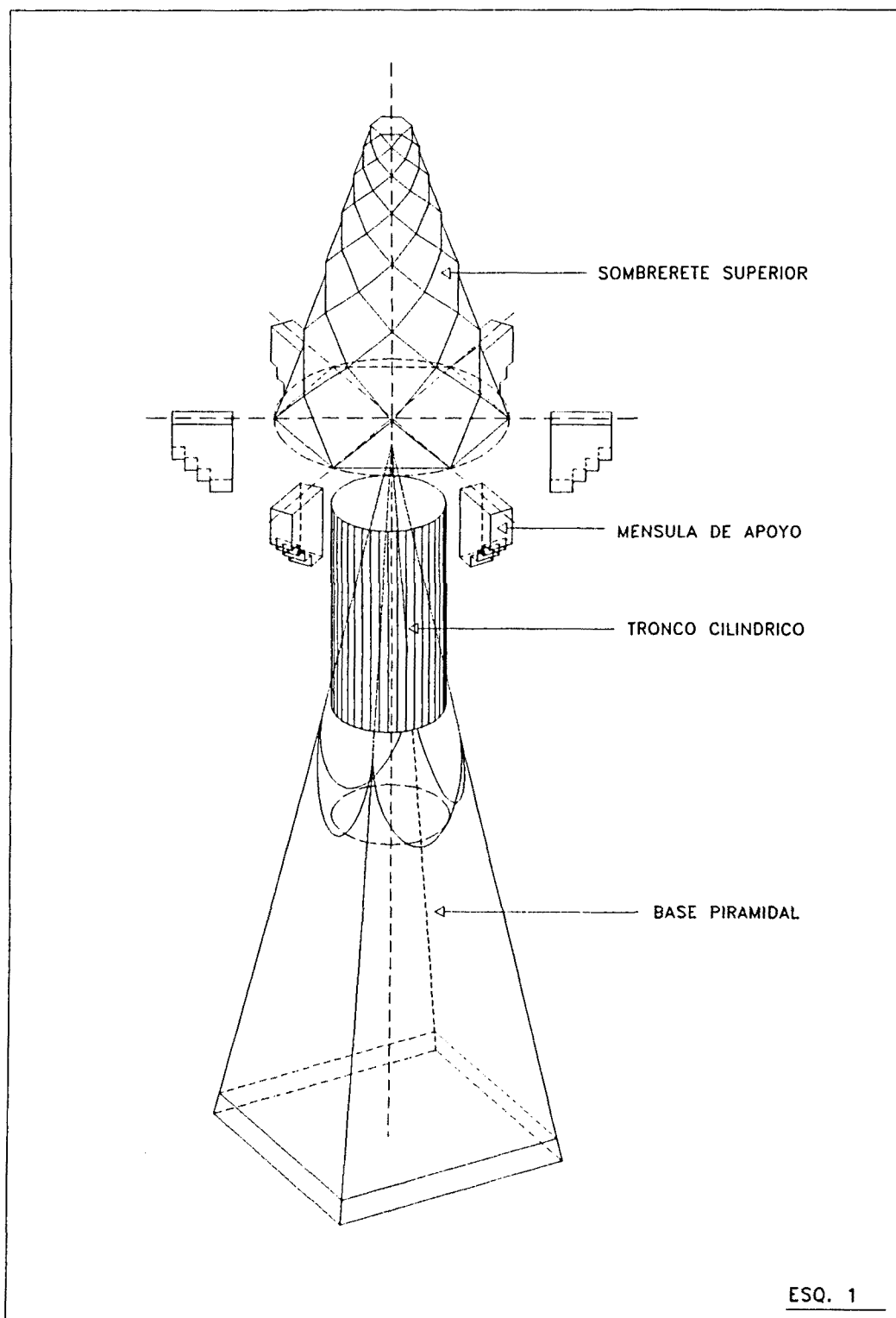
La posibilidad de visualizar el modelo desde todas las posiciones imaginables resultaba sin lugar a dudas una ventaja que en el momento de tomar los croquis no se tenía, ya que como sabemos la percepción del modelo real venía limitada tanto por su propia ubicación física como por los reducidos puntos de vista que asumíamos como observadores. De esta manera era sencillo verificar, por ejemplo, la regularidad de la base hexagonal que habíamos detectado en los croquis iniciales o ajustar los valores dimensionales recogidos en su momento.

Con la observación en proyección ortogonal y efectuando diversas rotaciones sobre el plano XY se pudo verificar el pasaje gradual de contornos aparentes que indicábamos un poco intuitivamente en los dibujos de la Fig. 10 que aparecen en el Capítulo IV y sacar las primeras conclusiones acerca de las superficies alabeadas contenidas en los cuadriláteros. De igual manera, y con el único trámite de la visualización según determinadas proyecciones del modelo, se pudo comprobar la aproximación *poligonal* que experimentaban los trazados de las distintas hélices que se enrollan alrededor del cuerpo del sombrerete, con lo que nuestras primeras aproximaciones sobre el modelo real quedaban plenamente confirmadas.

Otras características particulares de la chimenea también pudieron ser comprobadas en esta primera aproximación al modelo restituido: ciertas peculiaridades del material de revestimiento, el trazado de las elipses producidas por intersección, etc. Es decir que con el simple trámite de la visualización -aún no habíamos realizado ninguna operación con el modelo- estábamos en condiciones de poder confirmar nuestras primeras impresiones acerca de la base geométrica de la chimenea y, por tanto, de establecer con una cierta solidez el punto de partida de nuestra investigación.

La comparación más evidente de ambos modelos -el real y el restituido- tenía que ver indudablemente con la estructuración volumétrica general del conjunto. En este caso podíamos detectar ahora con indudable claridad los componentes geométricos elementales del conjunto y practicar un *despiezo* de sus partes integrantes (Esq. 1).

Para esta primera operación sobre el modelo nos valemos de una simplificación de los elementos no relevantes para este análisis como son las piezas de revestimiento, cuidando sin embargo de dejar visibles los bordes de estas piezas en los casos en que generen intersecciones entre los cuerpos o definan sus propios límites físicos. Creando entidades separadas para cada uno de los componentes de la chimenea, se procedió a realizar un desplazamiento de los mismos sobre el eje vertical del conjunto para poder



visualizar adecuadamente los cuerpos elementales que la componen. De igual manera, cada una de las seis ménsulas de apoyo del sombrero fue desprendida de la base cilíndrica según la dirección de los ejes del hexágono base.

En el dibujo axonométrico del Esq. 1 pueden *verse* con facilidad los componentes de la configuración volumétrica de la chimenea: el pseudo-cono truncado que forma el sombrero superior, el cilindro que constituye el *tronco*, la base piramidal y las seis ménsulas escalonadas que soportan el sombrero.

A partir de esta primera descripción ya podemos intuir en cierta medida la manera en que pudo haber sido construido en obra el conjunto de la chimenea. Si exceptuamos el sombrero -sobre cuya complejidad constructiva intentaremos una hipótesis al final de la tesis- parece bastante lógico pensar que fue levantada una pirámide truncada (con ladrillos, tal como hemos visto) hasta la altura que define la curva de la elipse. A partir de este punto comenzó a construirse el tronco cilíndrico, cuya circunferencia de base quedaba inscrita dentro del cuadrado originado por el truncamiento de la pirámide. A este cilindro -levantado hasta una altura algo mayor que la que correspondería a la base del sombrero- se le van empotrando cada una de las seis ménsulas, regularmente repartidas en relación a la división hexagonal sobre donde descansará el remate de la chimenea. Posteriormente, en base a una aplicación de mortero y un *regleado* uniforme que completa las aristas de la pirámide, se van dando forma a las elipses que se dibujan en el encuentro con la superficie cilíndrica.

Ubicado sobre unos ejes de referencia, este modelo volumétrico permite comprobar en una primera aproximación las desviaciones a la simetría del objeto, debidas con toda probabilidad a cuestiones de índole constructiva. También se puede deducir de una manera aproximada la ubicación del hipotético vértice de la pirámide y su relación con el eje de simetría del conjunto.

Llegados a este punto se hizo necesario concentrar la dirección de la investigación en el elemento que era objeto principal de nuestro estudio geométrico: el remate superior de la chimenea. Para ello fue imprescindible en primer lugar crear un archivo independiente conteniendo sólo este elemento en particular y eliminar el resto del conjunto para no dificultar las operaciones.

A partir de aquí se asumió el primer criterio operativo que resultó un elemento clave para el desarrollo de la investigación. Este criterio consistía en desdoblarse el archivo inicial para generar a su vez dos modelos -o mejor, *submodelos*- con contenidos diferentes. Serán los que inmediatamente estudiaremos con la denominación de *modelo de los cuadriláteros* y *modelo poligonal* respectivamente. Esta decisión, tal como podrá ser comprobada a lo largo del análisis, permite clarificar dos aspectos esenciales del desarrollo geométrico de la chimenea que, lejos de resultar antagónicos, encuentran hacia el final de

la investigación su adecuada relación conceptual.

EL MODELO DE LOS CUADRILÁTEROS

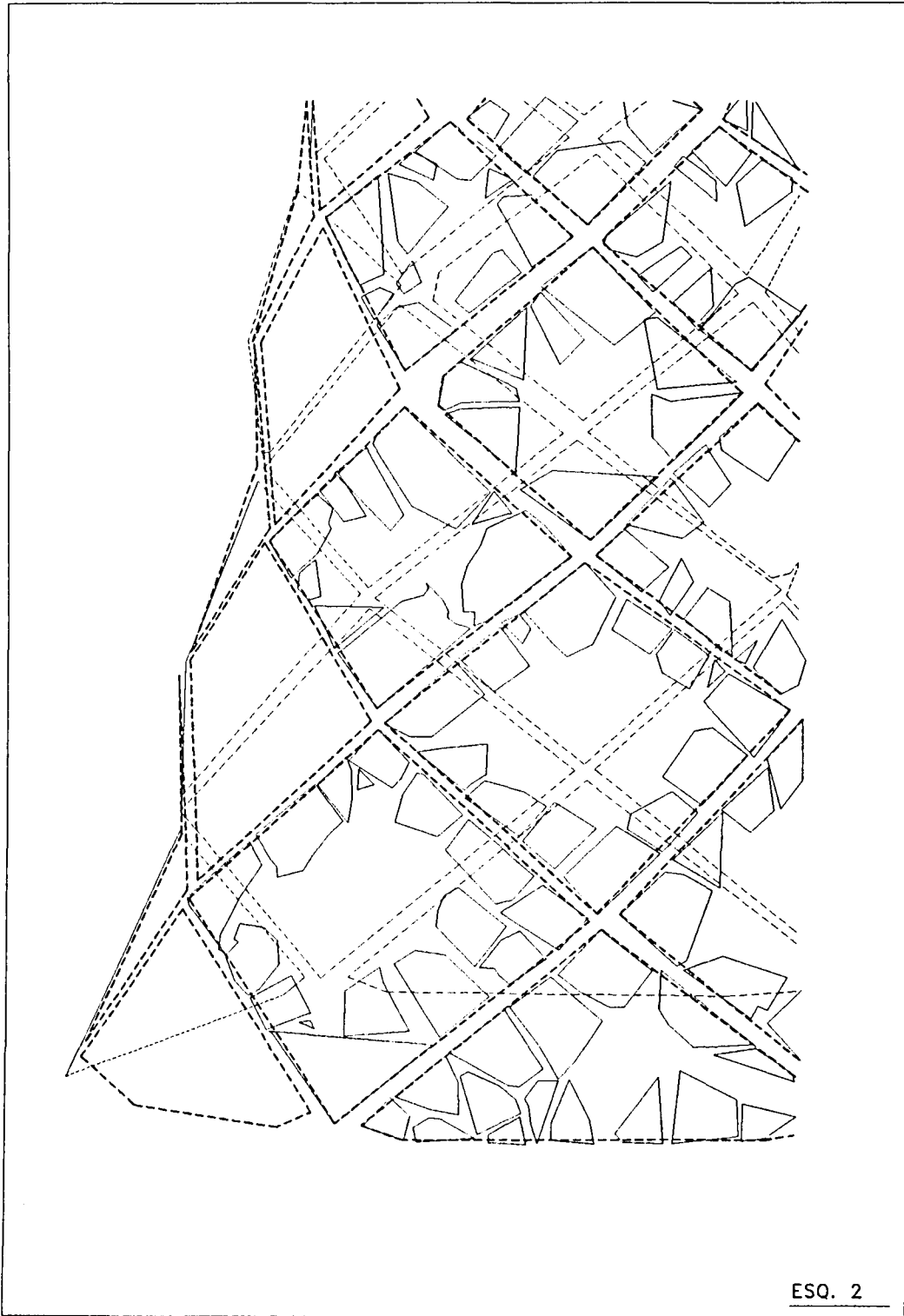
Este primer objeto de estudio estaba orientado a la identificación, configuración geométrica y análisis dimensional del conjunto de los cuadriláteros que componen la superficie del elemento superior de la chimenea.

La primera operación realizada sobre el archivo inicial de trabajo consistió en la delimitación de las líneas que componen los lados de cada cuadrilátero (Esq.2). Para ello fue menester eliminar progresivamente del modelo todas las piezas de revestimiento que no aportaban datos métricos sobre el trazado de los lados del cuadrilátero. Con esta operación íbamos "vaciando" paulatinamente las caras de las superficies alabeadas que definían las *rajoles* cerámicas y creando un nuevo modelo inmaterial. Al final sólo quedaban las piezas periféricas de cada cuadrilátero y a partir de sus caras exteriores y vértices se fueron trazando una a una las líneas de borde que definían sus lados. En cada caso se tuvo en cuenta una ponderación de las pequeñas diferencias de orientación espacial que naturalmente presentaban cada una de las piezas y se promediaron los resultados. Un ejemplo gráfico del procedimiento seguido para efectuar este trazado puede verse en el Esq.2.

La regularización de los bordes de cada cuadrilátero fue realizada mediante líneas poligonales 3D cerradas para cada una de las unidades, con el objeto de obtener un modelo definido por la totalidad de las 78 entidades que componen los cuadriláteros y triángulos del sombrerete.

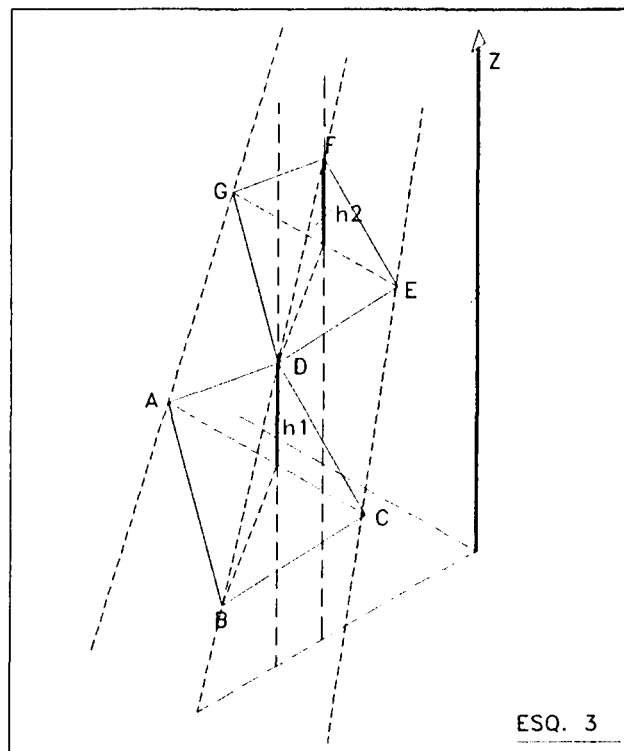
Una vez finalizado por completo el proceso de trazado podíamos contar con un nuevo modelo tridimensional del sombrerete de la chimenea, esta vez de tipo *alámbrico*, con el que comenzábamos el estudio de estos cuadriláteros alabeados así definidos.

Este era ahora un modelo más "limpio" con el que podíamos obtener visualizaciones nítidas y clarificadoras. Las proyecciones ortogonales que pueden verse en el Plano MR6, ya no dejaban lugar a dudas acerca de la configuración general y la estructuración geométrica de la chimenea. En los alzados visualizados en las dos posiciones características de análisis (que ahora denominamos posiciones I y II) puede comprobarse la completa ordenación de los cuadriláteros, que siguen las pautas de proporcionalidad dictadas por la trayectoria de cada una de las hélices que envuelven el elemento. En este dibujo quedan determinadas ambas posiciones en sistema diédrico y en relación a la trama lineal de referencia ya comentada anteriormente. Para conseguir una orientación adecuada del modelo fue necesario definir un grupo de ejes teóricos que permitieran un control visual de la disposición geométrica y dimensional del objeto y que sirvieran, a su vez, como referencia para su relación con otros modelos.



ESQ. 2

A partir de esta nueva disposición del modelo podían ahora sacarse unas conclusiones bien interesantes. En este caso, al desaparecer las superficies albeadas que cubrían los cuadriláteros, la visualización de los alzados se torna aún más significativa cuando observamos la orientación espacial que adoptan dichos cuadriláteros. En efecto, si analizamos los contornos en cualquiera de las dos posiciones anteriores -en este caso completamente asimilables a secciones efectuadas sobre el eje de simetría del sombrerete- tenemos grandes posibilidades de sospechar que los cuadriláteros albeados se encuentran dispuestos siguiendo aproximadamente un patrón común relacionado con una orientación decididamente vertical. En este primer supuesto, que debería confirmarse con el análisis posterior, estábamos en condiciones de inferir que, si imagináramos cada cuadrilátero limitado por dos planos intersectados en una recta común, el plano superior siempre estaría orientado paralelamente al eje vertical de la chimenea. Esto equivale a decir que las alturas de cada uno de los triángulos superiores que forman los cuadriláteros serán siempre paralelas al eje Z de referencia. En el Esq.3 puede verse esta particular disposición en dos cuadriláteros cualquiera ABCD y DEFG que, en relación a lo dicho precedentemente, quedan orientados según las respectivas alturas h_1 y h_2 .



Esta idea de orientación espacial se vió más reforzada aún cuando se observaba el aspecto que adquirirían los cuadriláteros al ser proyectados en planta y definir figuras

aproximadamente triangulares en lugar de los cuadriláteros que cabía esperar en condiciones diferentes. Si seguíamos los límites de cualquiera de estos triángulos en las proyecciones diédricas podía verse con bastante claridad como las dobles líneas que representaban el sector superior de cada cuadrilátero sugerían en planta la presencia de un plano vertical, tanto sea por su tendencia a situarse según una única línea recta como por la proximidad de las propias líneas entre sí.

Otra cosa resultaba aún más sorprendente: si eliminábamos alguna de las dobles líneas que dificultaban la observación y hacíamos un esfuerzo de abstracción podíamos llegar a ver en el dibujo de la planta una serie de configuraciones poligonales bastante estables que reproducían a diferentes escalas la figura del hexágono que conformaba la propia base del sombrero².

Este era el momento en que me encontraba, indudablemente, ante un descubrimiento que tenía que tener alguna consecuencia importante para la investigación. Sin embargo, debido a que esta era una fase inicial del análisis, no estaba en condiciones de evaluarlo con toda sus implicaciones, por lo que decidí abocarme inmediatamente al próximo paso previsto en el programa de la investigación.

Las series de cuadriláteros.

Esta etapa de la investigación se centraba en el aislamiento y estudio pormenorizado de las características dimensionales y geométricas de las series de cuadriláteros alabeados que conformaban la entera superficie del sombrero.

La primera tarea a realizar obligaba a adoptar un código general de clasificación de modo tal que pudiera ser identificado con claridad cualquiera de los 66 cuadriláteros y los 12 triángulos que recubren integralmente el elemento superior de la chimenea. Para ello se adoptó un criterio de nomenclatura que permitiera vincular los dos modelos de estudio, es decir, este mismo modelo de cuadriláteros con el modelo poligonal desarrollado posteriormente.

En primer lugar se considera un código numérico ordenado en sentido vertical, de tal manera de asignar un número a cada línea de desarrollo anular por donde pasan los vértices de todos los cuadriláteros. Así tendremos que la línea que define la base del sombrero se designa convencionalmente con el número 0 y se comienza a subir hasta llegar a la última línea -el orificio de salida de la chimenea- que tendrá el número 12.

² Este era un claro fenómeno de percepción orientada; se trataba de fijar la atención en la continuidad lineal de los contornos y no en los elementos singulares definidos por las formas triangulares.

Cada uno de los vértices de la base hexagonal es designado con una letra que se mantiene a lo largo de toda la trayectoria de una de las hélices que parten del propio vértice (convencionalmente adoptamos la de *paso a la derecha*). De esta manera tenemos designados todos los vértices de los cuadriláteros, conformado un *mapa* alfanumérico en donde los números representan la posición vertical o "altura" a que se encuentra el punto en cuestión y las letras las series horizontales, de tal manera que combinadas entre sí son capaces de identificar cada punto singular.

Este código puede verse grafiado en el desarrollo de la superficie del sombrero del Plano MR17 y en la clasificación general de los cuadriláteros realizada en el Plano MR7.

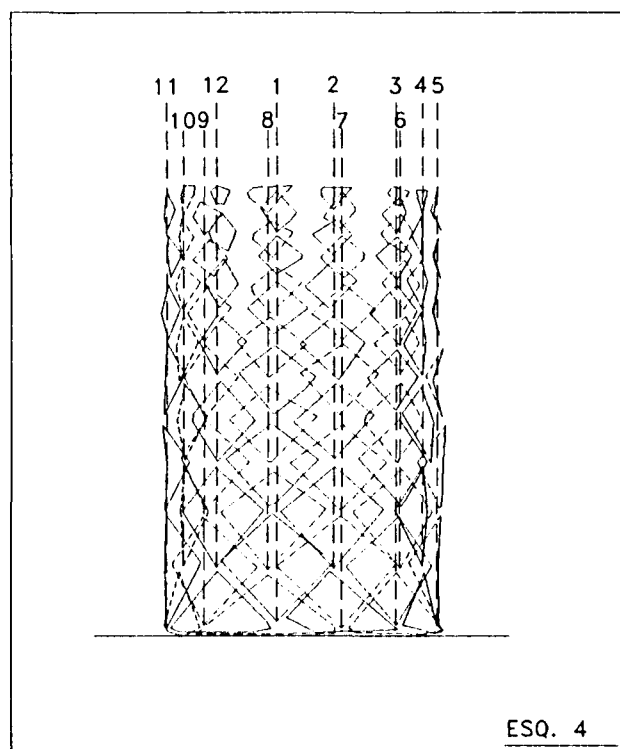
Para designar los cuadriláteros y triángulos se adoptó el criterio de vincular el número de la línea anular que pasa por el eje de cada cuadrilátero (o la base de cada triángulo) con las dos letras que definen los vértices por donde pasa dicha línea. De esta manera, anteponiendo la letra Q o T según se trate de un cuadrilátero o de un triángulo, quedan identificados todos los elementos del conjunto. Al mismo tiempo, las series verticales de cuadriláteros son identificadas con las letras de origen de la base, dividiéndose en *series compuestas* las formadas por cuadriláteros y triángulos y *series simples* las formadas solamente por cuadriláteros.

A partir de este momento estaba todo dispuesto, entonces, para realizar la tarea de análisis geométrico de los cuadriláteros alabeados como entidades individuales, para lo cual era necesario "despegarlos" de la propia superficie del sombrero.

Con el objeto de estudiar las distintas series de los cuadriláteros que se ordenan en forma de filas decrecientes, la primera operación consistió en trasladar cada una de estas series a un plano de trabajo vertical (Esq.4). Es decir, una vez dispuestos unos ejes de referencia que vinculan los vértices superiores e inferiores de los cuadriláteros de cada una de las series, se produce la rotación de cada fila -en el plano definido por el propio eje del cono- hasta que adoptan una posición vertical. Al completar la operación tendremos así definido un cilindro circular cuyas generatrices rectas serán, justamente, estos ejes de referencia de las distintas series de cuadriláteros.

En el Esq.4 puede verse la disposición que adoptan los cuadriláteros en relación a los ejes de referencia comentados y que se encuentran numerados a partir de la serie identificada convencionalmente con el vértice A de la clasificación general.

Para poder trabajar más comodamente con el conjunto de cuadriláteros, efectuamos una especie de *abatimiento* de cada una de las series a un plano vertical. Para ello fue necesario producir un desarrollo de este cilindro sobre nuestro sistema de coordenadas y



ESQ. 4

ordenar de este modo los cuadriláteros sobre el plano³. El resultado puede verse en el Plano MR7, en donde quedan *desplegadas* las 12 series con sus respectivos códigos de identificación.

Tal como acabamos de ver, la primera cuestión que salta a la vista en esta disposición es la alternancia de dos tipos de series diferentes: las que se originan con los triángulos de la base y acaban con otros triángulos en el extremo superior (que estrictamente podrían considerarse *semi cuadriláteros*) y las que empiezan y acaban con cuadriláteros. Las primeras en realidad contienen sólo cinco cuadriláteros completos, mientras que las segundas están compuestas por seis unidades.

Con el objeto de sacar conclusiones acerca de las características geométricas y dimensionales del grupo de cuadriláteros alabeados realizamos dos operaciones básicas que nos definieron, a su vez, dos líneas diferentes de análisis. Previamente, sin embargo, fue necesario trazar, en cada uno de los cuadriláteros, una recta o eje de unión entre los dos vértices situados horizontalmente, es decir la recta común a los dos planos del diedro definidos por los triángulos superior e inferior.

³ Esta operación consistió en un laborioso juego combinado de rotaciones y desplazamientos efectuados en cada uno de los grupos de cuadriláteros. Primero debían desplazarse las series hasta un plano vertical común para luego ser rotadas ortogonalmente a éste mediante cambios en las coordenadas de referencia.

En la primera de estas operaciones realizamos una superposición de todos los elementos de cada serie con el objeto de obtener una visualización y un cierto control dimensional de la reducción proporcional de tamaño experimentada por los cuadriláteros. Esta superposición fue realizada tomando como referencia común el punto medio de la recta obtenida en el procedimiento anterior y trasladando cada elemento en la exacta orientación espacial que tenía en el conjunto. El resultado de la operación con todas las series se ordenó según un eje horizontal común a todas las series de la manera en que puede verse en el mismo Plano MR7.

Este procedimiento nos permitía comenzar a tener una idea de las pautas de proporcionalidad que determinaban las reducciones dimensionales de los cuadriláteros. A pesar de las lógicas fluctuaciones de forma y medida, algunas de las series ya sugerían una cierta constancia de transformación que implicaría la presencia de un factor de reducción aplicable a todos los miembros de la serie. El tema de los factores de proporción era, pues, un tema recogido a partir de este momento como una de las líneas de la investigación y que iba a encontrar su respuesta adecuada en el estudio acerca de la semejanza geométrica de los cuadriláteros desarrollado a partir del modelo teórico, tal como veremos en el capítulo próximo.

Otra de las particularidades que podían observarse en estas series superpuestas tenía que ver con los aspectos dimensionales de las unidades. Debido a la lógica imprecisión constructiva, los cuadriláteros presentaban una fluctuaciones importantes en forma y dimensiones que se hacían evidentes en estos dibujos. No obstante estas desviaciones no parecían totalmente aleatorias, ya que en un buen número de series se podía detectar una tendencia a que los valores de distorsión individual aumentaban conforme el tamaño de los cuadriláteros se iba reduciendo⁴. Este fenómeno, también muy razonable desde el punto de vista técnico y constructivo, sería corroborado de igual manera en un estadio posterior de la investigación y por otros procedimientos diferentes.

El problema de las variaciones dimensionales de los cuadriláteros se pone aún más en evidencia cuando efectuamos la segunda de las operaciones previstas. En este tratamiento se planteaba ahora una trabajo en cierto modo opuesto al anterior y que consistía en la superposición de los cuadriláteros homólogos de cada circuito horizontal. El resultado de esta operación se traduce en una disposición como la que puede verse en el Plano MR8, en el que se representan los dos tipos de series características en donde ha sido efectuada una *condensación* de todos los cuadriláteros semejantes.

Aquí nuevamente los cuadriláteros fueron relacionados a partir de un punto común

⁴ Si se observan las características de los cuadriláteros que se desarrollan a partir de las líneas 6 o 7 y llegan hasta el remate de la chimenea podrá comprobarse esta particularidad comentada aquí.

definido por la recta de unión de sus vértices y trasladados en la exacta posición espacial que mantenían en su ubicación original, incluso conservando las separaciones entre sí determinadas por las juntas de unión.

En esta nueva disposición es posible calibrar aún con más rigor el espectro de variación dimensional de las unidades de cada hilera. En este caso se confirma, desde otro ángulo del estudio, la tendencia apuntada anteriormente respecto al aumento de las diferencias en las unidades superiores de las series. Esto puede observarse especialmente en los cuadriláteros de las líneas 4,5,7,8,10,11 y 12, cuyas deformaciones aumentan notablemente en relación a sus tamaños.

Algunas excepciones a esta tendencia, como la importante variación experimentada por los triángulos de la base, apuntan también a razones de tipo constructivo, ya que dentro de una importante franja media del cuerpo del sombrero el resto de los cuadriláteros presentan una razonable estabilidad de forma.

Mediante esta disposición también es posible observar la desviación angular, respecto de la posición horizontal teórica, de las líneas que unen, para cada cuadrilátero, los dos vértices no situados en el plano de simetría. Este fenómeno es particularmente visible gracias a la línea de referencia de los cuadriláteros, que gira de este modo alrededor del punto central describiendo gráficamente la magnitud de la rotación experimentada en cada caso. Nuevamente podemos constatar un aumento de las deformaciones de las unidades conforme ascendemos por las series de cuadriláteros, en clara sintonía con lo comentado anteriormente.

Finalmente, el otro aspecto importante del estudio de la estabilidad física de los cuadriláteros alabeados lo constituye el análisis de las variaciones angulares que experimentan los elementos respecto a los dos planos virtuales que imaginamos definen a cada cuadrilátero. Este estudio -que puede verse en el Plano MR8 y que está realizado a partir de una visualización lateral de los dos grupos de series anteriores- permite establecer una rápida evaluación de las alteraciones angulares que experimentan los cuadriláteros y que repercutirán posteriormente en la definición de las superficies alabeadas que estos propios cuadriláteros delimitan. La magnitud de esta variación angular queda evidenciada gráficamente mediante la identificación de los valores extremos de cada grupo, obtenidos por la prolongación de las direcciones de los planos triangulares de los cuadriláteros, tal como puede verse en el mismo Plano MR8.

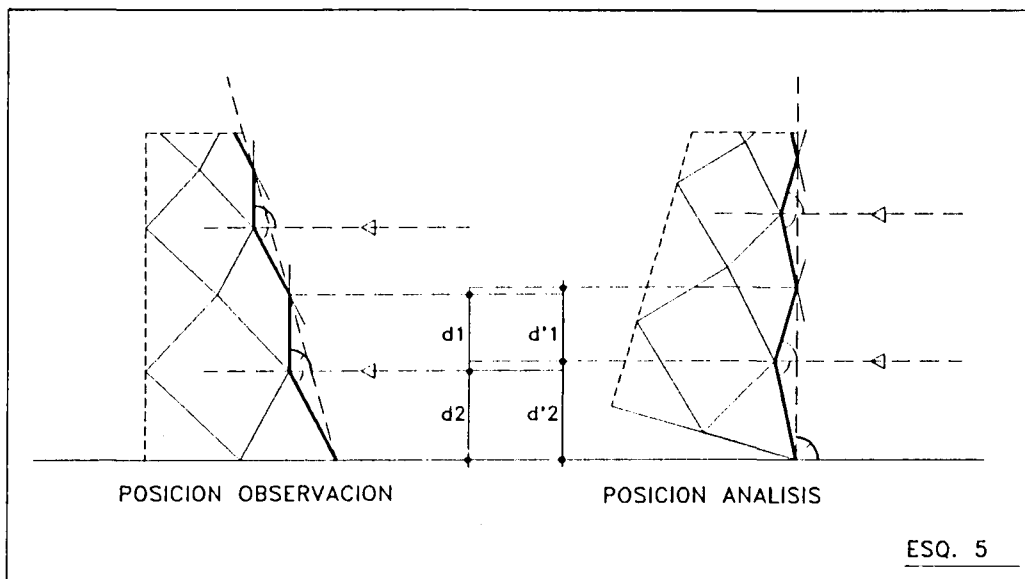
Simultáneamente también pudieron comprobarse las variaciones experimentadas en los cuadriláteros en cuanto a su rotación, tomando nuevamente como elemento de relación la recta de referencia de los cuadriláteros (que debería visualizarse idealmente de canto), por lo que los cuadriláteros se muestran con ligeros *escorzos* respecto a una posición teórica ideal. Las tendencias de las desviaciones siguen un camino similar a los casos anteriores, agudizándose en el extremo superior del sombrero.

La conclusión más interesante de esta etapa de la investigación vendrá, sin embargo, al realizar las primeras comprobaciones acerca de la proporción individual de los cuadriláteros.

De este inicial estudio de la forma y dimensiones de los cuadriláteros de la chimenea se deduce una cuestión bien interesante: *los lados de estos elementos no definen cuadriláteros regulares*, contrariamente a lo que podía intuirse en un primer momento.

La comprobación de que, para todos los casos, los lados del cuadrilátero que describen el triángulo superior sean de una dimensión sensiblemente inferior a los del triángulo inferior, nos hizo pensar que esta no era una cuestión debida al puro azar.

De todas maneras subsistían las dudas acerca del sentido real que podía tener esta particularidad geométrica. ¿Era producto de una necesidad puramente constructiva o estaba relacionado con cuestiones de construcción geométrica? En todo caso ¿buscaba Gaudí con esta manipulación algún efecto estético o perceptivo determinado?



Lo interesante era que este fenómeno se reveló inmediatamente al disponer las series de cuadriláteros en la posición frontal descrita anteriormente (Esq.5), es decir, al colocar los cuadriláteros perpendicularmente a la dirección de nuestra visión, una posición jamás experimentada en nuestra percepción real de la chimenea, dirigida a ver siempre en *escorzo*

esta superficie. Esta primera impresión puramente visual pudo ser verificada inmediatamente al realizarse las mediciones correspondientes sobre el modelo y establecerse unos valores estadísticos. En el Esq.5 pueden verse las diferencias de proporción resultantes entre una y otra posición respecto a nuestra ubicación hipotética como observadores.

Lo cierto es que, proponiéndoselo o no, Gaudí lograba de esta manera una cierta *adaptación* perceptiva de la forma de los cuadriláteros que, de ser perfectamente regulares, hubieran provocado una visión deformada de sus proporciones a causa de la disminución perspectiva de sus lados inferiores.

Es un dato conocido que Gaudí había dedicado una buena cantidad de tiempo a experimentar con las correcciones ópticas en los monumentos y, especialmente durante el largo período de obras en la Sagrada Familia, con las modificaciones en las proporciones de las estatuas que debían colocarse a grandes alturas. Incluso, parte de sus reflexiones acerca de este tema fueron escritas tempranamente en el ya mencionado Manuscrito de Reus⁵.

No estamos aquí en condiciones de dilucidar esta cuestión ni es un objetivo prioritario de esta tesis, pero una hipótesis en este sentido no parece tan descabellada. Pensemos que debido a la peculiar orientación de los cuadriláteros -con el triángulo superior en posición frontal y, por tanto, en *verdadera magnitud* según una dirección estrictamente ortogonal a su plano- Gaudí creyó necesario sobredimensionar los lados inferiores de los cuadriláteros a fin de compensar las distorsiones debidas a la percepción. Podemos verificar rápidamente y de una manera muy empírica que este método, aunque no responda a un estudio geométrico preciso y esté guiado por parámetros puramente intuitivos, resulta bastante eficiente y cumple sobradamente con su cometido. Bastará para ello realizar una simple aproximación de la dirección posible de las visuales de un hipotético observador situado en distintos puntos de la terraza. Se comprobará rápidamente que estas visuales, dentro de un espectro de variación angular que nunca llega a situarse por encima de una dirección ortogonal al eje de la chimenea, restituyen una imagen bastante proporcionada de los cuadriláteros. La observación de cualquiera de las fotografías de la chimenea tomadas desde la propia terraza que aparecen en esta tesis no hacen sino corroborar este comentario.

Sin embargo, y como apuntábamos anteriormente, lo realmente importante para el rumbo de esta investigación era que se había detectado esta característica geométrica en la configuración de los cuadriláteros y que había que orientar el análisis con el objeto de indagar acerca de su forma de generación y sus propiedades geométricas.

⁵ PUIG BOADA, Isidre, *El pensament de Gaudí, op. cit.*, pp.58-62.

EL MODELO POLIGONAL

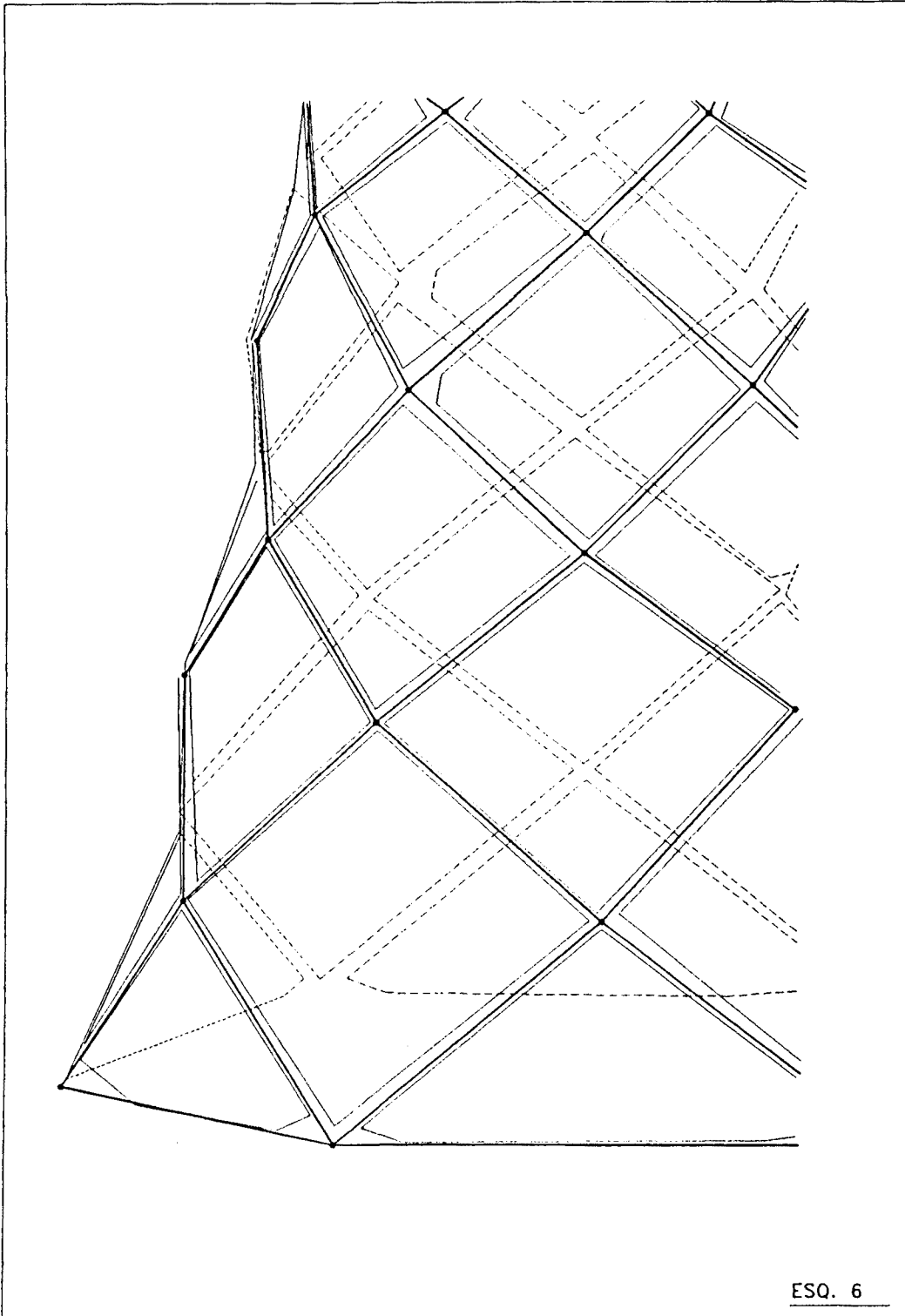
Para un estudio de las hélices y las envolventes de elemento superior de la chimenea se hacía necesario crear un modelo *simplificado* que posibilitara un análisis más preciso de los desarrollos puramente lineales que se generaban sobre la superficie del cuerpo. Partiendo del primer modelo de cuadriláteros obtenido por eliminación de las piezas de revestimiento, estábamos en condiciones de producir nuestro segundo objeto de estudio. Para ello fue necesario crear una red de segmentos de rectas que iban trazándose sobre el *eje* de la zona de separación que definían cada junta entre cuadrilátero y cuadrilátero (Esq.6). Al tratarse de una zona "vacía" (esta junta no tenía materialidad alguna en el modelo) el proceso resultó bastante arduo, especialmente en lo que hacía a la determinación del origen y final de cada segmento⁶. En el Esq.6 puede observarse un fragmento del modelo en donde se han trazado las líneas que definen la red poligonal.

Una vez completado el trazado de estos segmentos y comprobando la correcta unión de todos sus extremos, teníamos un modelo absolutamente lineal en 3D que representaba la situación espacial de las poligonales que envolvían en sentidos opuestos toda la superficie del sombrero. Es decir, nos encontrábamos con el desarrollo en el espacio de un conjunto de *poligonales alabeadas* que representaban una aproximación a los recorridos de las hélices cónicas alrededor del cuerpo. Estos recorridos podían ser además perfectamente identificados gracias a la codificación adoptada previamente con el objeto de designar cada uno de los vértices. En el Plano MR17 puede verse, en una operación de desarrollo del conjunto sobre un plano, el aspecto que presenta esta configuración.

En este nuevo modelo, que adquiría un grado de abstracción muy superior al precedente, las visualizaciones en proyección ortogonal del Plano MR9 resultaban ahora más claras y las pequeñas desviaciones dimensionales quedaban mucho más en evidencia que con el modelo de los cuadriláteros. En los contornos de los alzados podían detectarse con más precisión las posiciones paralelas al eje vertical y las proporciones de las mallas poligonales, tal y como puede verse en el Plano MR9.

Sin embargo, lo que ahora resultaba de indudable valor era la proyección en planta, que revelaba toda su potencia como figura clave en la interpretación geométrica del sombrero de la chimenea. En su trazado, liberado ahora de las dobles líneas que definían los cuadriláteros en el modelo anterior, se pueden constatar las dos características

⁶ El recurso empleado era, por lo general, el de crear una serie de líneas auxiliares que partían de los vértices de los cuadriláteros, creando una suerte de *red* que quedaba suspendida en el vacío y que servía para vincular los distintos tramos de los segmentos rectilíneos. En determinados casos singulares, sin embargo, se debió echar mano a otros recursos más complicados.



esenciales siguientes que serán de gran utilidad para la investigación:

a) al comprobarse la tendencia generalizada que tienen los lados superiores de los cuadriláteros a asumir la configuración de una línea recta en la unión de los dos segmentos, *se confirma definitivamente la posición espacial de los mismos deducida de la primera observación del modelo;*

b) justamente, al definirse estas líneas como rectas, nos permiten ver con toda claridad -ahora ya sin lugar a dudas- el dibujo de un *sistema de hexágonos decrecientes* que acaba en la propia boca del elemento de remate definiendo el hexágono más pequeño de la serie.

Esta última revelación -ya intuída en el modelo de cuadriláteros- era sin duda alguna la más trascendente hasta este momento de la investigación. Resultaba evidente que en esta figura debía estar la clave de la generación geométrica de este cuerpo y, por tanto, en esa dirección se tenían que dirigir todos los esfuerzos del trabajo.

La primera conclusión que se deriva directamente de la observación del modelo es que los hexágonos se van vinculando mutuamente *inscribiéndose* uno dentro del otro, girándose de manera tal que el vértice del inferior coincida con el punto medio del lado del hexágono que lo contiene y así sucesivamente. En otras palabras, todos los vértices de la poligonal, al colocarse en proyección horizontal, se proyectan como los vértices de una serie de hexágonos concéntricos decrecientes que se van rotando alternativamente hasta alcanzar el orificio de salida de la chimenea.

Esta propiedad remite inmediatamente a su formulación inversa: si cada uno de los vértices de las poligonales en el espacio guardan una relación directa con este sistema de hexágonos decrecientes, también sería posible recíprocamente el trazado de la red poligonal por medio de estas figuras colocadas a las alturas adecuadas.

Partiendo de esta hipótesis se elaboró un nuevo dibujo 3D a partir del modelo restituido (Plano MR11), en donde fueron vinculados gráficamente ambos conceptos: la idea de los hexágonos y la red poligonal en el espacio. Con ese objetivo fueron unidos mediante líneas rectas todos los vértices de la poligonal comprendidos en cada circuito horizontal, con lo que naturalmente obteníamos la aproximación a una figura hexagonal que resultaba en este caso levemente alabeada debido a las pequeñas diferencias de cota en altura de los vértices. El resultado de esta operación puede comprobarse en el Plano MR11, en donde quedan indicadas cada una de estas figuras hexagonales y la identificación de sus puntos de paso por poligonal.

La eficacia del procedimiento pudo ser rápidamente verificada con la proyección en planta, en donde quedan superpuestos los dos trazados: el de los hexágonos horizontales

y la proyección de los vértices poligonales. Como puede apreciarse en el Plano MR12, las aproximaciones entre ambos son realmente significativas. En esta disposición las zonas coloreadas indican las discrepancias entre ambas proyecciones, pudiéndose seguir su evolución en el desarrollo de todos los puntos del modelo.

Ya no quedaba duda alguna que éste era el procedimiento geométrico que servía para generar la entera forma del sombrerete y que, con toda probabilidad, aplicó Gaudí para construirlo.

De todos modos aún quedaban algunos aspectos sin resolver. Entre ellos había uno que preocupaba especialmente y era el problema del factor de proporcionalidad de los cuadriláteros, un problema que estaba relacionado directamente con las cotas a las que había que ir situando los hexágonos para determinar los vértices correspondientes. Este era un tema de real importancia ya que afectaba no sólo a la proporción adecuada de los cuadriláteros sino a la entera volumetría del sombrerete. Volveremos sobre él en el momento de plantear la construcción de un modelo teórico de la chimenea, tarea que realizaremos en el siguiente capítulo.

Las hélices.

Para plantear la idea de las hélices dentro del contexto de la investigación, es conveniente referir sus desarrollos en relación al trazado del *cono envolvente* contenido en nuestro modelo de estudio. Este es un ejercicio que resulta no solamente útil desde el punto de vista conceptual sino que además se muestra especialmente ilustrativo respecto al control de las fluctuaciones de forma y dimensiones de toda la geometría del elemento en cuestión.

La manera más sencilla de realizar una aproximación a este cono exterior es mediante la definición de sus diferentes generatrices rectas y los desarrollos circulares de secciones horizontales en los distintos puntos de paso de la poligonal alabeada (Plano MR13). En nuestro modelo de trabajo, y partiendo nuevamente del modelo poligonal, nos limitamos a definir la primera de estas operaciones mediante la unión de cada uno de los vértices superior e inferior de los cuadriláteros de cada serie, obteniendo de este modo una sucesión de segmentos que tienden a proximarse a una línea recta. Las líneas así definidas se corresponden a cada una de las respectivas series simples y compuestas del modelo y constituyen una aproximación a las rectas generatrices del cono envolvente.

La segunda operación realizada sobre el modelo poligonal consistió en la unión de todos los vértices situados en cada desarrollo horizontal por medio del trazado de arcos de circunferencia consecutivos. Es decir que en este caso las series de puntos unidos se corresponden con un *número de orden* diferenciado para cada revolución alrededor del elemento. De esta manera se obtenía la sucesión A0,B0,C0,D0,E0,F0 para la base del

cono, la siguiente A1,B1,C1,D1,E1,F1 en el primer *anillo* y así sucesivamente hasta llegar a la que define el truncamiento del cono, que tiene el número 12 como referencia. El procedimiento puede comprobarse en los planos MR13 y MR14 a partir de la visualización en planta y proyección axonométrica del modelo, en donde pueden constatarse los desarrollos horizontales y verticales antes mencionados y su correspondiente codificación numérica.

De esta manera habíamos trazado una aproximación al cono de revolución que circunscribe el conjunto de vértices poligonales, en donde cada una de las secciones perpendiculares al eje que pasan por los puntos de la poligonal son en realidad las aproximaciones a las circunferencias directrices que determinan los correspondientes hexágonos inscritos de tamaño decreciente que, tal como vimos hace un momento, generaban la completa geometría del elemento.

Es importante, sin embargo, realizar un par de advertencias respecto a los criterios adoptados a la hora de efectuar estos trazados. Es conveniente insistir que en este caso estamos hablando de *aproximaciones* geométricas que nos pueden dar una idea de la configuración del conjunto pero que carecen de rigor geométrico. Tal como vimos, las rectas generatrices del cono que habíamos determinado no eran realmente rectas sino un grupo de segmentos rectos unidos entre sí que presentaban una tendencia a alinearse según una recta. Algo similar ocurre con el trazado de los anillos decrecientes, que de entrada no constituyen curvas planas debido a las pequeñas diferencias en las cotas altimétricas presentadas por los punto de paso.

Para realizar el dibujo de estas aproximaciones a circunferencias fue necesario también tomar determinadas *licencias* a la hora de determinar los criterios de trazado, ya que era condición esencial el paso por todos y cada uno de los puntos correspondientes de la poligonal. De esta manera, se optó por efectuar una simplificación del problema mediante la unión de tres arcos consecutivos, en donde cada uno de ellos era trazado según tres puntos de paso contiguos. Esta limitación presentaba, lógicamente, un trazado ligeramente desviado en proyección horizontal. Las distorsiones producidas por este procedimiento resultaban, no obstante, perfectamente tolerables en relación con los objetivos que perseguíamos.

Una interés adicional tendría la observación de la configuración final adoptado por el *cono virtual* que envuelve la superficie de la chimenea. En este caso el interés estaba motivado principalmente por la claridad con que podían observarse determinadas tendencias respecto a las variaciones dimensionales del cuerpo en cuestión. Este fenómeno, que podríamos denominar como *constancia de la forma*, es especialmente visible en el dibujo en planta del modelo propuesto en el Plano MR14. Si observamos los diferentes anillos - proyectados ahora como aproximaciones a circunferencias concéntricas- podremos comprobar como, a medida que nos aproximamos al centro, las desviaciones respecto a un

patrón ideal aumentan considerablemente. Estas desviaciones no son otra cosa que una visualización -si se quiere más *gráfica*- de los problemas que ya habíamos detectado en otros momentos de la investigación respecto a la tendencia a la distorsión creciente que experimentaban los grupos de cuadriláteros a medida que ascendían en los distintos "niveles" del sombrerete. Esta particularidad queda corroborada asimismo con el aspecto que presentan en la misma proyección los segmentos equivalentes a las generatrices del cono. Aquí la distorsión es aún más evidente: observemos como a partir de los anillos números 5 o 6 la tendencia a la configuración recta mantenida hasta ese momento queda completamente desvirtuada. En la axonometría del mismo modelo, orientada de manera tal de hacer coincidir los contornos aparentes con dos de las generatrices, se puede detectar igualmente esta tendencia a la distorsión que se traduce en la fractura de la continuidad de los segmentos. Paralelamente, queda puesto en evidencia el alabeo producido en las curvas debido a la situación espacial de los puntos.

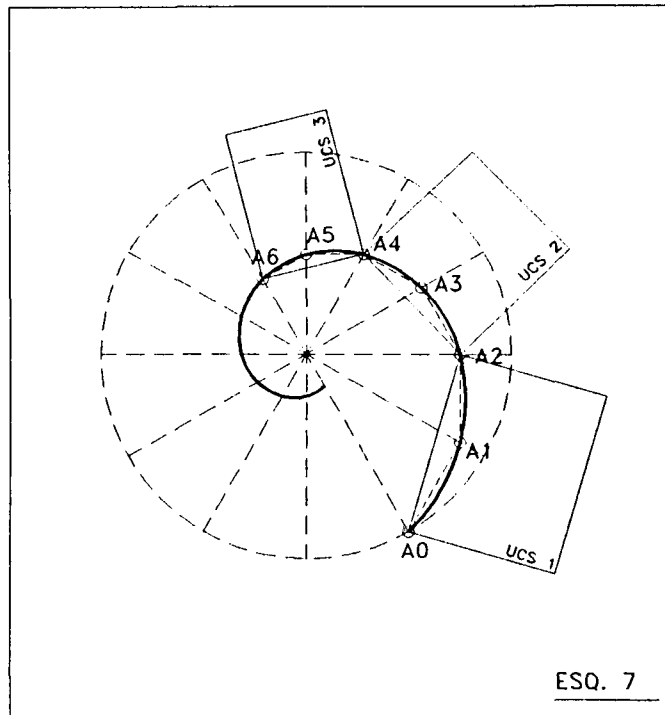
El criterio adoptado para el dibujo de las hélices que, pasando por cada punto de la red poligonal estarían describiéndose sobre la superficie de este cono envolvente, es otro de lo temas que requiere un comentario aclaratorio.

El hecho de encontrarme frente al compromiso de respetar el paso de la curva por cada uno de los puntos de referencia de la red me enfrentaba a forzar otra *licencia* al rigor geométrico. En este caso, al desconocer los puntos intermedios del paso de la hélice (y sabiendo que los puntos de referencia son sólo aproximaciones) me debía contentar con utilizar un método lo suficientemente ágil y operativo que me permitiera una primera visualización de las hélices en cuestión. Para ello fue necesario echar mano nuevamente al trazado mediante arcos de circunferencias encadenados.

El procedimiento seguido en este caso -que puede verse en el Esq.7- consistía en ir tomando tres puntos consecutivos de paso y, sobre el plano así determinado, trazar un arco de circunferencia. Para el próximo tramo de la curva era necesario fijar un nuevo plano de trazado y así ir operando sucesivamente⁷. En la planta del Esq.7 puede seguirse la construcción de una cualquiera de estas hélices mediante este procedimiento. En este caso las diferentes UCS del dibujo informatizado representan los planos de trazado comentados más arriba.

De esta manera, de una forma ordenada y sistemática se fueron dibujando cada una de las doce espirales que constituyen el cuerpo del sombrerete.

⁷ Desde el punto de vista técnico-operativo esto era posible determinando un nuevo emplazamiento del sistema de coordenadas (en este caso las UCS del programa AUTOCAD) para cada plano sucesivo de trazado, con lo que eran creados de manera encadenada los diferentes planos sobre los que eran construidos los arcos.

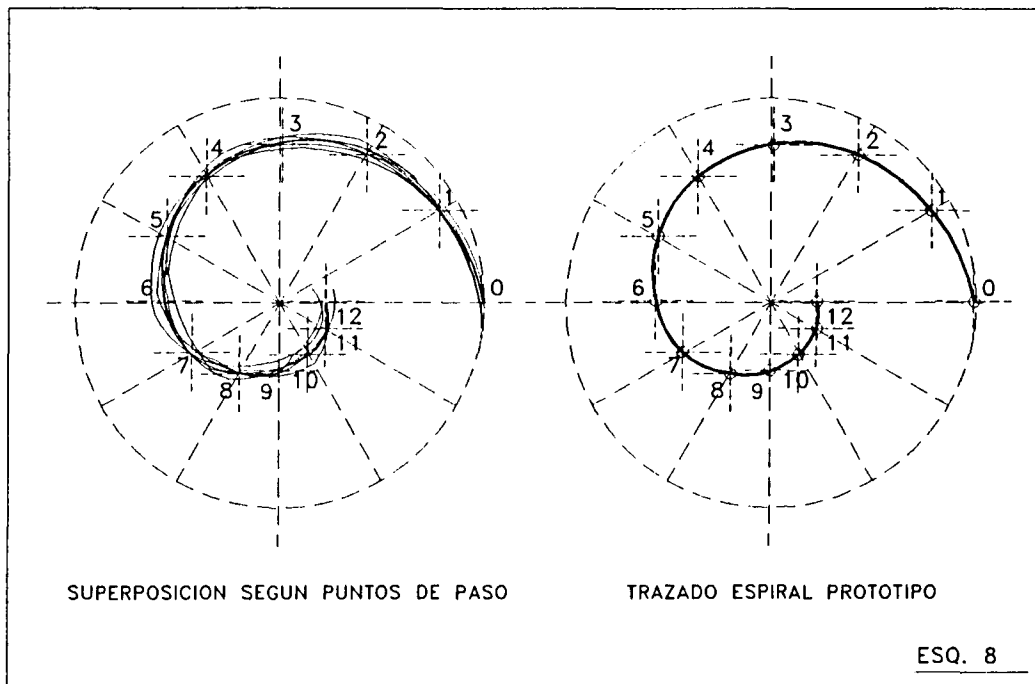


En el Plano MR15 puede verse el resultado de la superposición de las hélices dibujadas con la red poligonal que le sirvió de base con la identificación de cada un de los puntos de paso. En el Plano MR16, en cambio, se han dibujado sólo las hélices para que pueda apreciarse el aspecto de las mismas según las posiciones de estudio y el control dimensional de referencia.

Respecto al tema del criterio seguido para el trazado de las curvas era evidente que, en este primer acercamiento al modelo, las limitaciones geométricas de una generalización como la precedente no podían afectar de una manera contundente a los resultados de la investigación. Pensemos que en esta etapa del análisis la tarea más importante era la identificación de la presencia de un grupo determinado de hélices. Quedaba en un segundo término, pues, la afiliación de estas curvas a ciertas leyes de generación geométrica concretas, tema que sería estudiado posteriormente a partir de un modelo *ideal* capaz de ofrecer una mayor garantía teórica. Dentro de este contexto, los métodos de trazado de las hélices serían revisados y comprobados para conseguir una mayor aproximación a los referentes teóricos.

Realizada esta advertencia, que intenta definir los límites en que nos movemos en este momento del análisis, podemos ahora intentar la formulación de algunas hipótesis de trabajo acerca del tipo de curva creada a partir de la definición de estas hélices y de su proyección ortogonal.

Para conseguir una aproximación a las características geométricas del tipo de hélice cónica que definen estas curvas partimos, inversamente, del fragmento de espiral que esta misma hélice describe al ser proyectada en planta (Esq.8). Mediante un proceso de comparación basado en la superposición gráfica de las doce espirales del elemento en relación a los puntos de paso que fijan los vértices de la poligonal, se consiguió aislar una espiral más o menos *representativa* del grupo, que sirviera para realizar las primeras aproximaciones de estudio. Para ello fue necesario colocar en la misma posición relativa a las doce espirales que aparecen dibujadas en la planta del Plano MR15 y eliminar todas aquellas que, debido a desviaciones notables en su trazado, se apartaban considerablemente de un promedio más o menos estadístico. Posteriormente, sobre el número bastante exiguo de unidades que quedaban fue trazada una *espiral prototipo* que representaba los rasgos comunes de todas las unidades del conjunto. En el Esq.8 pueden seguirse las dos etapas del procedimiento empleado. En el dibujo de la izquierda aparecen dibujadas las espirales del grupo que presentaban una mayor afinidad. En el siguiente se puede ver el trazado de esta espiral prototipo a partir de sus puntos de paso.



Las primeras aproximaciones visuales y gráficas más elementales permitían descartar completamente la posibilidad de que se tratase de una espiral de tipo ordinaria o *regular*, ya que las evoluciones de la curva sobre un hipotético origen (que estaría representado por

el vértice del cono envolvente y por lo tanto sería el punto asintótico de la hélice) en relación con cualquier punto del radio vector aumentaban notablemente. Sin embargo, debido en gran medida a las deformaciones de la curva y al escaso tramo de la misma que teníamos como referencia, resultaba mucho más difícil en cambio poder determinar, con un razonable grado de aproximación, a cuales de las distintas espirales de movimiento no uniforme pertenecía ésta que estábamos analizando. Ciertas características sugeridas por la tendencia en que parecía evolucionar la curva en planta y el gesto que adquiriría al ser observada como hélice en el alzado nos inducía a pensar que estábamos frente al caso de una espiral logarítmica derivada de una hélice loxodrómica⁸. De todas maneras parecía demasiado prematuro sacar conclusiones con los elementos de análisis que se tenían en ese momento, por lo que esta conjetura sólo quedaba como un punto de referencia a tener en cuenta para ser desarrollada con el estudio del modelo teórico.

Finalmente, es posible tener una idea bastante aproximada del aspecto que tendría toda la superficie del sombrero si fuera desarrollado sobre un plano. En el Plano MR17 puede verse como, retomando el modelo poligonal, podemos efectuar una operación de desarrollo a partir del método clásico que consiste en el abatimiento sobre un plano común de la fracción de superficie comprendida entre dos generatrices consecutivas. En este caso elegimos las mismas generatrices ya definidas para el estudio del cono envolvente, por lo que podemos situar en un mismo esquema la proyección de toda la red de líneas poligonales, con lo que obtenemos un dibujo que nos da una idea aproximada del trazado que adoptan las hélices al ser desarrolladas sobre un plano.

La operativa seguida en este caso es similar a la efectuada para el aislamiento de las series de cuadriláteros descrita en este mismo capítulo, sólo que en este caso las series son agrupadas según generatrices comunes y desplegadas sobre el plano habitual de trabajo.

Es evidente que este sistema está lejos de ser un método preciso, debido entre otras cosas a la obligada *regularización* de las generatrices para traducirlas en rectas y los diferentes alabeos que presentan las poligonales, que se expresan en forma de desplazamientos de los puntos de intersección. No obstante, el esquema nos permitió reflexionar acerca de las posibilidades de que un método de este tipo hubiera podido ser utilizado por Gaudí para la generación geométrica del sombrero, ya que parecía relativamente práctico disponer el trazado sobre un plano flexible para luego replantear los puntos sobre la superficie del objeto.

Las primeras conclusiones, derivadas en parte de la observación de la evolución de estos mismos trazados sobre un plano y en parte por la lógica de otras propuestas mucho más sencillas, nos hicieron descartar rápidamente la posibilidad de utilización del sistema

⁸ Ver Capítulo II, p.38.

de desarrollo gráfico como método de generación y construcción de la chimenea. La manera de trabajo de Gaudí, más orientada a un cierto dinamismo en los procedimientos de obra, era otra referencia obligada para la orientación que estaba tomando la investigación en este momento.

CAPÍTULO VI EL MODELO TEÓRICO

El sentido de un modelo teórico.

El planteamiento de un modelo teórico o *ideal* de un objeto para su investigación siempre comporta un riesgo de enfoque conceptual. Con el alto grado de esquematización que propone un modelo de este tipo estamos en cierta medida simplificando excesivamente el problema y corremos el riesgo de dejarnos en el camino cuestiones importantes. Este tema adquiere una mayor complejidad cuando se trata de trabajar con las formas de Gaudí.

El estudio y la consiguiente representación de la arquitectura de Gaudí siempre ha inducido a la necesidad de una especie de *depuración* de la forma que haga más inteligible sus contenidos geométricos, en la creencia de que de esta manera se ganaba en expresividad y que la comunicación de los valores propios de la obra resultaba más fluida. Esta actitud, dicho sea de paso, tiene muchas veces que ver también con una manifiesta incapacidad del investigador para comprender y dibujar la complejidad de la obra gaudiniana. Ejemplos de esto que acabo de decir se pueden ver corrientemente en la apabullante gráfica divulgativa producida por medios informáticos para ilustrar las obras del arquitecto. También existen trabajos de investigación en donde la representación gráfica o informática busca expresamente una reducción de los contenidos formales de obras completas o fragmentos de las mismas, reduciéndolas a figuras y formas más elementales - y por tanto más *asimilables* perceptivamente- del vocabulario geométrico¹.

Esta reflexión nos sugiere una cierta cautela en el uso de estos recursos teóricos, a la vez que nos obliga a una clara definición de los objetivos y del destino concreto de nuestro modelo en el propio marco de la investigación.

En nuestro caso, sin embargo, la creación de un modelo ideal de trabajo se iba convirtiendo en una pieza esencial del mecanismo de análisis debido, entre otras cosas, a tres objetivos prioritarios.

En primer lugar, la propia dinámica de la investigación nos había colocado en el compromiso de demostrar de qué manera se generaba geoméricamente la superficie del

¹ Uno de los trabajos más ilustrativos de esta tendencia lo constituye una investigación gráfica del campanario y la fachada del Nacimiento de la Sagrada Familia presentada en un congreso en Milán y publicada posteriormente. La investigación de estos fragmentos arquitectónicos del templo partía de un levantamiento fotogramétrico muy elemental de tipo digital para acabar en un tratamiento de imágenes *wire-frame* desarrollado mediante un programa CAD. El proceso consistía básicamente en la separación y el tratamiento *geometrizado* de cada parte individual para luego ser reinsertadas en el conjunto. (MEZZETI, Carlo, "La Sagrada Familia, lettura storico-grafica di un'opera incompiuta, ma non interrotta", AAVV, *Antoni Gaudí: Una proposta di libertà*, Milano, Ed. Gajani, 1994)

cuerpo del sombrerete. Los datos recabados de la aproximación geométrica ensayada en el modelo restituido permitían elaborar ciertas hipótesis al respecto, pero sólo una aplicación concreta del método de generación en un caso de *laboratorio* podía confirmar su validez. Se trataba de restituir la formulación geométrica de la chimenea desde el origen, contando sólo con el conjunto de principios que habíamos deducido del modelo real. En este sentido nos encontrábamos en un punto ciertamente crítico, ya que un fracaso en la aplicación del método difícilmente podría haber hecho avanzar la investigación. Se trataba entonces de partir de la idea de que las figuras de los hexágonos girados que aparecían en la planta del sombrerete constituían el *elemento generador básico* de la geometría del modelo para, de esta manera, elaborar un método de construcción verificable en un modelo teórico.

Superando esta condición imprescindible estaríamos en condiciones de verificar los otros dos objetivos iniciales, de los cuales uno muy importante tenía que ver con los instrumentos del análisis geométrico propiamente dicho. Se trataba en este caso del estudio de determinadas propiedades del modelo restituido, ya esbozadas en el curso del análisis, pero que necesitaban del rigor del modelo teórico para su confirmación o eventual rectificación. Entre estas propiedades estaban algunas más evidentes como el estudio de las series homotéticas de cuadriláteros y otras -menos *nítidas* en el modelo restituido- como es el caso de las hélices cónicas y las espirales obtenidas por proyección.

Finalmente, la elaboración de un modelo teórico comportaba necesariamente unas conclusiones derivadas de la comparación con el modelo real. Este análisis comparativo tiene como prioridad la verificación del rigor del método de generación y una estimación de las desviaciones producidas en el modelo restituido respecto al modelo ideal. Estas comprobaciones, si el método seguido es el correcto, están ligadas básicamente a problemas dimensionales y de proporciones de las partes que son evaluados generalmente de forma gráfica, aunque en muchos casos parecía interesante contar con una verificación numérica. La facilidad que nos brindan los métodos informáticos en relación a la información métrica contenida en el modelo no debía ser desaprovechada, aunque vale la pena subrayar que en este caso el tema estadístico no era prioridad de nuestra investigación. A partir del método comparativo podrían ser evaluadas, entre otras, las variaciones dimensionales en la totalidad del cuerpo del sombrerete, la estabilidad de la forma de los cuadriláteros, las desviaciones en el trazado de las hélices y espirales, etc.

El otro tema esencial a la hora de adoptar nuestro modelo de trabajo fue el de definir qué tipo de modelo pretendíamos crear. Esta reflexión tenía como punto de partida la herramienta que íbamos a utilizar para crearlo y los parámetros operativos con los que era necesario trabajar. No había duda alguna de que el medio informático era el más idóneo para esta tarea. Aparte de la necesidad de una continuidad respecto a la etapa de trabajo anterior, el rigor métrico necesario para producir un modelo geométrico de estas

características sólo podía conseguirse mediante el empleo de un sistema CAD. Sin embargo es necesario hacer una advertencia sobre este tema. Por lo general se tiende a asociar, de una manera directamente proporcional, la sofisticación y potencia de los equipos informáticos con la calidad de los trabajos producidos. En este punto es necesario nuevamente anteponer los objetivos perseguidos a los resultados deseados. Tanto para la primera etapa de edición del modelo restituido como para la elaboración del modelo teórico fue utilizado un equipo bastante elemental, consistente en un *hardware* PC y un programa AUTOCAD de dibujo. Las necesidades planteadas no requerían de una mayor sofisticación: se trataba de generar un modelo 3D que, para la mayoría de las operaciones, era básicamente lineal (lo que comúnmente se denomina un *modelo alámbrico*) y que sólo en determinadas condiciones debía ser modelado como superficie. Estábamos, pues, en condiciones de trabajar con un modelo ágil y eficiente que se ajustaba específicamente a nuestros objetivos.

El proceso de trabajo propuesto para la definición del modelo teórico era en alguna manera inverso al seguido con el modelo restituido. En esta primera etapa fuimos en cierto sentido *despojando* de materialidad al modelo inicial. Primero fue la progresiva desaparición de los elementos de revestimiento, después el aislamiento de los cuadriláteros para, finalmente, quedarnos sólo con el *esqueleto* que formaba la red poligonal.

Para la elaboración del modelo teórico aquí descrito, en cambio, partíamos de un procedimiento geométrico-constructivo para definir, justamente, un punto de partida que era el resultado final obtenido en el modelo anterior. Es decir que se trataba de crear un modelo poligonal inicial a partir del cual se irían desarrollando las distintas etapas del proceso, una vez confirmada la eficacia del método de generación adoptado.

De esta manera, a partir de la verificación de la idoneidad del sistema, comenzamos a avanzar en el análisis del modelo completando las diversas intervenciones hasta llegar a una materialización final del mismo mediante la incorporación de las superficies alabeadas. Como veremos inmediatamente, el punto más crítico del proceso estaba justamente en el ajuste y puesta a punto del procedimiento idóneo de generación geométrica. En este sentido el camino no fue tan directo, ya que se hizo necesario operar por aproximaciones previas hasta encontrar el sistema correcto.

Cuestiones acerca de la generación del modelo.

El punto de partida para definir los parámetros específicos de generación del modelo teórico consistió en una evaluación dimensional y un estudio estadístico de la realidad física de la chimenea, representada en este caso por el modelo restituido. Si partíamos de la base

que el origen de la configuración geométrica del modelo era la figura de la planta, se hacía necesario evaluar los datos dimensionales de partida para definir el punto de arranque del proceso de generación. Naturalmente, lo más lógico era comenzar por la base del sombrerete para luego ir creciendo en altura, en un intento de homologar la generación geométrica al procedimiento constructivo y con el fin de minimizar los errores acumulados. Para ello era necesario determinar, con la mayor aproximación posible, la dimensión de la circunferencia circunscrita al primer hexágono formado por los triángulos de base del elemento, ya que ésta constituía el origen de nuestro sistema de hexágonos girados. Dado que esta circunferencia no se hallaba materializada en la realidad, el sistema más conveniente para determinar este dato era el de medir cada uno de los lados del hexágono de base y establecer un promedio numérico con el fin de obtener el radio de dicha circunferencia. En el Plano MR6 puede deducirse el valor promediado de la serie de segmentos A0B0, B0C0, C0D0, D0E0, E0F0 Y F0A0 que forman la figura de la base y que se decidió redondear en 46cm para construir el esquema de la planta del modelo. En este trazado fueron dibujados cada uno de los hexágonos según la disposición ya deducida del modelo restituido, hasta completar las trece figuras concéntricas que lo componen.

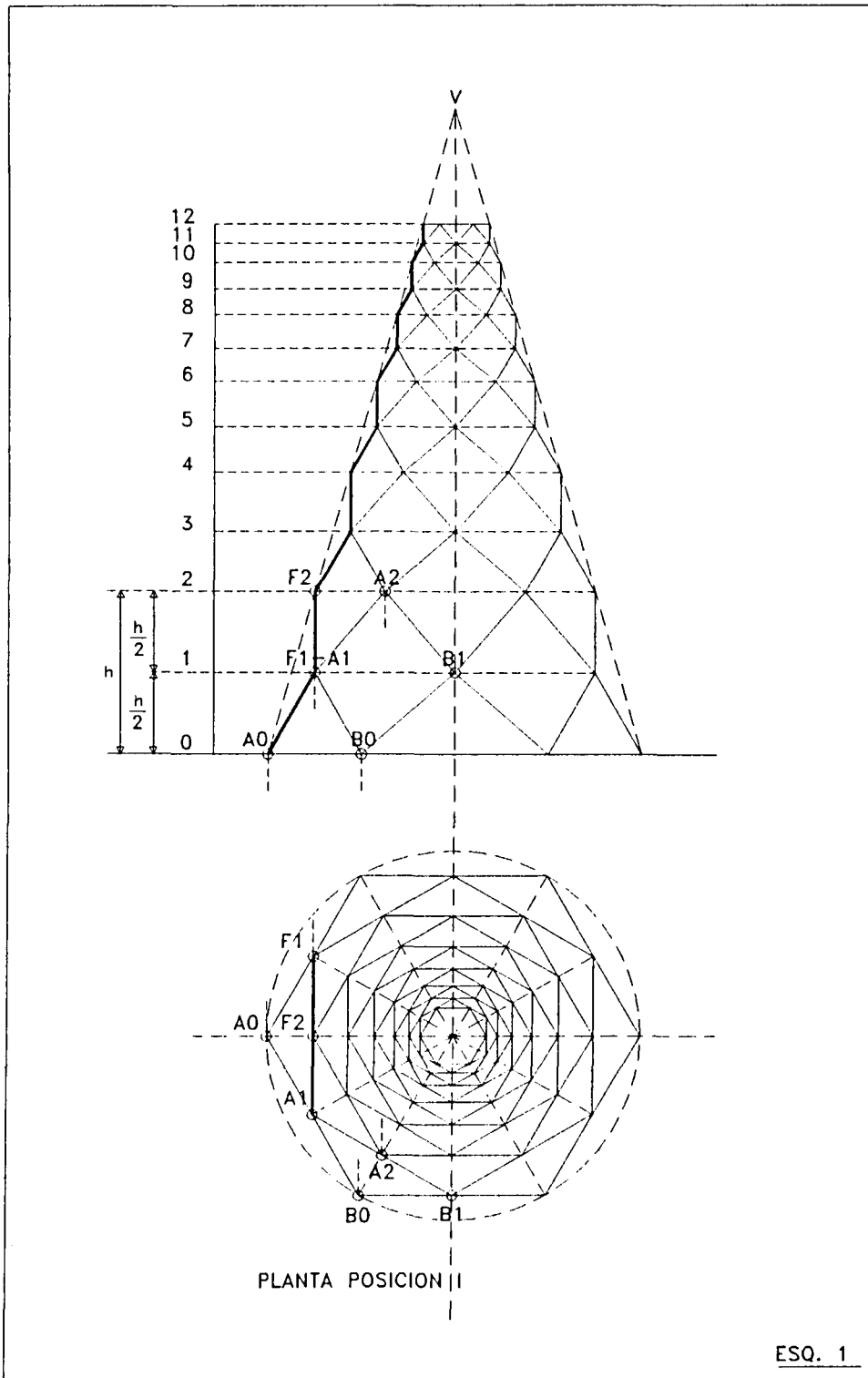
A partir de este momento el procedimiento se concentró exclusivamente en la elaboración de las distintas hipótesis para determinar las diferentes alturas de paso de los vértices de la poligonal, una incógnita que no había podido ser solucionada en el análisis del modelo restituido.

Los datos de partida con que contábamos, aparte del trazado de la planta, eran los siguientes:

- a) la altura de la primera banda de cuadriláteros, que era la que presentaba la dimensión más fiable en relación a su tamaño relativo;
- b) una aproximación a la pendiente del cono envolvente;
- c) la condición geométrica de tener uno de los planos del diedro que formaban los cuadriláteros ubicado en posición vertical.

Inmediatamente comprobamos que colocando el esquema hexagonal en una de las posiciones de estudio (por ejemplo la I) podíamos trabajar en proyección diédrica y obtener sobre un alzado las cotas de las alturas sucesivas de los cuadriláteros por traslado de puntos (Esq.1). Esto era posible siempre que previamente fuera definida la altura de la primera línea de cuadriláteros (que era la que determinaba a su vez la pendiente del cono envolvente), ya que contábamos con la particularidad de que la cara superior del diedro virtual que forma cada cuadrilátero era paralelo al eje del cono y, por tanto, se veía de canto en la planta.

En el Esq.1 puede seguirse el procedimiento adoptado para este trazado. Una vez determinada la altura h inicial y dibujada la generatriz AOV se van trasladando los puntos correspondientes a los lados del hexágono paralelos al A1F1 hasta intersectar con dicha generatriz. De esta manera es posible obtener uno a uno los vértices superiores de los



cuadriláteros de cada nivel (que en nuestra codificación corresponden a los números pares) hasta acabar en el nivel 12 que representa el orificio de salida de la chimenea. Sin embargo, aún faltaba por determinar la proporción del cuadrilátero inicial, es decir la altura a la que había que situar los vértices horizontales del mismo, representados por la arista del diedro virtual.

Advertidos de la *deformación* proporcional de los cuadriláteros detectada en la observación del modelo restituido (ver Capítulo V), llevamos a cabo una comprobación dimensional de las distintas alturas del mismo con el objeto de tener un entorno de referencia numérico y poder deducir alguna estrategia de trabajo. El procedimiento consistió en promediar las cotas en coordenada Z de los seis puntos de paso horizontales de cada una de las líneas de altura, con lo que obteníamos un diagrama, o *escala de alturas*, como el que puede verse en el Plano MR7. De este estudio se tomó, además, la cota de la primer altura de los cuadriláteros (h) que sirvió de arranque para el trazado teórico, que en este caso se decidió promediar en 39cm.

El punto de partida para establecer alguna hipótesis apoyada en esta comprobación dimensional era el de suponer que la relación de proporciones buscada tenía que establecerse de una manera *sencilla e inmediata*, sin excesivas complicaciones de cálculo ni complejas operaciones. Además, estaba convencido en que debía ser un procedimiento exclusivamente geométrico, tal como cabía esperarse de la metodología de trabajo empleada por Gaudí. Por lo tanto, la referencia numérica sólo podía tomarse como un entorno de comprobación aproximado y no tenía mucho sentido aferrarse incondicionalmente a ella.

La primera propuesta que surge en el marco de estas reflexiones era la de considerar las dimensiones del cuadrilátero derivadas de su proyección ortogonal, tal como se encontraba en el modelo. En principio se partió de la hipótesis de establecer que la altura de la diagonal horizontal del cuadrilátero pudiera quedar determinada por una cota que era la mitad de la altura total de la figura en posición ortogonal. De esta manera la altura del triángulo superior se mantenía en verdadera magnitud y la del inferior se encontraba minorada.

A partir de esta primera hipótesis empírica se realizó una aproximación de un trazado como el que puede verse en el Esq.1, ubicando la línea horizontal que unía todos los vértices de esta primera banda de cuadriláteros en el punto medio de la altura ya definida por el trazado anterior. De esta manera la línea número 1 de nuestro esquema quedaba determinada por un valor igual a $h/2$, que definía a su vez las proporciones del cuadrilátero. Siguiendo el mismo criterio fueron trazadas todas las líneas de las alturas impares hasta completar el modelo.

Este trazado, que en verdadera magnitud daba efectivamente una ligera diferencia entre los lados superior e inferior de los cuadriláteros, presentaba sin embargo un aspecto

general poco convincente debido a ciertas deformaciones producidas en determinados grupos de cuadriláteros. En efecto, si observamos el dibujo completo del modelo, podemos advertir las diferencias de proporción existentes entre cuadriláteros de series contiguas. Mientras las unidades de las series formadas sólo por cuadriláteros (series *simples*) presentaban un aspecto bastante proporcionado, sus vecinas, en cambio, delataban una evidente deformación debido a una diferencia entre las dimensiones de la zona superior e inferior de cada cuadrilátero.

Esta observación pudo ser confirmada inmediatamente al llevarse a cabo una comprobación con los valores numéricos hallados en el modelo restituido. Las relaciones de proporción simple propuestas en esta hipótesis no encontraban unas aproximaciones razonables en los datos dimensionales de la realidad.

Finalmente, la comprobación de las diferencias entre las alturas totales de ambos modelos confirmaba efectivamente la ineficacia del método seguido.

Este primer fracaso en la aplicación de un método capaz de proporcionar adecuadamente el conjunto de los cuadriláteros en altura obligaba a una reflexión más serena del tema. Una de las primeras conclusiones derivada de esta experiencia sería que las dimensiones de estos cuadriláteros y sus razones de proporcionalidad no pueden considerarse aisladamente, sino que necesariamente debían vincularse al resto de los elementos de la red poligonal. Era evidente que debía existir una serie numérica o progresión dimensional que vinculara las relaciones en altura, de una manera similar a lo que ocurría en la planta con la disposición de los hexágonos girados. El problema esencial era, sin embargo, de qué manera expresar esta progresión gráficamente sin llegar a construcciones geométricas excesivamente complicadas o cálculos demasiado complejos.

En este camino se intentaron algunos razonamientos geométricos en base a operaciones con semejanzas de triángulos -vinculando en proyección diédrica las dos posiciones de estudio y considerando la generatriz del cono envolvente como un dato más- pero no fue posible llegar a ninguna conclusión aplicable prácticamente.

De igual manera se determinaron numéricamente las progresiones resultantes en las evoluciones en altura del modelo para ver si se podía obtener algún tipo de proporción en base a números enteros o alguna serie fácilmente reconocible y, por tanto, de probable traducción geométrica.

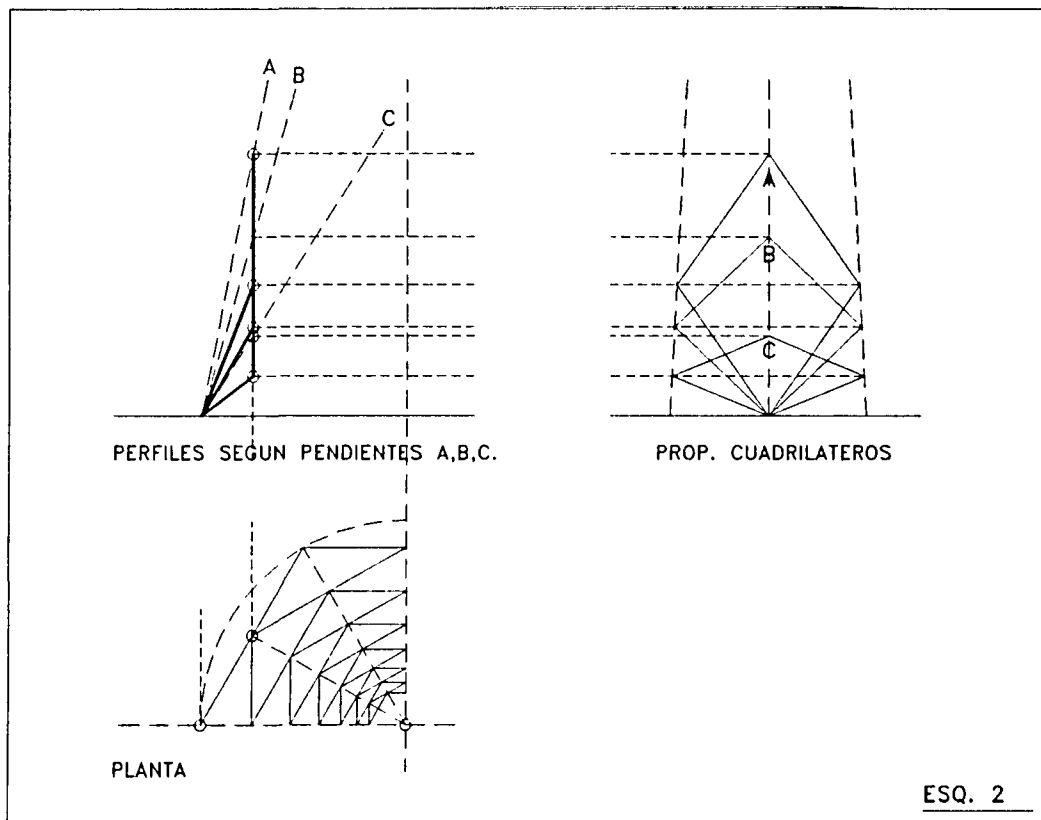
Esta especulación tampoco nos llevó a alguna conclusión útil y, en este sentido, nos encontrábamos en un punto muerto de la investigación.

El problema del factor de proporción en altura de los cuadriláteros se resolvería, sin embargo, a partir de la consideración de dos razonamientos básicos.

El primero de ellos tiene que ver con la única variable que existe, una vez determinada la planta, que es la pendiente de la generatriz del cono exterior. Es evidente

que esta pendiente es la que va a fijar la proporción en altura del cuadrilátero inicial, ya que su dimensión horizontal viene dada por la planta en relación al radio de la base del cono. Si, inversamente, experimentamos con el trazado de distintos valores de pendientes para los mismos datos iniciales podemos comprobar que se generarán formas individuales diferentes en relación con esta pendiente, pero que siempre los cuadriláteros mantendrán las mismas relaciones proporcionales.

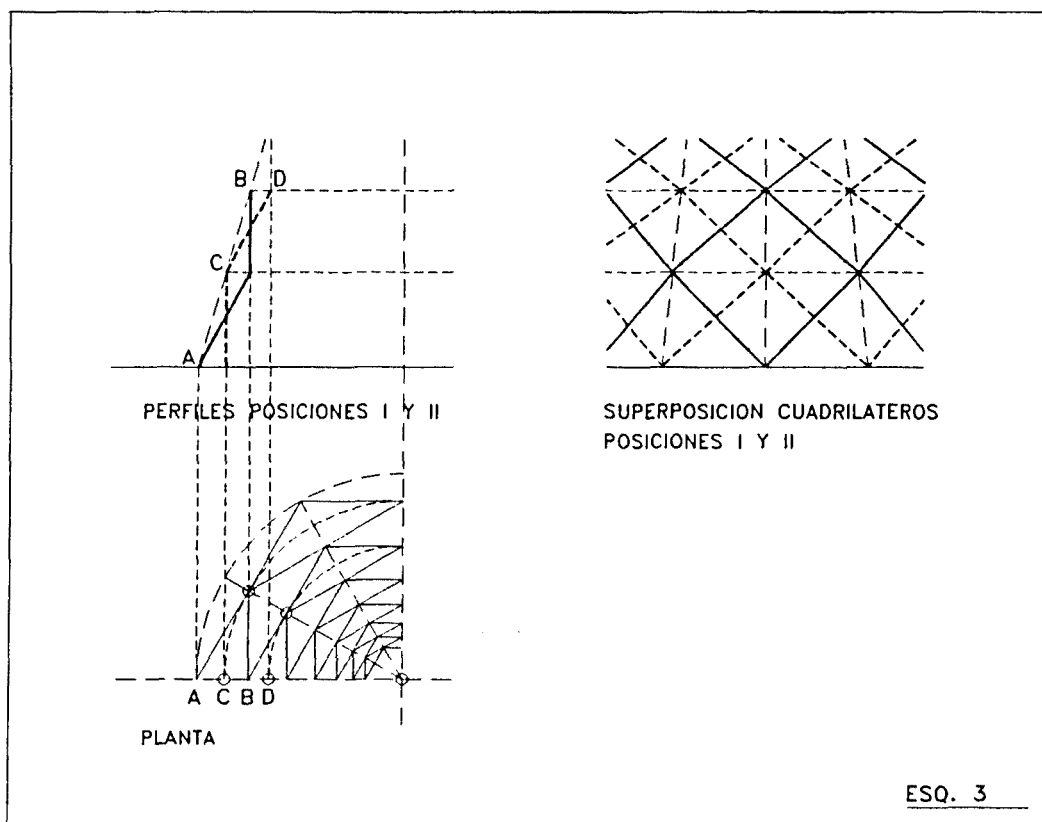
Según esta consideración, las pendientes A, B y C del Esq.2 nos darán las figuras de tres cuadriláteros diferentes que se corresponden al mismo hexágono en planta pero que presentan aspectos muy diferentes. Esta simple reflexión nos lleva a concluir que este factor de pendiente no será evidentemente una condición para la determinación de las proporciones buscadas.



En cambio, si partimos de la consideración inicial que suponía poner el énfasis en las relaciones entre los cuadriláteros más que en los elementos singulares en sí mismos, llegamos a conclusiones bien distintas. En efecto, si consideramos dos serie contiguas de

cuadriláteros podremos comprobar que, naturalmente, se unen entre sí mediante lados que son al mismo tiempo lado inferior de uno y superior del otro, debido a la lógica necesidad de una reducción progresiva en sus tamaños. De esto se deduce inmediatamente que el dato de altura de la diagonal horizontal del cuadrilátero que estábamos buscando es el mismo que el del vértice que une los dos contiguos. Es decir, que el dato inicial que da la altura total de la primera banda de cuadriláteros ya está dando automáticamente la cota de la línea media del inmediato más pequeño, y así sucesivamente.

Esta suposición puede confirmarse inmediatamente con un simple trazado como el que puede verse en el Esq.3, en donde se superponen los perfiles correspondientes a dos series contiguas de cuadriláteros. Para obtener el primer perfil -equivalente a la posición I de la planta- son determinados los puntos A y B según el procedimiento ya conocido. En la segunda posición, en cambio, el perfil es obtenido mediante el traslado de los puntos C y D de la planta a sus intersecciones con la línea de pendiente.



La primera conclusión importante que puede sacarse de este esquema es que los datos de altura buscados también se encuentran en el propio dibujo de los hexágonos de

la planta. Efectivamente, en cada uno de los triángulos que representan en planta a los cuadriláteros se encuentran los dos valores métricos necesarios para trazarlos en alzado. Esto resulta fácil de deducir si consideramos que el punto C del segundo perfil obtenido es el mismo que en proyección ortogonal determina la línea que une los vértices del cuadrilátero en la otra posición.

De esta manera es posible comprobar que la proporción en altura de cada cuadrilátero no puede resultar de una división en partes iguales de la altura total del mismo, tal como sosteníamos en la hipótesis anterior. En este caso, en cambio, se produce una reducción progresiva o *gradiente proporcional* que afecta a todos los miembros de la serie en una relación continua y constante.

Si estas especulaciones geométricas eran correctas debía existir una comprobación matemática para demostrarlas.

Si partíamos de la base de que la información del factor de proporcionalidad en altura se encontraba en la propia planta de los hexágonos, un camino probable para esta verificación podría ser la consideración de las relaciones matemáticas establecidas entre un hexágono y su circunscrito.

Recordando que la razón de semejanza entre dos polígonos regulares de igual número de lados es la que existe entre sus respectivas apotemas y, como la apotema del circunscrito es a la vez radio del inscrito, se tiene que esta razón de semejanza es igual a la que existe entre la apotema y el radio de uno de dichos polígonos.

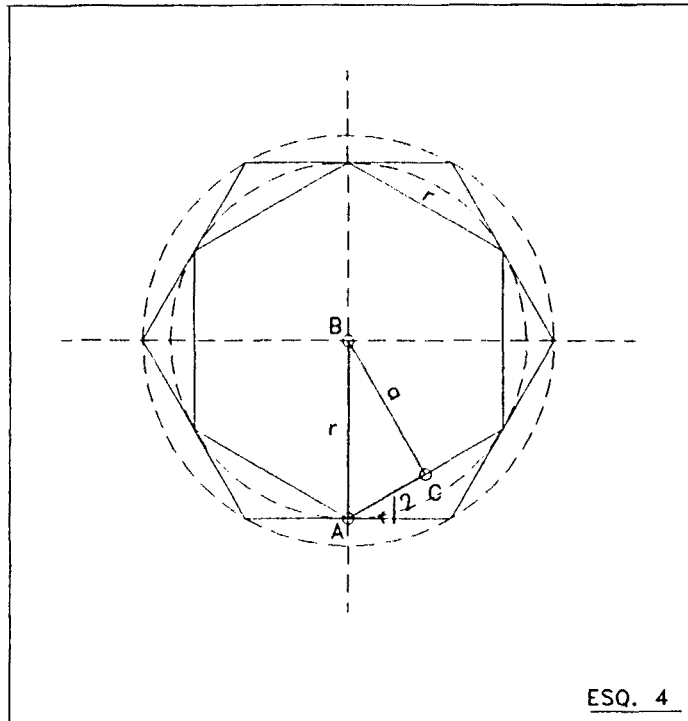
Para el caso de un hexágono inscrito como el que puede verse en el Esq.4 -cuyo lado r es a la vez igual al radio de la circunferencia circunscrita- la apotema a se puede calcular fácilmente observando que es igual a uno de los lados del triángulo rectángulo ABC. Este triángulo se forma uniendo el punto medio de uno de los lados del hexágono, un vértice contiguo y el centro de la circunferencia, por lo que dicha apotema será igual a

$$(r/2) \sqrt{3}$$

se tiene finalmente que la *razón de semejanza* entre los hexágonos es igual a

$$(1/2) \sqrt{3}.$$

Si verdaderamente existe una correspondencia entre estas relaciones de hexágonos con las proporciones en altura de nuestro modelo, esta relación tenía que estar ligada indefectiblemente a esta *razón de semejanza* así expresada matemáticamente. Realizando la operación correspondiente a la ecuación deducida más arriba se obtiene un número irracional equivalente a un valor próximo a 0,8660254. Verificando las relaciones numéricas obtenidas en el trazado de las alturas según el método geométrico desarrollado anteriormente, podemos comprobar que el coeficiente que afecta a la reducción progresiva de las unidades es, justamente, este valor obtenido numéricamente.



De esta manera, mediante la especulación matemática se estaba convalidando nuestro razonamiento geométrico, guiado en gran medida por la reflexión visual y las hipótesis de trabajo.

La particularidad de este sistema de proporcionalidad, que otorgaba al proceso de crecimiento geométrico una singularidad notable, tenía que ver con dos factores importantes. El primero de ellos era la condición de verticalidad impuesta a una de las caras del diedro de cada cuadrilátero. El segundo, en cambio, tenía que ver con el tan buscado factor de proporcionalidad en la altura de los cuadriláteros, que en este caso se transforma en una condición *obligada* debido al problema de la disminución de tamaño y la relación de contigüidad entre las series de cuadriláteros.

A la luz de estas conclusiones era necesario asumir la relatividad de nuestras primeras impresiones acerca de la intención de Gaudí respecto al control deliberado de estas proporciones, tal como especulábamos en el capítulo anterior (y llevados quizá por un excesivo entusiasmo). Sin embargo, a la luz de estas demostraciones, parecía mucho más sugerente -y a la vez elocuente- para nuestros propósitos que esta adecuación perceptiva fuera automáticamente ajustada por la propia lógica geométrica y constructiva del proceso. En este sentido también sería válido admitir la delicada intuición de Gaudí a

la hora de adoptar un sistema geométrico como éste, capaz de regular adecuadamente factores geométricos y perceptivos.

A partir de las investigaciones precedentes estábamos ya en condiciones de llegar a una de las conclusiones más sugerentes acerca de la generación geométrica de este modelo.

Lo interesante del propio mecanismo de este proceso consistía en la particularidad de que, una vez elegida la pendiente del cono exterior deseada -que determinaba a su vez la forma del patrón del cuadrilátero y la volumetría total del elemento- *estábamos en condiciones de construir toda la geometría del modelo con el único recurso de los datos existentes en el dibujo de la planta*. Esto significaba más o menos que, teniendo una idea de la altura que debía alcanzar el sombrerete de la chimenea y realizando unas simples aproximaciones con la pendiente del cono, Gaudí pudo construir este elemento teniendo como única herramienta geométrica un simple esquema conteniendo los 13 hexágonos girados. Este esquema adquiría así el valor de una auténtica *figura sintética*, asumiendo de este modo el completo significado geométrico de la chimenea.

El trazado.

En virtud de las condiciones precedentes, el trazado de nuestro modelo teórico podía resolverse ahora sin mucha dificultad partiendo de una simple operación en sistema diédrico y trasladando los datos métricos obtenidos a un espacio tridimensional en donde se pudiera construir el modelo.

El único dato dimensional de partida que necesitábamos era un valor de referencia para la primera altura y poder así determinar la pendiente de la generatriz del cono. Para ello bastaría con realizar un promedio numérico de todas las cotas en altura de los seis triángulos de la base y tomarlo como valor inicial de referencia. De esta manera, obteniendo un valor de 19,93cm, se decidió optar un número redondeado en 20cm, que definía una pendiente del cono igual a 74° .

En el Plano MT1 se puede seguir el procedimiento adoptado.

Para simplificar el dibujo se dispuso la planta en dos posiciones que estaban rotadas 30° una respecto de la otra -las posiciones de análisis I y II- y se fueron determinando los valores de las alturas para ambos perfiles prolongando cada uno de los planos de canto representados por los lados de los hexágonos colocados verticalmente. Intercambiando los datos de uno y otro alzado se obtuvo toda la información necesaria para trazar los dos perfiles característicos de la chimenea.

Mediante el procedimiento seguido se puede comprobar inmediatamente como la

cota que fija el vértice de un cuadrilátero en una cualquiera de las posiciones es la que determina a su vez la diagonal horizontal del otro cuadrilátero en la posición vecina. Los valores obtenidos por el traslado de los puntos de cada posición a los alzados se recogen en una escala numerada que sirve de referencia para la completa relación de proporciones en altura. Cada uno de estos puntos, a su vez, puede ser identificado por una letra que fija su posición en planta y por un número que indica en el *nivel* en que se encuentra.

A partir de este momento estábamos ya en condiciones de crear un primer modelo equivalente al que denominamos en la etapa anterior como *modelo poligonal*. Una vez obtenidos los dos perfiles con toda la información métrica incorporada se evaluaron distintas estrategias operativas para generar tridimensionalmente este modelo y se optó por aquella que resultase más explícita y descriptiva respecto al propio proceso de generación.

El criterio de trabajo adoptado consistió en situar espacialmente cada uno de los hexágonos de la planta a las respectivas cotas de paso de los vértices de la poligonal (Plano MT2). Para ello fue menester "despegar" de la planta los hexágonos e ir situándolos respecto a los datos métricos derivados del trazado de los perfiles. De esta manera, se comenzaron ordenadamente a levantar las figuras desde el exterior hacia el interior, y se fraccionó el modelo en tres partes para evitar una superposición excesiva de líneas que dificultara el trabajo.

Una vez completadas la sucesión de hexágonos en altura, se comenzó el trazado de la poligonal uniendo cada uno de los vértices de las figuras con una línea continua. Finalmente, los fragmentos de trabajo fueron fundidos en un único modelo completo. El proceso íntegro de trazado puede verse en las axonometrías del Plano MT2.

Desactivando los elementos de construcción (hexágonos, líneas auxiliares, etc.) teníamos ahora la primera visualización de nuestro modelo, que se expresaba bajo la forma de un tejido poligonal "alámbrico" y sin materialidad alguna. Inmediatamente, con las visualizaciones en proyección diédrica que pueden verse en el Plano MT3, realizábamos un proceso de verificación que tenía una doble finalidad; por un lado servía como control del mecanismo operativo empleado y por otro permitía comprobar la idoneidad de la estrategia geométrica empleada para generar el modelo.

De esta manera, al ser proyectado el modelo en planta, recuperaba el dibujo de los hexágonos utilizados para generar su propia forma. Las visualizaciones de los alzados, por su parte, presentaban ahora unos cuadriláteros de proporciones mucho más equilibradas que en el intento anterior y los contornos proyectados como perfiles correspondían exactamente con los trazados bidimensionales que había servido de base métrica.

Para la disposición de las proyecciones en el dibujo fueron utilizados los mismos ejes y trazados de control geométrico empleados para el modelo restituido. Esta estrategia tenía como objetivo principal el de establecer unas bases rigurosas para el proceso de comparación entre ambos modelos. Con similar intención fue dibujada una escala de alturas

que correspondía a los valores teóricos obtenidos en el trazado de la poligonal.

Las primeras comprobaciones dimensionales se basaron sobre todo en las figuras de los cuadriláteros y las dimensiones generales del modelo. Las medidas de las primeras fajas de cuadriláteros (las más fiables en una posterior comparación) se mantenían dentro de un promedio aceptable respecto a las mediciones efectuadas sobre el modelo restituido. También fueron medidas la boca de la chimenea (el más pequeño de los 13 hexágonos) y la altura total del modelo. En este sentido se advirtieron unas ligeras desviaciones respecto a los valores obtenidos del modelo real que no se evaluaron como significativas, por lo que se siguió adelante con el desarrollo del modelo creado.

Finalmente, en el Plano MT4, se puede ver el aspecto general que adquiere el modelo cuando se materializa la superficie de los diedros contenidos en cada cuadrilátero. Este plano enseña una visualización en proyección axonométrica del modelo desde tres puntos de vista diferentes. En este caso la particularidad de las imágenes reside en el tratamiento de los cuadriláteros como diedros obtenidos mediante la transformación del modelo alámbrico en *caras* que definen la superficie del cuerpo. El tratamiento y los puntos de vista elegidos son los mismos que pueden verse en el Plano MR10 del modelo restituido.

LOS CUADRILÁTEROS

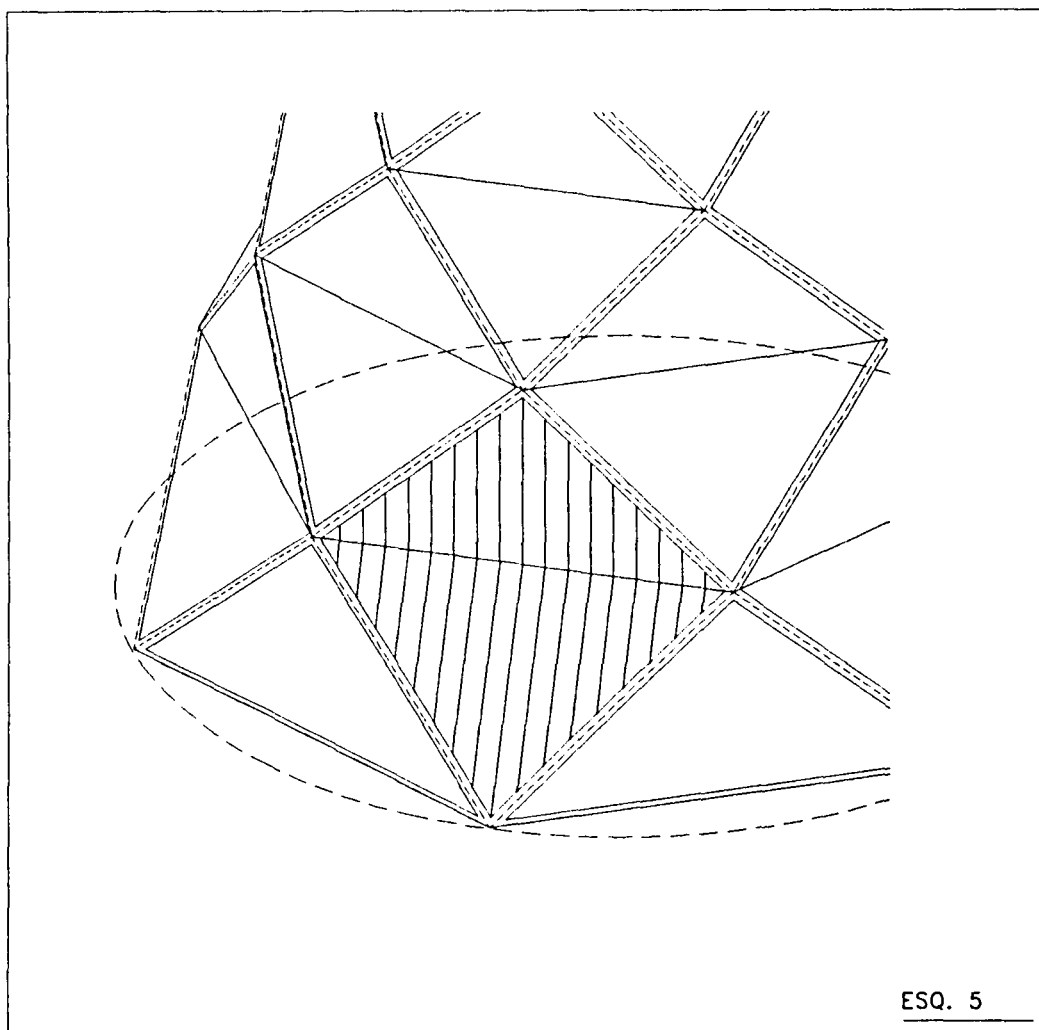
Series homotéticas y cuadriláteros semejantes.

Un segundo bloque muy importante en el tratamiento de nuestro modelo teórico consistió en la recuperación progresiva de las características geométricas capaces de emular los rasgos esenciales de la morfología de la chimenea ya estudiados en el modelo restituido.

Una vez confirmadas nuestras expectativas acerca del procedimiento correcto para la generación geométrica del modelo estábamos, pues, en un momento de la investigación en donde era preciso ir completando la figura de la chimenea a partir de sus elementos esenciales.

En este sentido, tanto la creación del modelo poligonal inicial como el estudio posterior acerca de las implicaciones que sobre la estructura geométrica de este modelo tienen las hélices y las espirales, no dejaban de ser ejercicios de una cierta abstracción, habida cuenta de la *inmaterialidad* del modelo y de las especulaciones realizadas.

La primera operación efectuada en esta dirección fue la definición, a partir del modelo teórico poligonal, de la totalidad de triángulos y cuadriláteros alabeados que formaban parte de la superficie del sombrero y que puede verse en el Esq.5.



La metodología empleada en este caso seguía el camino inverso para la empleada en el modelo restituido. Se trataba ahora de trazar los cuadriláteros a partir de las poligonales alabeadas, que nos definían de este modo los ejes de separación entre unidades contiguas. Para realizar esta operación de trazado se determinó previamente una *junta* teórica de separación entre cuadriláteros, igual para toda la superficie del elemento y fijada en 12mm de ancho. A continuación se fueron dibujando segmentos paralelos a ambos lados de las poligonales a una distancia de 6mm, para ir creando una figuras lineales que formaban unidades cerradas en sí mismas e interiores a la poligonal. Estas operaciones eran realizadas considerando como planos de referencia los planos virtuales que formaban, dos a dos, los triángulos en que se dividía toda la red poligonal. En el Esq.5 puede verse el procedimiento seguido para este trazado y la identificación de estos planos en uno de los

cuadriláteros.

Una vez trazada la totalidad de los cuadriláteros y desactivada la red poligonal de referencia, se pudieron visualizar las proyecciones diédricas que se ven en el Plano MT5. En estas proyecciones puede comprobarse la correcta disposición de las unidades dentro de la estructura general y la confirmación de las proporciones de los cuadriláteros según el método de generación empleado.

La etapa más interesante del trabajo con este modelo *ideal* de cuadriláteros vendrá, sin embargo, con el estudio de las componentes dimensionales y geométricas de las unidades consideradas en conjuntos de *series* y en las relaciones establecidas entre ellas. Este tema, iniciado en el Capítulo V al estudiar el modelo obtenido de la restitución, necesitaba de una validación definitiva desde el punto de vista geométrico, una garantía que sólo el rigor métrico del modelo teórico era capaz de ofrecer.

En este momento de la investigación nos proponíamos entonces trabajar con los cuadriláteros agrupados según las dos series verticales características de cuadriláteros (ya identificadas en su momento en el modelo restituido) que se van alternando alrededor de la superficie del sombrero, es decir, las series de seis cuadriláteros completos y las que se componen de cinco cuadriláteros y dos triángulos. Lógicamente, en este caso no era necesario trabajar con el total de las doce series como en el modelo restituido, ya que las unidades se repetían cíclicamente. De esta manera, considerando un único modelo de cada una de las series estábamos en condiciones de trabajar con los once cuadriláteros y los dos triángulos que representaban la totalidad de elementos posibles. En el Esq.6 se representan ambas series en la posición original de trabajo mantenida para las series restituidas. Cada uno de estos cuadriláteros *tipo* es identificado mediante su código genérico para el posterior estudio comparativo.

Se trataba, pues, de analizar las relaciones geométricas de transformación existentes entre el conjunto de figuras representadas por los cuadriláteros para establecer sus relaciones de proporción y sacar conclusiones generales.

De las evidencias de constancia angular ya deducidas en el estudio de la red poligonal, no cabía duda que estábamos frente a una transformación de tipo métrico que implicaba una relación de semejanza geométrica entre todos los cuadriláteros del modelo. Bastaba, por lo tanto, una explicitación gráfica adecuada de las relaciones existentes entre las unidades y esta *razón de semejanza*. Para ello partíamos de unos supuestos geométricos iniciales que podíamos resumir así:

- a) cabía considerar a cada una de las series verticales de cuadriláteros como un

*grupo de homotecias con el mismo centro*²,

b) la homotecia de estos cuadriláteros alabeados puede asimilarse a las de las figuras planas³;

c) la razón de homotecia en estas serie es constante e igual a la razón entre todos los segmentos homólogos de la figura.

De estas consideraciones podía deducirse inmediatamente que, si se mantenían las condiciones de constancia angular y el paralelismo de las rectas homólogos entre ambas series, *todos los cuadriláteros del modelo serían geoméricamente semejantes*⁴.

Para poder verificar estas condiciones y establecer los parámetros de trabajo para nuestro caso concreto fue necesario, seguidamente, efectuar un procedimiento de redistribución de las unidades de estudio en el propio espacio del modelo. Desde el punto de vista operativo era necesario el aislamiento y posicionamiento adecuado de ambas series de cuadriláteros.

En primer lugar se separaron del modelo las dos series representativas del conjunto mediante un proceso similar al ya realizado en el modelo restituido, cuando fueron estudiadas las variaciones dimensionales de las unidades (Capítulo V, p.7).

² La homotecia es una transformación biunívoca en donde las rectas homólogos son paralelas y las figuras conservan los ángulos y la proporcionalidad. Por tanto es posible definir a la homotecia como una homología de eje impropio.

Si dado un punto O y un número real K (distinto de cero) se hace corresponder a todo punto A del plano, distinto de O , con otro punto A' alineado con OA de tal manera que $OA':OA=K$, la correspondencia así definida se llama *homotecia* de centro O y razón K . Se denominarán *figuras homotéticas* aquellas cuyos puntos se corresponden en una homotecia.

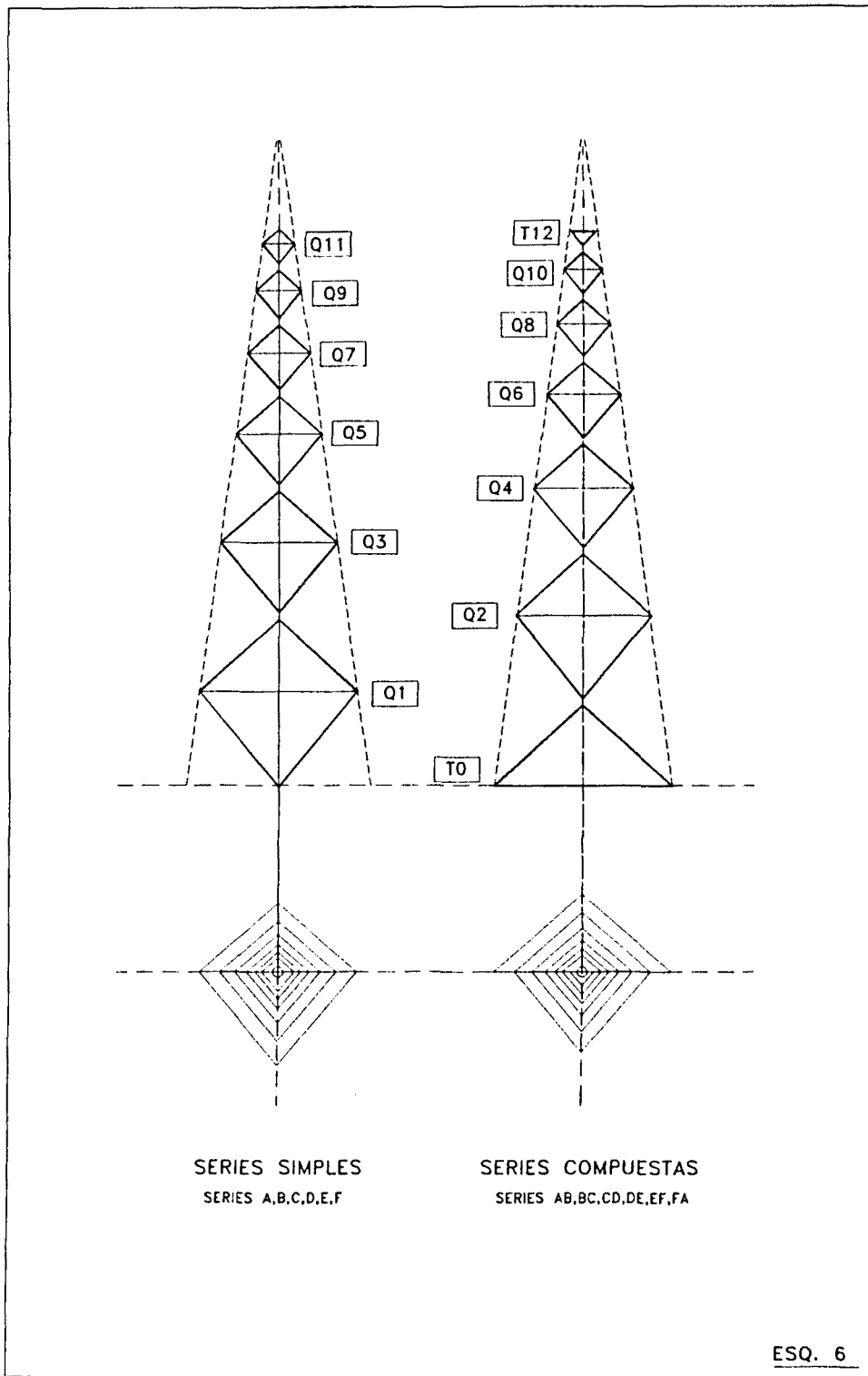
Transformando sucesivamente una figura mediante dos homotecias con el mismo centro O y cuyas razones sea K y K' se obtiene una homotecia de razón KK' . Pues si un punto cualquiera A se transforma sucesivamente en A' y A'' , A'' está en la recta OA y se tendrá que:

$OA'/OA = K$, $OA''/OA' = K'$, de donde $OA''/OA = KK'$.

Por lo tanto puede concluirse que: *todas las homotecias con el mismo centro forman grupo, al que por tanto también pertenecen la identidad y la simetría central.* (Ver, PUIG ADAM, Pedro, *Curso de Geometría Métrica*, Tomo I, Madrid, Ed. Euler, 1986, p.117; IZQUIERDO ASENSI, Fernando, *Geometría Descriptiva Superior y Aplicada*, Madrid, Dossat, 1980, p.126; SANCHEZ GALLEGO, J.A., *Geometría descriptiva. Sistemas de proyección cilíndrica*, Barcelona, Edicions UPC, 1993, p.38)

³ Esto puede demostrarse por varios caminos. En principio, y según la condición anterior, si se consideran los cuadriláteros formando un grupo que comparten el mismo centro de homotecia, los triángulos que los componen también formarán dos grupos con el mismo centro. Inversamente, si se consideran los cuadriláteros como diedros, tenemos que *los ángulos diedros formados por semiplanos homólogos son iguales*, puesto que las secciones rectas de estos diedros trazadas por puntos homólogos, serán homólogas -formadas por semirectas homólogas- y por tanto iguales.

⁴ PUIG ADAM, P., op. cit., p.119.



De igual manera que entonces se realizó una superposición de los cuadriláteros correspondientes a cada una de las dos series, vinculándolos por el punto medio de sus ejes horizontales y obteniéndose unos dibujos como los que pueden verse en el Esq.6. A diferencia de los cuadriláteros reales del Plano MR7, en este esquema, aparte de verificarse el estricto paralelismo de todos los lados de los cuadriláteros, se puede comprobar visualmente el gradiente que forman los intervalos que separan a las unidades contiguas. En un proceso posterior, estas superposiciones serán muy útiles como patrón de referencia para una evaluación acerca de las desviaciones dimensionales de los cuadriláteros.

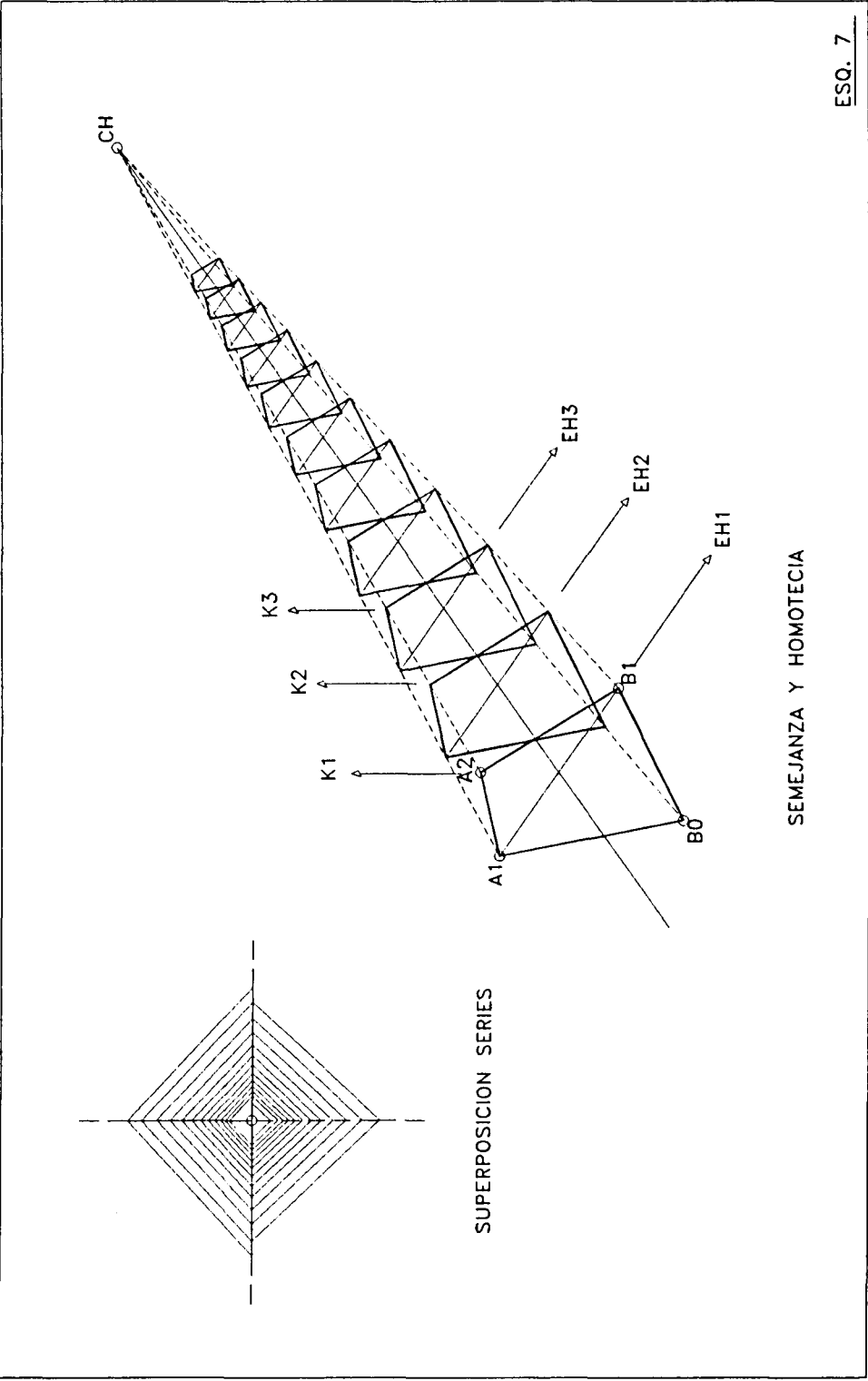
En una segunda etapa de este proceso, representada en el Esq.7, se procedió a relacionar ambas series homotéticas con el fin de construir el esquema de un único grupo de semejanza geométrica, formado por la totalidad de los cuadriláteros del modelo. Manteniendo las orientaciones que tenían las unidades en sus respectivas series se procedió en primer lugar a realizar la fusión de todos los cuadriláteros en un único esquema de superposición integrado.

Con el fin de deducir las relaciones de semejanza entre todas las unidades del grupo, se utilizó el recurso gráfico de construir una hipotética relación de homotecia entre los cuadriláteros. Una relación que en realidad era inexistente en el propio modelo pero que nos permitía reflexionar visualmente sobre ciertas cuestiones.

Para construir este esquema, desde el punto medio de la diagonal horizontal de los cuadriláteros se trazó una recta perpendicular a dicha diagonal en cuyo extremo se ubicó el supuesto centro de homotecia. Desde este punto se trazó uno de los *rayos* por donde debían pasar todos los vértices superiores de los cuadriláteros. De esta manera, se fueron desplazando a través de la recta y por sus propios centros cada una de las unidades, hasta que sus vértices superiores intersectaran con esta línea inclinada, que en este esquema podía interpretarse como el rayo visual de una perspectiva cónica. Posteriormente, para completar el esquema y a modo de comprobación, fueron unidos todos los vértices de los cuadriláteros con sus homólogos mediante rectas que, de esta manera, convergen en el propio centro de homotecia, tal como puede verse en el Esq.7.

En este dibujo tenemos, pues, representados todos los elementos necesarios para expresar las condiciones de homotecia del conjunto de cuadriláteros, tales como la identificación de sus vértices y segmentos, el centro de homotecia CH y los valores K, K_1, K_2, \dots de la razón de homotecia. En el esquema también pueden verse las direcciones paralelas de los ejes de homología EH1, EH2, EH3... y la semejanza de los triángulos que deriva de esta condición.

En virtud de lo expresado anteriormente se deduce que el producto de las razones de homotecia en las sucesivas transformaciones es, para este grupo de homotecias con un mismo centro, una única razón de homotecia. De esta manera nos encontrábamos nuevamente con la expresión gráfica de un determinado *gradiente* de semejanza (representado en este caso por las separaciones entre los cuadriláteros del grupo) que



ESQ. 7

resulta, al mismo tiempo, la razón de homotecia de esta hipotética serie. Al ser ésta razón la misma para todo el grupo bastaba con calcular el coeficiente correspondiente entre dos homotecias sucesivas y obtendríamos automáticamente la razón de semejanza del conjunto expresada numéricamente.

Realizando las mediciones correspondiente en el modelo informático y calculando los valores proporcionales mediante una simple operación matemática se llega a obtener un coeficiente igual a 0,8660 que, como recordamos, era prácticamente el mismo valor obtenido numéricamente al calcular la razón de semejanza de los hexágonos inscritos de la planta y, por tanto, el mismo factor que determinaba la proporción en altura de los cuadriláteros.

Si, como sabemos, la misma razón de homotecia se verifica para todos los segmentos homólogos de las figuras y todos los triángulos contenidos en ellas resultan, a la vez, semejantes entre sí (el producto de una homotecia por un movimiento es una semejanza⁵), podemos deducir simplemente que existe *una única condición de semejanza geométrica* -traducible en un factor numérico, pero que se expresa visualmente- *que gobierna y regula la generación y la estructura geométrica de todo el modelo.*

Como resulta fácil deducir de lo precedente, esta conclusión no sólo confirma la idoneidad del procedimiento de generación adoptado sino que, además, certifica de manera contundente toda la lógica geométrica que sostiene la construcción de la chimenea.

HÉLICES Y ESPIRALES

En el Capítulo V, al hablar de las *licencias* autoimpuestas a la hora de trazar las hélices sobre el cono ideal que circunscribe la chimenea, dejábamos un poco en suspenso el estudio de las propiedades geométricas de estas curvas, habida cuenta de las limitaciones impuestas por el propio modelo.

En este momento nos encontrábamos con el desarrollo de un modelo teórico que verificaba el proceso generativo de la chimenea y estábamos, por tanto, en condiciones de restituir con suficiente rigor geométrico el trazado de las hélices sobre el cuerpo del sombrerete. Para ello contábamos -además de la configuración tridimensional del modelo- con un conjunto de propiedades deducidas de la propia estructura geométrica del mismo.

Si seguimos la trayectoria de una cualquiera de las poligonales alabeadas que pasan por los puntos comunes con las hélices cónicas, podremos verificar que en cada uno de estos puntos los tramos de dicha poligonal mantienen un relación constante de ángulos. En efecto, si trazamos unas líneas que unan todos los vértices de cada serie vertical de

⁵ PUIG ADAM, P., *op. cit.*, p.121.

cuadriláteros, las poligonales alabeadas así obtenidas tendrán un ángulo constante respecto a estas rectas.

Esta propiedad es fácilmente demostrable si consideramos la relación de semejanza establecida entre los cuadriláteros que acabamos de ver en la sección anterior. Si, para que se cumpla la condición de semejanza enunciada, todos los cuadriláteros del modelo deberán mantener la igualdad de ángulos, también deberán mantener dicha condición con las rectas que pasan por sus propios vértices.

Si pensamos que estas líneas, al pasar por los puntos más externos de la poligonal, son en realidad las directrices del cono circunscrito, podríamos considerar que esta poligonal alabeada es en realidad una representación *segmentada* de una curva loxodrómica. Esto es así porque en este caso se cumpliría aquella condición que exigía para estas curvas una constancia angular respecto a las generatrices del cono sobre donde se desarrollan⁶. Si hacemos pasar un cono sobre los puntos de estas poligonales (nuestro cono envolvente), las infinitas generatrices del mismo mantendrán las mismas relaciones angulares con una curva que defina la trayectoria de una hélice loxodrómica que pasa por los puntos de la poligonal.

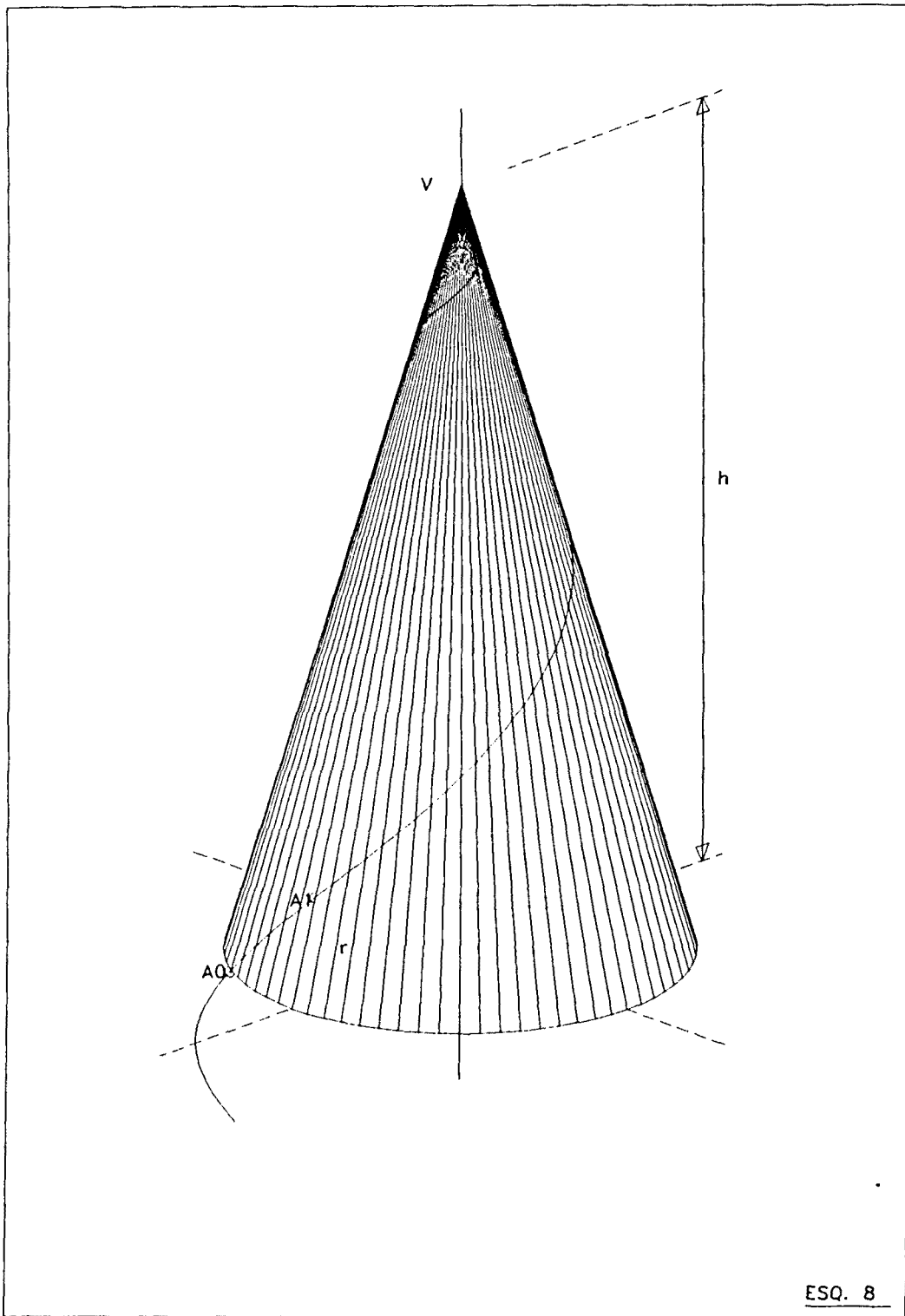
Para trazar estas curvas sobre nuestro modelo teórico, y al mismo tiempo demostrar la validez de estos principios geométricos que acabamos de deducir, elegimos el camino de las matemáticas.

La hipótesis era muy simple: si las hélices contenidas en nuestro modelo eran curvas loxodrómicas bastaba con crearlas matemáticamente a partir de sus ecuaciones para luego vincularlas al propio modelo teórico. Para ello era menester contar con una aplicación en CAD capaz de generar este tipo de curvas a partir de la entrada de los datos numéricos.

El proceso a seguir consistió en definir la hélice a partir de unos datos de partida provenientes del modelo. Estos datos eran simplemente las medidas del radio del cono, su altura y las coordenadas XYZ de dos puntos sucesivos de cualquiera de las poligonales alabeadas. Estos valores se introdujeron en una aplicación LISP de AUTOCAD, desarrollada especialmente para el trazado de curvas según ecuaciones paramétricas y se procedió siguiendo un orden lógico de operaciones.

En el Esq.8 se puede ver el resultado gráfico de la primera etapa de este proceso. En este dibujo ya aparece trazada la hélice completa, a la que se agregó el dibujo de su propio cono a modo de orientación visual. Puede observarse, sin embargo, que la curva trasciende los límites de este cono, ya que la ecuación permite generarla indefinidamente, por lo que en nuestro caso nos veíamos obligados a limitarla según los parámetros físicos de nuestro propio modelo.

⁶ Recordemos que en una hélice loxodrómica el movimiento del punto generador sobre la generatriz es tal que las tangentes en todos los puntos de la curva tienen la misma inclinación respecto a las generatrices respectivas que pasan por dichos puntos.



ESQ. 8

La segunda etapa consistió en una mayor aproximación al modelo teórico con el objeto de verificar la validez del proceso seguido (Esq.9). El objetivo era en este caso el de *regresar* la curva generada al mismo estado poligonal que mantenía en el modelo. Para ello, simplemente se trataba de hacer coincidir los valores de tabulación de la hélice con el primer tramo de la misma, introducido como dato inicial en la ecuación. En otras palabras, se trataba de definir el primer segmento de la poligonal para que, en la propia tabulación de la curva se fueran determinando los consecutivos.

Una vez definida la poligonal alabeada, se procedió a copiarla alrededor del cono en los seis puntos de arranque que presenta el modelo -en uno y otro sentido de giro- de manera tal de restituir la entera trama poligonal. El resultado de esta operación aparece dibujado en el Esq.9, en donde se aprecia claramente la distribución de los cuadriláteros alabeados y las directrices que pasan por sus vértices.

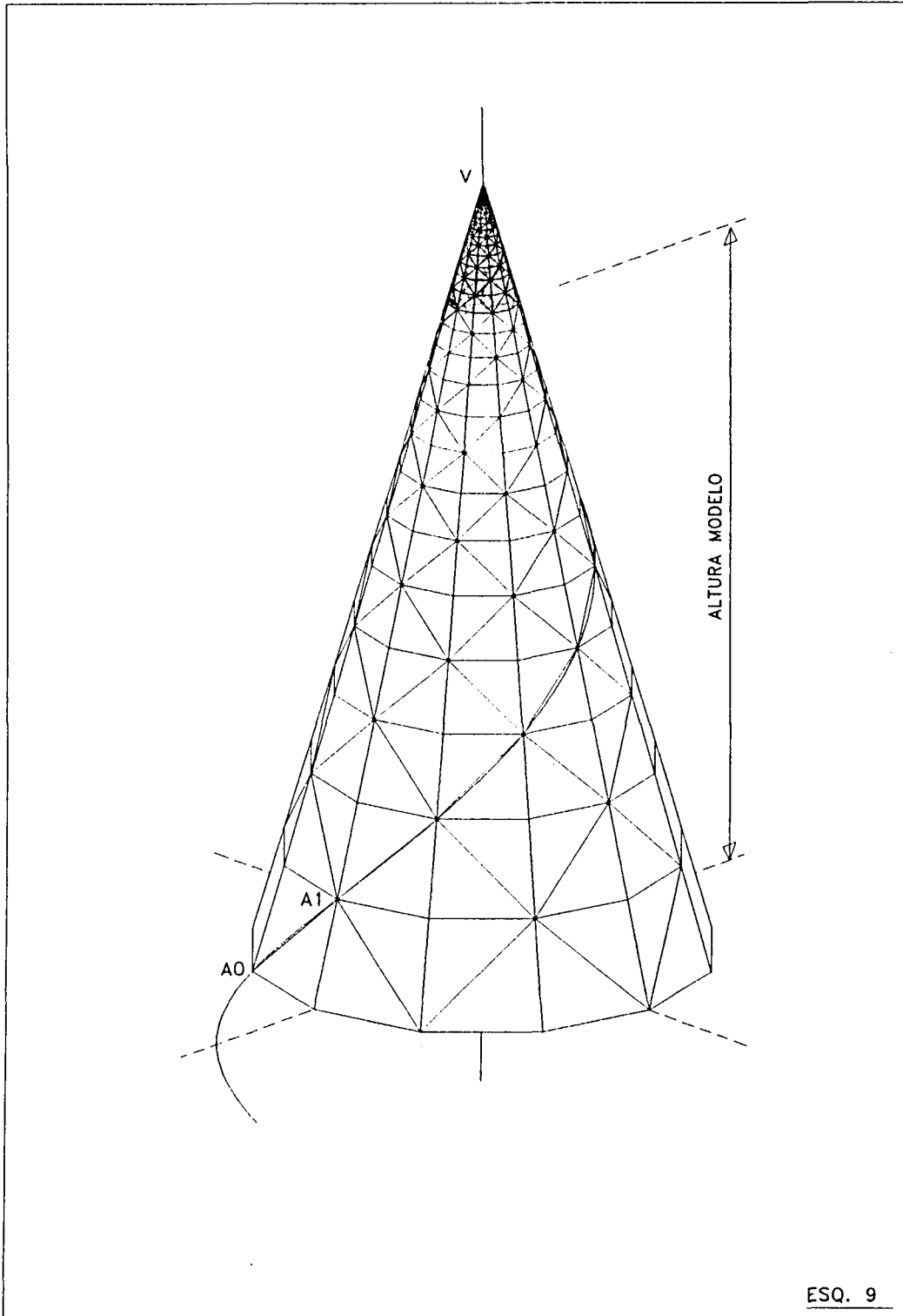
Proyectando este dibujo en planta -tal como puede verse en el Esq.10- se reproduce la figura de los hexágonos, generados esta vez únicamente como resultado de la proyección ortogonal de las poligonales alabeadas. En el mismo esquema aparece el trazado de la hélice que dió origen a este modelo matemático. Como sabemos, esta hélice al ser proyectada en planta define una espiral de tipo logarítmica, ya que sigue manteniendo las relaciones angulares que tenía con las rectas generatrices⁷. Esta espiral -cuyas peculiaridades fueron tratadas en el Capítulo II- será, como podremos comprobar, un elemento clave en el desarrollo del resto de las chimeneas del Palau Güell y un punto importante en la expresividad arquitectónica de Gaudí.

En una etapa de edición posterior se procedió a *recortar* la altura del modelo obtenido con el objeto de equipararlo al modelo teórico.

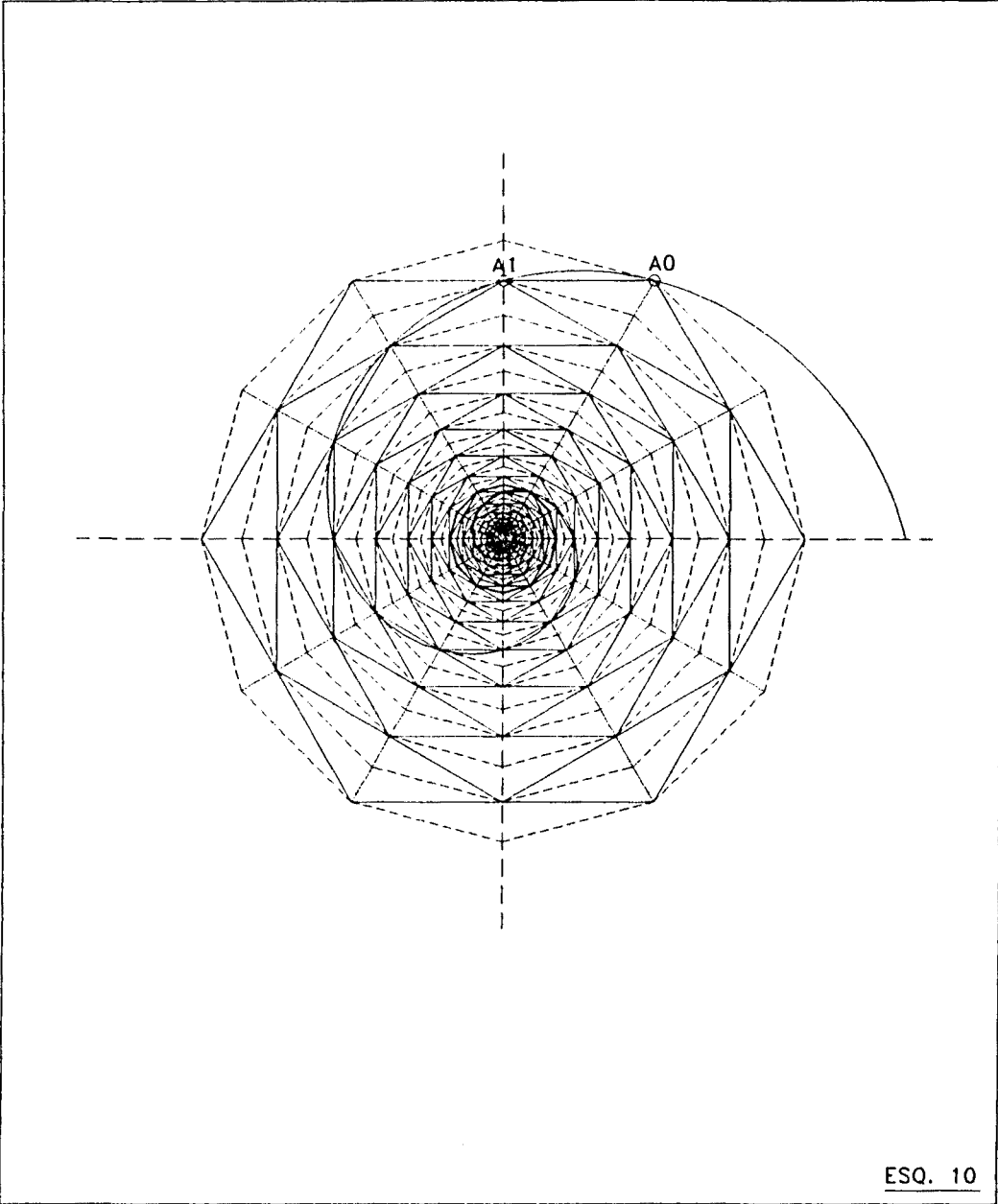
Finalmente, comparando informáticamente este modelo matemático con nuestro modelo teórico original se llega a una total identidad de forma y dimensiones, por lo que se da por demostrada nuestra hipótesis inicial.

De esta manera fue posible vincular en un único esquema en planta el trazado de las poligonales y el conjunto de hélices proyectadas como espirales logarítmicas, tal como puede verse en el Plano MT6, en donde figuran todos los puntos de paso de ambos trazados. El Plano MT7 muestra, en cambio, el conjunto de espirales en las dos posiciones de análisis, proyectadas en planta y alzado con indicación de la escalas de alturas. En estos alzados es posible obtener unas visualizaciones en donde los contornos aparentes describen la ondulaciones curvas de las hélices, una imagen ciertamente irreal de nuestro modelo pero muy recurrente en las formas gaudinianas.

⁷ En una hélice loxodrómica, el ángulo formado por las proyecciones horizontales de la tangente a la curva y de la generatriz en cada punto también será constante, luego el desarrollo y proyección ortogonal de esta hélice serán espirales logarítmicas. (IZQUIERDO ASENSI, Fernando, Geometría Descriptiva Superior y Aplicada, Madrid, Dossat, 1980, p.264)



ESQ. 9



ESQ. 10

LAS SUPERFICIES

La última etapa del trabajo con el modelo teórico consiste en el tratamiento de su configuración lineal para definirlo como superficie. Este proceso -que culmina en alguna medida la intención de dar una cierta *materialidad* al modelo inicial- no tiene por objeto, evidentemente, la emulación del modelo real sino una aproximación a la definición geométrica de su superficie.

Una vez identificado el mecanismo geométrico del proceso de generación y aislados los rasgos y las propiedades fundamentales del modelo a partir de su estructura lineal, se hacía necesario un tratamiento exterior para evaluar los aspectos visuales y operativos ligados más directamente a la propia materialidad de la chimenea. Naturalmente, y dadas las particularidades del modelo real, este tratamiento no dejaba de ser un recurso poco *científico* desde el punto de vista estrictamente comparativo, pero ofrecía, en cambio, interesantes aspectos cuando era analizado singularmente.

Desde este punto de vista, el proceso de tratamiento superficial del modelo adquirió dos formas esenciales.

La primera de ellas, alejada de toda pretensión imitativa, consistió en dar materialidad a la idea de *diedro* contenida en cada uno de los cuadriláteros alabeados y sustentada como argumento teórico a lo largo de esta investigación. Para llevar a cabo este tratamiento, el proceso de trabajo consistió simplemente en la configuración del par de planos que definen los dos triángulos de cada uno de los cuadriláteros. Técnicamente hablando esto se puede conseguir de diversas maneras. En este caso fue adoptado un procedimiento en base a la definición de caras 3D (*3D faces*) sobre la red poligonal del sistema, quedando marcadas las aristas del diedro por la propia intersección de sus caras. Posteriormente, mediante un tratamiento de edición adecuado, fue posible obtener unas visualizaciones como las ya comentadas y que pueden observarse en el Plano MT4, en donde la volumetría del modelo queda enfatizada por el tratamiento de la superficie.

El resultado de esta primera forma de expresión de las superficies del modelo pone en evidencia una especie de *estructura base* de la configuración geométrica del sombrerete que, como vimos, fue parte esencial para la interpretación de los mecanismos de generación del mismo. La materialidad sugerida por este conjunto articulado de diedros -inexistente en el modelo real- pondrá el acento, sin embargo, en un punto clave para la interpretación de la fundamentación geométrica que sustenta a una buena parte del resto de las chimeneas del Palau Güell. Este fenómeno, que será analizado con detenimiento en el Capítulo VIII, permitió extender a otros ejemplos los principios de estructuración geométrica detectados en nuestro modelo y, de esta manera, darles una validez dentro de un contexto más amplio.

El segundo modelo de superficies constituye, en alguna medida, la formulación de materialidad que más tiende a reflejar la apariencia real de la chimenea.

Del primer reconocimiento directo y un poco intuitivo de la chimenea y de la confirmación posterior que significaba la exploración del modelo restituido, podíamos deducir fácilmente que cada uno de los cuadriláteros que configuraban el *armazón* geométrico del sombrero limitaba en su interior una superficie alabeada.

Desde el comienzo de la investigación de este ejemplo estaba claro que un estudio geométrico pormenorizado de estas superficies no tenía sentido alguno. A diferencia de otros casos de la arquitectura de Gaudí en que las superficies alabeadas adquieren un mayor protagonismo (como el propio ejemplo de las bóvedas de la Colonia Güell) y que justificaban un análisis de sus propiedades específicas, en nuestro ejemplo de la chimenea este estudio -aparte de no ser esencial para los objetivos de la investigación- resultaba prácticamente inabordable. El aplacado de estas superficies mediante trozos planos de revestimiento cerámico de formas y tamaños diferentes creaba una especie de *facetado* irregular de la superficie que desvirtuaba completamente cualquier intento de análisis. Si a esta característica agregábamos además las imprecisiones propias del proceso constructivo y el tamaño reducido de las unidades de estudio el tema se complicaba aún más.

Sin llegar al extremo de un análisis riguroso sobre el modelo podíamos inferir, sin embargo, que había un buen número de razones para considerar que las superficies en cuestión podían ser aproximaciones a superficies cuádricas regladas.

Aparte de la ya declarada y conocida simpatía de Gaudí hacia estas superficies alabeadas, contábamos en este caso con una argumentación adicional de tipo constructivo que contribuía a apoyar esta hipótesis. Si -tal como a esta altura de la investigación ya iba pareciendo evidente- la construcción del sombrero se basaba en la delimitación previa de la red poligonal que definía las juntas de los cuadriláteros, tenía bastante sentido pensar que las superficies alabeadas habían sido modeladas posteriormente. En este sentido, las rectas de esta poligonal -construidas o materializadas de alguna manera sobre una probable base cónica- harían las veces de los cuadriláteros alabeados a partir de los cuales se determinarían las superficies.

Esto equivale a decir que, geoméricamente hablando, Gaudí estaba construyendo en cada uno de los elementos de la malla poligonal de la chimenea, la forma más canónica que existe para determinar una cuádrica reglada: la que se sirve del doble sistema de generación definido por los lados de un cuadrilátero alabeado.

Desde el punto de vista práctico este procedimiento es bastante razonable si tenemos en cuenta que, al rellenar el espacio interior de los cuadriláteros con mortero, se puede ir dando forma fácilmente a la superficie en cuestión haciendo deslizar una regla apoyada en dos lados opuestos de cada cuadrilátero. Esta técnica, utilizada desde antaño en la alfarería artesanal para modelar cerámica, aprovecha plenamente las ventajas de esta propiedad de las alabeadas regladas, por lo que parecía bastante sensato pensar que Gaudí la hubiera

podido utilizar en este caso⁸.

Partiendo de estas consideraciones se creyó oportuno recrear este concepto en el modelo teórico, con el fin de obtener una visualización final del sombrero y poder sacar una conclusión general. La técnica empleada en este caso se basó en la creación de superficies regladas mediante la rutina correspondiente en el programa AUTOCAD. Los parámetros de dibujo se reducen en este caso a la definición de los dos elementos directrices (en este caso las rectas del cuadrilátero) y a la asignación de un valor de tabulación que define la separación entre las rectas generatrices. Al estar estas rectas repartidas uniformemente, la cuádrlica definida en este caso resulta un paraboloides hiperbólico.

Para desarrollar nuestro ejemplo se crearon las superficies tomando como rectas directrices alternativamente los lados opuestos de cada uno de los cuadriláteros de dos series representativas de la totalidad y se copiaron en toda la superficie del modelo. Se prefirió definir un doble sistema de generación por cuestiones estrictamente gráficas, ya que la direccionalidad que planteaba un único sistema de generatrices no era conveniente desde un punto de vista expresivo. De igual manera, se optó por representar las superficies planas de los triángulos de la base y del coronamiento como superficies regladas, pero con un único sistema de generación rectilínea para diferenciarlas de los cuadriláteros. Los resultados pueden verse en los planos MT8, MT9, MT10 y MT11.

En el Esq.11 puede verse un fragmento de la base del modelo en donde aparecen grafiados los elementos característicos que definen las propiedades de los paraboloides: el doble sistema de generación rectilínea, las parábolas diagonales, y la dirección del eje de la superficie. Es de destacar como en este caso, si practicamos una sección vertical del modelo que coincida con los vértices de los cuadriláteros obtendremos las parábolas principales de la superficie, pero si realizamos lo propio con secciones horizontales no ocurrirá lo mismo, debido a que este no es un plano de simetría del cuadrilátero y la resultante no es una curva principal.

En las visualizaciones en proyección diédrica del modelo que aparecen en el Plano MT9, puede comprobarse cómo los contornos aparentes del sombrero (equivalentes a las secciones verticales por los vértices) reproducen las parábolas antes mencionadas, cuyo encadenamiento continuo produce el perfil tan característico de la chimenea a que nos referíamos en el Capítulo IV.

El Plano MT10 reproduce el mismo modelo anterior en proyección axonométrica para una mayor comprensión de la realidad tridimensional del objeto.

⁸ Por otra parte, como vimos en el Capítulo III, Gaudí utilizó posteriormente esta técnica para la construcción de superficies alabeadas e, incluso, divulgó sus ventajas. El caso de la ejecución de las bóvedas de la Colonia Güell y la Sagrada Familia son quizá los ejemplos más claros en este sentido.

