

# LA GEOMETRIA I LA MECÀNICA A L'OBRADE DE GAUDÍ

**Claudi Alsina,\* Josep Gómez\* i Jordi Faulí\*\***

\* Departament d'Estructures a l'Arquitectura. Universitat Politècnica de Catalunya

\*\* Arquitecte adjunt de les obres del temple de la Sagrada Família

## Introducció

**E**ls elements geomètrics i tècnics que Gaudí utilitzà han sigut i encara són matèries que causen admiració i interès en tot el món cultural. És satisfactori poder exposar algunes de les seves troballes amb els mitjans d'avui en dia per a entendre millor la síntesi de matèries que contenien els seus projectes i difondre millor els continguts de la seva obra.

Alguns dels coetanis de Gaudí van quedar admirats dels seus mètodes, com el professor Fèlix Cardellach, que escrivia en un article publicat a l'*Àlbum del Temple* de principis de 1936: «Quan un home és veritablement genial, reflecteix la seva genialitat sobre totes les coses que toca. Per això és que la mecànica general es converteix en mecànica d'en Gaudí, en ésser empleada per ell en les seves obres. A tots els coneixedors de les actuals teories de resistència de materials no se'ls escapa la nova orientació mecànica de què van impregnades les seves construccions; però els qui com nosaltres hem tingut la fortuna de parlar d'aquestes coses amb el seu autor, hem vist... hem besllumat moltíssimes, grans, atrevides, poderoses innovacions que imposen encara més per la seva lògica constructiva.»

Totes aquestes provatures i descobertes de Gaudí tenien com a escenari l'obrador de Gaudí, el taller estudi al costat de la Sagrada Família, on les noves formes es creaven i on els seus contemporanis el conegueren.

L'estudi obrador d'Antoni Gaudí era situat a la cantonada dels carrers de Sardenya i Provença, en la mateixa illa de la Sagrada Família. Era una construcció que havia anat creixent segons les necessitats d'ús i, per tant, era el resultat de les diferents èpoques en què s'havia realitzat (figura 1).

La primera part que es construï va ser la casa del capellà custodi, cap a l'any 1887, a l'antic hort del guardià. Atès que Gaudí entrà a les obres de la Sagrada Família l'any 1883, podem considerar que va ser ell qui projectà i construï aquesta obra secundària del temple. La construcció de l'obra va ser anterior a l'acabament de la cripta. Tenia una coberta de dues vessants i amb volta de maó pla en els xamfrans. Les finestres tenien gelosies de fusta, inclinades i pintades blau ultramar-cobalt com les construccions marines mediterrànies.

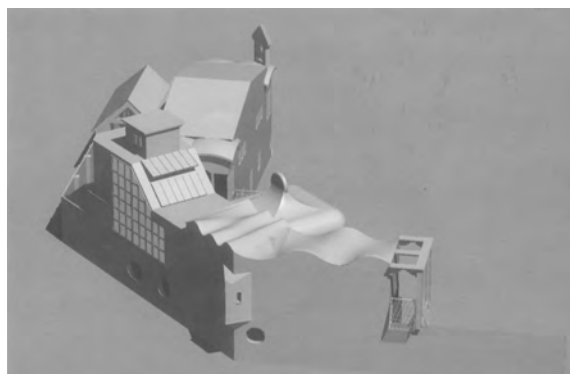


© Temple de la Sagrada Família

FIGURA 1. L'obrador de Gaudí, situat al costat de la façana de l'absis.

Joan Matamala, escultor i modelista, col·laborador de Gaudí a la Sagrada Família, escrigué a les seves memòries: «A finals del segle XIX s'inicià l'habilitació de la planta superior com a estudi de Gaudí. A començament de segle s'afegeix al xamfrà corresponent el taller fotogràfic, amb vidres als dos costats i coberta mòbil inclinada, i el magatzem de models adjunt amb la coberta de conoides»<sup>1</sup> (figura 2).

Atès que la construcció del temple exigiria un termi-



© Temple de la Sagrada Família

FIGURA 2. Imatge virtual de l'obrador de Gaudí.

1. JOAN MATAMALA FLOTATS, *Antoni Gaudí: Mi itinerario con el arquitecto*, Barcelona, Claret, 1999, p. 62-63.

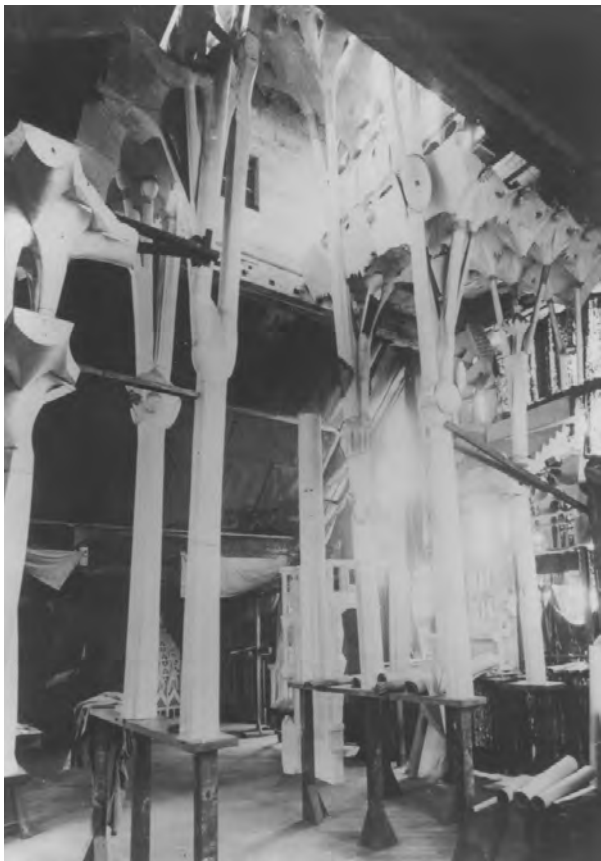


FIGURA 3. Maqueta de les naus a escala 1:10 situada a dins de l'obrador.

ni llarg, Gaudí traslladà les seves oficines al mateix solar i construï el seu estudi sobre l'habitatge del guardià, per tal d'elaborar els plànols al costat de l'obra i poder fer-ne un bon seguiment.

Aquest estudi fou durant la resta de la vida el seu estudi. Allà rebia les visites i es dibuixaven els plànols a la llum del quinqué, car en aquella demarcació encara trigà temps a arribar l'enllumenat de gas. A prop dels taulells de dibuixar, «ho il·luminaven tot dos fanals similars als de l'obra i que dos manobres s'ocupaven de mantenir».<sup>2</sup>

Al taller fotogràfic i posterior lloc de les maquetes 1:10 de la nau del temple, hi havia una part de la coberta mòbil que basculava amb contrapesos i permetia l'entrada gradual de llum natural per il·luminar la maqueta. A la part superior, una construcció que s'afegí permetia encabir-hi la maqueta completa de la nau principal, que superava els 5 m d'alçària. Uns cortinatges laterals sobre unes vidrieres, a tota l'alçària, permetien obtenir la lluminositat necessària en cada moment (figura 3). Al costat del taller fotogràfic i lloc de la maqueta de la nau, a l'angle del xamfrà, hi havia el magatzem de models. En aquesta edificació Gaudí utilitzà per primera vegada el conoide amb jàssera central al mig, que després aplicarà en la construcció de les escoles.

2. Joan MATAMALA FLOTATS, *Antoni Gaudí: Mi itinerario con el arquitecto*, Barcelona, Claret, 1999, p. 125.

En aquest lloc, Gaudí portà a terme la majoria de les seves obres i analitzà les seves teories, que es basaven, com sempre deia, en tornar a l'origen de tots els coneixements. Les aplicacions que Gaudí féu en mecànica i geometria van ser realment originals i pot ser atraient apropar-se als detalls d'alguna d'aquestes aplicacions.

## Les propostes estructurals

L'arquitectura de Gaudí és singular pel projecte i disseny de les seves estructures. Gaudí és conegut per les seves estructures espacials penjades en què cerca sempre una forma arquitectònica adaptada al conjunt de masses que ha-

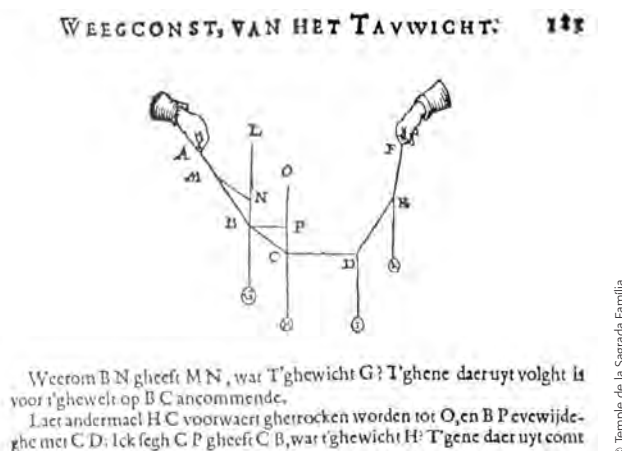


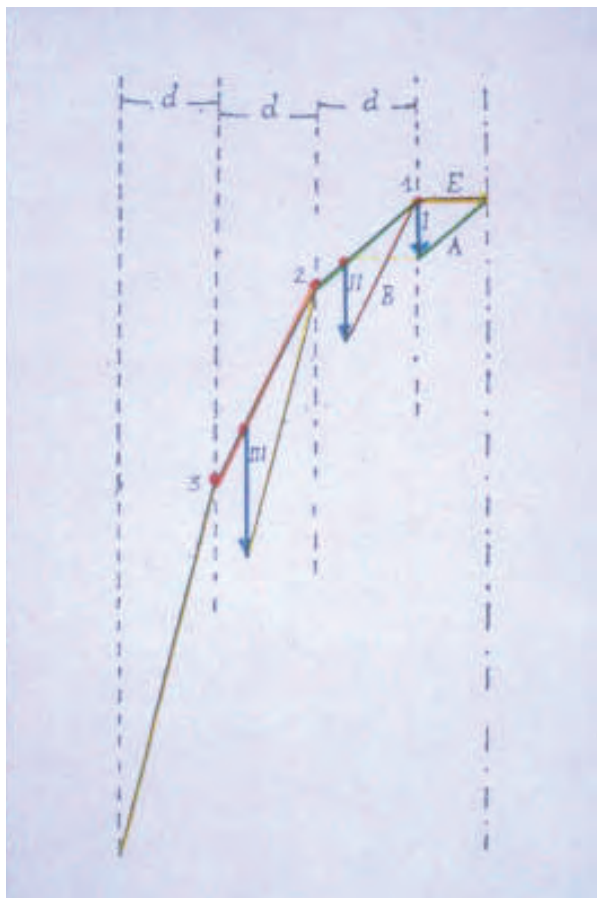
FIGURA 4. Gràfic de Stein (1586).

via de suportar, un model enginyós, síntesi del disseny arquitectònic amb l'estructura i en el qual utilitzava els arcs catenaris o funiculars.

Gaudí aprenqué els coneixements sobre arcs catenaris i funiculars en el seu període universitari (figura 4), i en les col·laboracions professionals que realitzava. Aquests coneixements foren avantguardistes i innovadors en l'arquitectura del seu temps.

Durant el seu treball professional, Gaudí anà assolint els coneixements que després li permeteren investigar i experimentar el comportament estructural de les obres que planejava. L'experiment del model catenari en el pla (la forma traccionada que adopta un fil penjat amb càrregues és la inversa de la línia comprimida que adoptaria un arc amb la longitud del fil i les mateixes càrregues considerades) ja era tingut en compte per diversos autors des de feia temps (Stevin, 1586; Belidor, 1729; Euler, 1744; Millington, 1830, etc.).

Els mètodes gràfics per a poder calcular el model catenari o funicular havien evolucionat des de feia molt temps quan Lahire, el 1695, buscà un polígon funicular gràfic per obtenir l'anàlisi de l'arc. L'any 1773, Coulomb plantejà clarament l'empenta de la clau segons la forma i les càrregues aplicades. Aquests mètodes gràfics evolucionaren durant la primera meitat del segle XIX (Lamé, Clapeyron, Navier,



© Temple de la Sagrada Família

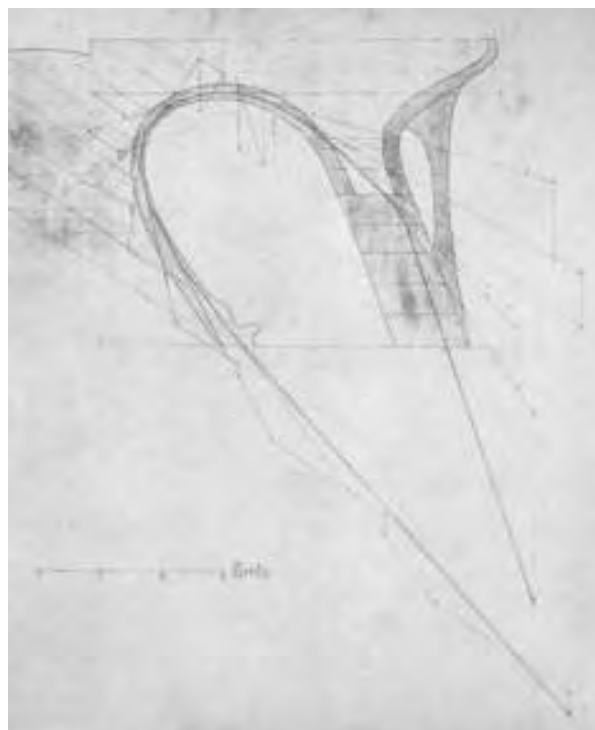
FIGURA 5. Gràfic de Joan Bergós per explicar el sistema de Gaudí de càlcul dels polígons funiculars.

Poncelet, etc.), i es van fer més efectius i aplicables en la segona meitat del segle (Culman, Scheffler, Cremona, Ritter, Williot, etc.). En l'assignatura de mecànica aplicada, que impartia el catedràtic Joan Torras i Guardiola, s'esmentava i s'explicava el mètode de Scheffler, del qual Gaudí tindria coneixement. Es considera que Joan Martorell inicià Gaudí en el càlcul gràfic, opció possible, i que en conjunt elaboraren una base del seu coneixement estructural. Una singularitat de Gaudí, en el camp estructural, és simplificar l'aplicació dels mètodes de càlcul gràfic. Joan Bergós, arquitecte, coneixedor de temes tècnics, i que tingué moltes converses i amistat amb Gaudí, escriví al llibre *Materiales y elementos de construcción* (Barcelona, Bosch, 1952, p. 258): «También ideó el procedimiento gráfico reproducido: se divide la luz en número impar de partes iguales "d" y se trazan verticales por los puntos de división, partiendo de un empuje en la clave E que se compone con el primer peso i proporcional a E; su resultante A (valor y dirección de la segunda funícula), trasladada sobre el segundo lado de la funícula, se compone con el otro peso proporcional ii obteniéndose B (valor y dirección de la tercera funícula) y así sucesivamente» (figura 5). (S'ha d'entendre que les càrregues i, ii, iii estan aplicades en les verticals de les particions d, però per una forma

operativa i per una facilitat de construcció gràfica les càrregues se situen en l'extrem de A', B'. Així també, la composició de forces s'hauria de fer, estrictament, en el punt següent a on s'efectua. Amb aquestes irregularitats introduïdes per Gaudí, el mètode resulta més operatiu d'aplicació.)

Els diversos càlculs gràfics de Gaudí publicats pels seus col·laboradors, i els documents de càlcul gràfic d'ells mateixos (Rubió, Berenguer, Sugranyes i Bergós) segueixen les pautes indicades anteriorment. Podem dir que aquest mètode pràctic era utilitzat per Gaudí i els seus ajudants en els càlculs gràfics que feien.

Gaudí utilitzà els càlculs gràfics en molts dels seus projectes. En la nau de la Cooperativa Mataronense, determinà un arc parabòlic de fusta que transmet les càrregues fins a terra. Aquest arc, format amb tres taulons de fusta units amb perns, determina l'estructura resistent que es calcularia amb el mètode gràfic. El valor de la força en l'arc funicular i el descentrament de l'arc funicular respecte de l'eix real de l'estructura fixen els esforços per al seu dimensionament, com ho demostren els documents utilitzats per Gaudí i els seus col·laboradors. En un altre projecte, el de la cascada de la Casa Vicens (desapareguda), l'arc inferior recollia clarament el resultat gràfic funicular de les càrregues que els muntants de totxo li transmetien des de la part superior. En els murs de contrafort amb porxada del parc Güell la forma resultant és obtinguda amb el funicular de les càrregues actuant (figura 6). Els documents publicats per Rubió i Bellver, ajudant de Gaudí, ho corroboren i



© Temple de la Sagrada Família

FIGURA 6. Càlcul de l'estructura i forma d'un mur de contenció del parc Güell.



segueixen les condicions gràfiques anotades anteriorment del mètode utilitzat per Gaudí, on les càrregues són les gravitatòries i les empentes de contenció de terres. En altres obres, com ara les cavallerisses Güell, el Palau Güell, el col·legi de les Teresianes, Bellesguard, les golfes de la Casa Batlló i la Casa Milà, la Sagrada Família, etc., els arcs parabòlics o catenaris intenten seguir l'arc funicular que suportava les càrregues.

No obstant això, la singularitat de Gaudí és aplicar-lo espacialment i crear la maqueta de disseny de l'església de la Colònia Güell. Primerament estudià la formació de les torres cúpules mitjançant uns elements de corda als quals penjava cadenes com a pes, i obtenia una forma movable en funció de les càrregues (cadenes) que hagués considerat. La longitud de la cadena donava la càrrega considerada. Només es conserva una sola fotografia de l'experiment de la primera maqueta, de la qual podem deduir que només treballava amb la meitat de les voltes centrals, ja que fixava l'eix de les cúpules centrals mitjançant un cable vertical tensat que li permetia treballar amb la meitat de la maqueta (figura 7). D'aquest estudi passà a realitzar una maqueta completa a escala 1:10 amb saquets de perdigons pesats, que representaven les càrregues en cada element de coberta. Reproduïa en maqueta la totalitat del model i obtenia les càrregues a les bases de les columnes en situar uns dinamòmetres en els arrencaments dels fils que simulaven les columnes. De la lectura del dinamòmetre deduïa les tensions que suportaven les columnes. Col·locant un teixit per l'interior de la maqueta de la nau obtenia l'espai interior i a la inversa del projecte de l'església de la Colònia Güell, que després redibuixaria sobre la fotografia obtinguda (figura 8). Aquest procés va ser lent i laboriós. La paralització posterior de les obres el 1914 de l'església de la Colònia Güell deixà aturat el treball previst en la maqueta, però amb el desig de continuar-lo. El pas del temps, la mort de Gaudí i, posteriorment, la Guerra Civil deterioraren tota la maqueta, que es pot veure ara en el Museu de la

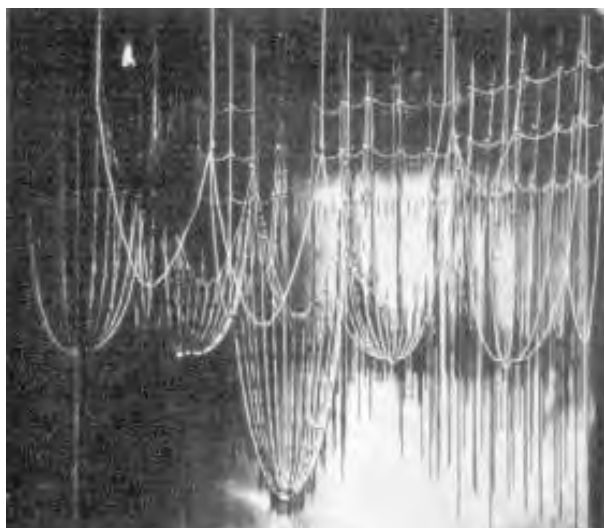


FIGURA 7. Primera maqueta invertida per a calcular l'església de la Colònia Güell.



FIGURA 8. Maqueta polifuncional invertida de l'església de la Colònia Güell.

Sagrada Família reproduïda per un grup d'arquitectes dirigit per Frei Otto.

Cèsar Martinell a «Gaudí i la Sagrada Família explicada per ell mateix», transcriu les paraules següents de Gaudí: «Els



FIGURA 9. Model on es diferencien amb colors els diferents paraboloides que formen la coberta de la nau central.

funicles de la Sagrada Família els he trobat gràficament, i els de la Colònia Güell els vaig trobar experimentalment; però els dos procediments són el mateix i l'un és fill de l'altre.»

Segons Gaudí, l'experiència de l'església de la Colònia Güell condicionà el seu darrer gran projecte estructural: el projecte de les naus i torres del temple de la Sagrada Família, al qual Gaudí es dedica intensament des de l'any 1914. L'any 1923, Gaudí explica l'estabilitat del temple a l'*Anuario* de l'Associació d'Arquitectes de Catalunya en un article subscrit pel seu ajudant Domènec Sugranyes, que reproduïx el contingut d'una conferència que aquest mateix donà. L'estabilitat de la nau és el resultat d'un càlcul espacial de funícules catenàries, que es desdobra en dos plans en ser la nau doblement simètrica. Considerant els pesos de la coberta de la nau (similars als saquets del model de l'església de la Colònia Güell) i les direccions de les columnes (similars als fils del model citat), modela la forma i obté els resultats de les tensions en les columnes d'una manera senzilla i brillant, basant-se en els mateixos principis que el model catenari de la Colònia Güell. Determina formalment la coberta i el sostre de la nau de la Sagrada Família mitjançant superfícies reglades i n'obté el centre de gravetat component el pesos parcials de cadascuna de les parts geomètriques en què es divideix (figura 9). Els pilars de suport tindran millor rendiment si se situen en aquests centres de gravetat (figura 10). És similar a sostenir un barret



FIGURA 10. Versió de la maqueta de la nau principal (1923).

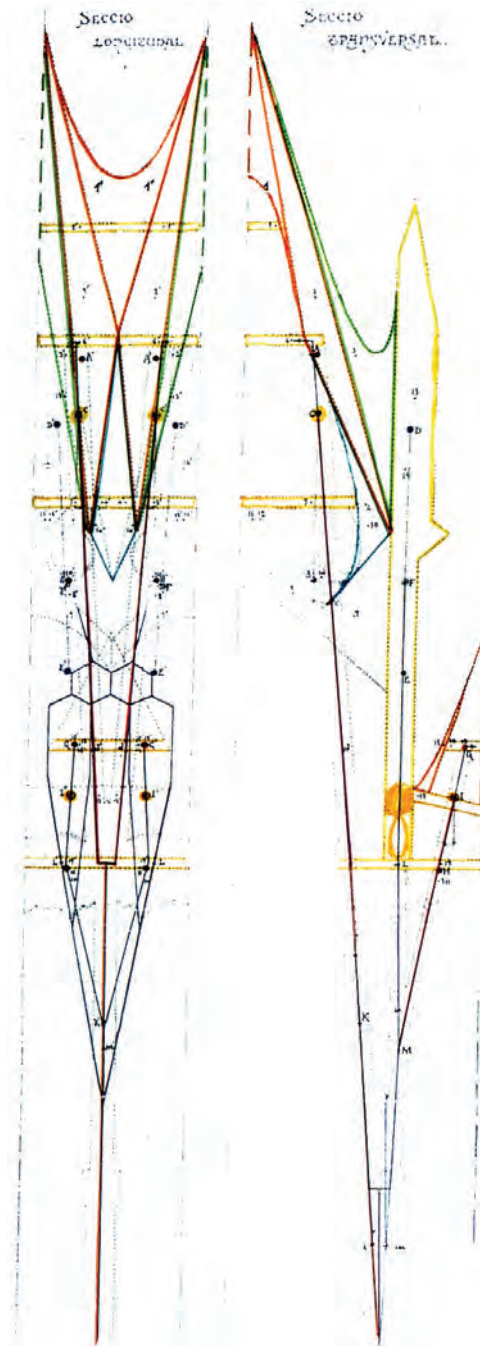


FIGURA 11. Càlcul gràfic de les naus realitzat per Gaudí i explicat per Sugranyes a l'Associació d'Arquitectes (1923).

amb una barra que passi pel centre de gravetat del barret: les possibilitats de bolcar es redueixen. Estem també aplicant el principi invers però similar a sostenir un element amb un cordill. Si la direcció del cordill passa pel centre de gravetat de l'element, aquest es mantindrà estàtic. Si no, es mourà fins que la direcció del cordill passi pel centre de gravetat. Per tant, que la columna suport arrenqui del centre de gravetat de l'element a sostenir és un principi correcte que Gaudí aplicava estàticament. En aquest cas, el del càlcul de la nau de la Sa-





FIGURA 12. Visió de la nau principal del temple.

grada Família, Gaudí marca la pauta del comportament catenari o funicular, definint uns punts de convergència de la columna superior de la nau, amb la resultant del pes de la façana superior, i amb la càrrega del sostre lateral i pinacles, i obté per fi la resultant lleugerament inclinada de les columnes de la nau de la Sagrada Família (figura 11). Un enginy estructural per a obtenir de manera senzilla una forma equilibrada que segueix els funiculars o catenaris de l'estabilitat de càrregues verticals i que no requereix els grans contraforts de les catedrals gòtiques. És tota una evolució en les possibilitats del càlcul gràfic i de les funícules o catenàries que de sempre acompanyaren Gaudí en el seu disseny arquitectònic.

### Una columna nova

Antoni Gaudí ideà per a les naus del temple de la Sagrada Família una columna nova en la història de l'arquitectura, que li permetia, amb una forma estàticament molt adequada i resistent, combinar i unir les diferents ramificacions dels arbres estructurals, de manera que hi hagués continuïtat entre les arestes i les superfícies de les columnes adjacents (figura 12). Desitjava que les columnes adquirissin un creixement helicoidal similar al dels arbres i, per això, les columnes que dissenyà per a les primeres solucions de les naus eren helicoidals, salomòniques, amb una base poligonal (triangle equilàter, quadrat) que es des-

plaçava fins a la part superior resseguint una espiral, solució que no el convenia perquè la seva capacitat resistent en relació amb la seva massa és baixa en comparació amb altres columnes clàssiques.

Gaudí pretenia obtenir una columna resistent i d'una secció contínuament variable com a expressió del movi-



FIGURA 13. Columna de base quadrada, que es transforma en un octàgon, en un polígon de setze costats i s'acosta al cercle cap al cap superior.

ment del seu creixement. Així, la columna salomònica inicial es convertí en una columna doblement helicoidal, fruit de la intersecció de dos helicoides de gir invers sorgits de la mateixa base. La intersecció de dues columnes salomòniques o helicoidals inverses provoca, a mesura que la columna s'eleva, la reducció progressiva del diàmetre dels vèrtexs de la columna, fins a acostar-se al cercle en el cap superior, i també, com a conseqüència, la multiplicació del nombre d'arestes, que esdevindrien infinites en el cercle (figura 13).

Gaudí establí les lleis de generació d'aquesta nova columna en el model de guix a escala 1:10 de la columna de la nau central, de 140 cm de diàmetre. Segons el sistema de modulació establert per a la Sagrada Família, els diàmetres de totes les columnes són dotzenes parts del diàmetre de la columna principal del centre del creuer, 210 cm. En el cas de la columna inferior de la nau central, 140 cm correspon a les 8/12 parts. La secció inferior de la columna és una estrella de vuit puntes generada per dos quadrats girats 45°. El contorn són vuit paràboles convexes i vuit de còncaues enllaçades entre si i tangents als costats dels quadrats (figura 14). La intersecció del doble gir helicoidal d'aquesta plantilla provoca entre la base i els 8 m d'altura la progressiva desaparició de les paràboles convexes fins a deixar el fust de la columna amb només les paràboles còncaues, però setze (el doble de les que hi havia a la base), i havent adquirit la columna setze arestes sorgides dels centres de les paràboles de la base (figura 15). S'arriba a aquestes setze paràboles còncaues iguals en una altura de 8 m, el mateix nombre de vèrtexs de la plantilla inicial de la columna, la qual ha girat 11,25° per generar l'helicoide amb gir horari i 11,25° més per generar l'helicoide amb gir

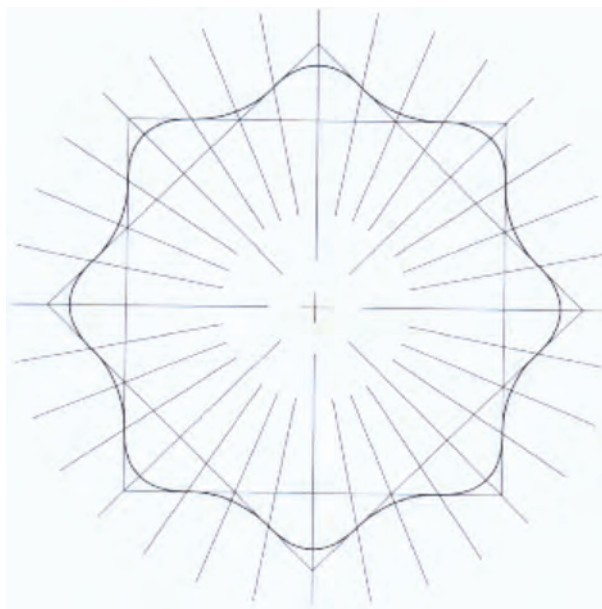


FIGURA 14. Secció de la base de la columna de la nau central (vuit elements).

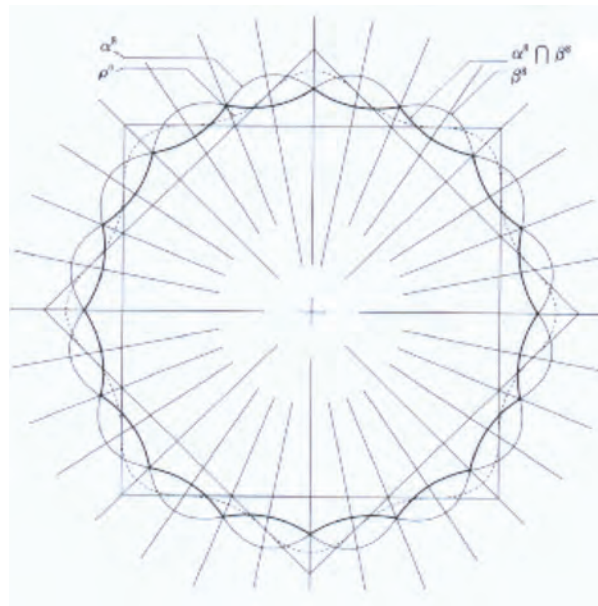


FIGURA 15. Secció de la columna de la nau central a 8 m d'altura.

contrari. En els quatre metres següents, dels 8 als 12, la secció formada per setze paràboles gira 5,675° en doble sentit per reduir el diàmetre dels vèrtexs i doblar el nombre de paràboles fins a trenta-dos. En els dos metres següents el nombre de paràboles es converteix en seixanta-quatre i la columna s'atura als 14 m. Si seguíssim el mateix procediment la columna doblaria successivament el nombre d'arestes i paràboles cada vegada en una altura i angle de gir meitat dels precedents fins a arribar als 16 m al cercle en un nombre de girs infinit (figura 16).

L'altura de cada gir és la meitat del gir anterior:  $h_n = h_{n-1} / 2$ , i també l'angle total de cada gir és la meitat de l'anterior:  $a_n = a_{n-1} / 2$ .

Amb aquesta regla, s'arribaria al cercle en una altura doble de l'altura del primer gir (és a dir, a 16 m, ja que el primer gir és a 8 m) i havent girat la base 22,5° en cada un dels dos sentits.

$$H = h_1 + h_1/2 + h_1/4 + h_1/8 + h_1/16 + \dots = 2h_1$$

L'esveltesa de la columna és 1:10 (1,40 m / 14 m).

El diàmetre mínim de la pell de la columna és sempre el mateix en tota l'altura i es correspon amb el del cercle final. La secció que provoca la forma de la columna amb el doble gir invers és sempre la de la base, de vuit paràboles convexes i vuit de còncaues. La resta de les columnes inferiors del temple tindran la mateixa esveltesa i el mateix creixement, proporcional al seu diàmetre i al nombre de vèrtexs de la base; per exemple, la columna del centre del creuer de 210 cm de diàmetre i 12 vèrtexs a la base arribarà als 21 m d'alçària (12 + 6 + 3), més una base d'1,2 m (figures 17 i 18).





FIGURA 16. Dues columnes de la nau central, construïdes amb granit.

### La columna nova en el sistema estructural arborescent

Segons escrivien James Johnson Sweeney i Josep Lluís Sert (*Antoni Gaudí*, Buenos Aires, Infinito, 1961), l'arquitectura de Gaudí «subratlla l'expressió de les formes que regeixen les lleis estàtiques». I és precisament la descoberta d'aquesta nova columna el que li permet donar continuïtat a les superfícies que enllacen les diferents columnes

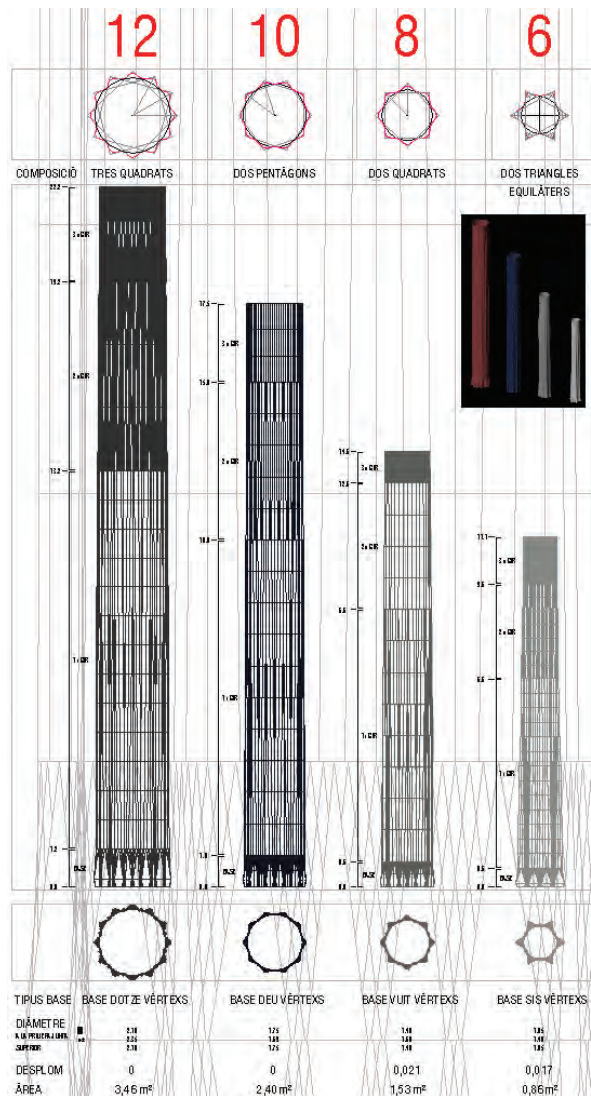


FIGURA 17. Sèrie de les quatre columnes principals del temple.

del sistema estructural arborescent, de manera que la forma serà expressió també de la continuïtat de les funícules estructurals.

Les columnes que connecten directament amb la volta dels 30 m d'alçària de la nau principal o del deambulatori de l'absis són de dos diàmetres i tipus segons el pes que suporten: la primera, de base inferior quadrada i diàmetre de 52,5 cm (3/12 parts de 210 cm), i l'altra, de base en forma de pentàgon també de costat de 52,5 cm i un diàmetre lleugerament superior als 70 cm (4/12 de 210 cm). Les dues columnes arriben a les voltes havent transformat el quadrat i el pentàgon en el cercle. Unes altres columnes inferiors d'enllaç recullen grups de cinc, quatre o tres d'aquestes columnes quadrades o pentagonals per enllaçar-les cap a baix al nus o capitell de la columna inferior de la nau central o de la nau lateral. Aquestes columnes d'enllaç intermèdies tindran una planta superior que dependrà de la forma de la base de les columnes que recullen, secció que sempre es convertirà en un cercle a dins del nus o capitell inferior (figura 19).

© Temple de la Sagrada Família

© Temple de la Sagrada Família





FIGURA 18. Models de les quatre columnes.

La més senzilla d'aquestes columnes d'enllaç és la de la nau lateral, de 7,50 m d'alçària, que recull quatre columnes quadrades iguals de suport de voltes i cobertes (figures 20 i 21). La planta superior de la columna és, com és lògic, un rectangle, amb un dels quadrats a cada vèrtex. Les dimensions del quadrat són: 157,5 cm (9/12 parts de 210 cm) per 105 cm (6/12 parts de 210 cm). A mesura que la columna descendeix, el rectangle gira alhora 22,5° en sentit horari i antihorari per convertir-se en un quadrat en el mig de la seva altura tot creant unes suggestives corbes. Posteriorment, en una altura del quart del total, el quadrat es convertirà en un octàgon seguint el mateix procediment del doble gir invers durant 11,25°: els costats del quadrat es retallaran fins a convertir-se en l'octàgon. Després, l'octàgon es convertirà en un polígon de setze costats i, aquest, en un de trenta-dos.

L'arbre complet d'aquestes columnes de la nau lateral parteix d'un cercle a la part inferior, que es converteix en un quadrat i després en un rectangle, el qual és el suport de quatre columnes quadrades que arribaran a la volta convertides en quasi un cercle. Totes aquestes transformacions es produeixen gràcies al mateix mecanisme de la intersecció de dos helicoides inversos.

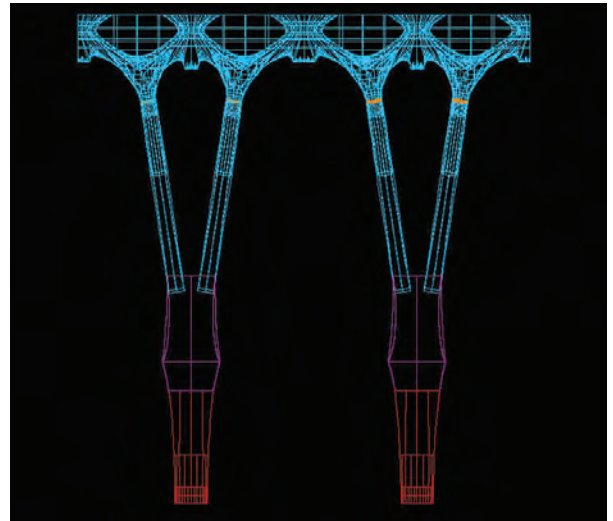


FIGURA 19. Columnes i voltes del damunt de la cantoria de la nau lateral (dibuix informàtic).

A la nau central, al creuer i a l'absis hi ha tres columnes més d'enllaç que connecten les columnes de suport de les voltes amb els nusos de les columnes inferiors del temple. Tenen les formes i plantes següents, depenent de la base de les columnes que suporten:

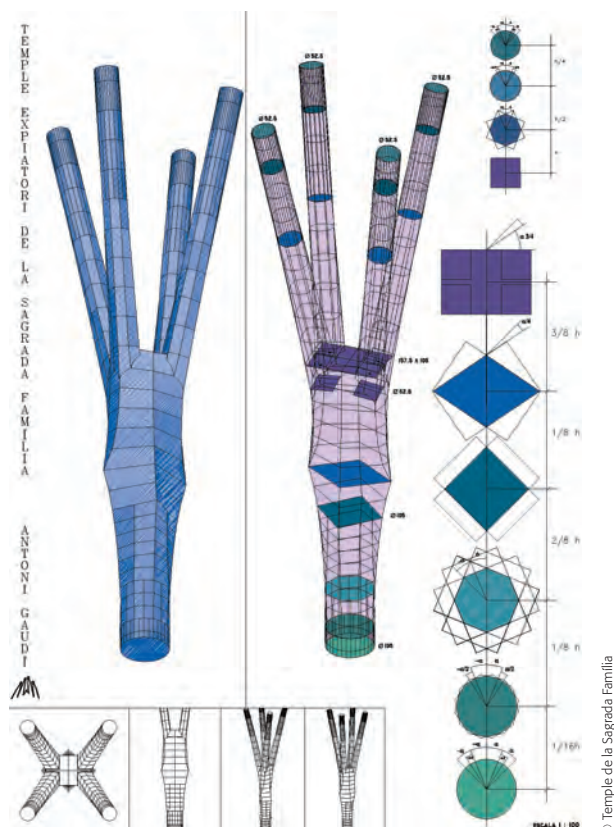
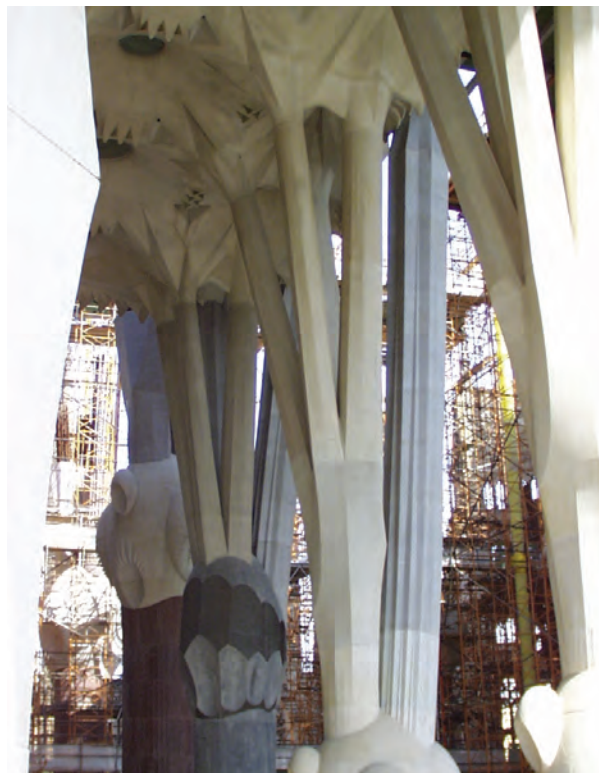


FIGURA 20. Columna d'enllaç de la nau lateral (del damunt de la cantoria): geometria.



© Temple de la Sagrada Família

FIGURA 21. Columna de la nau lateral del damunt de la cantoria.



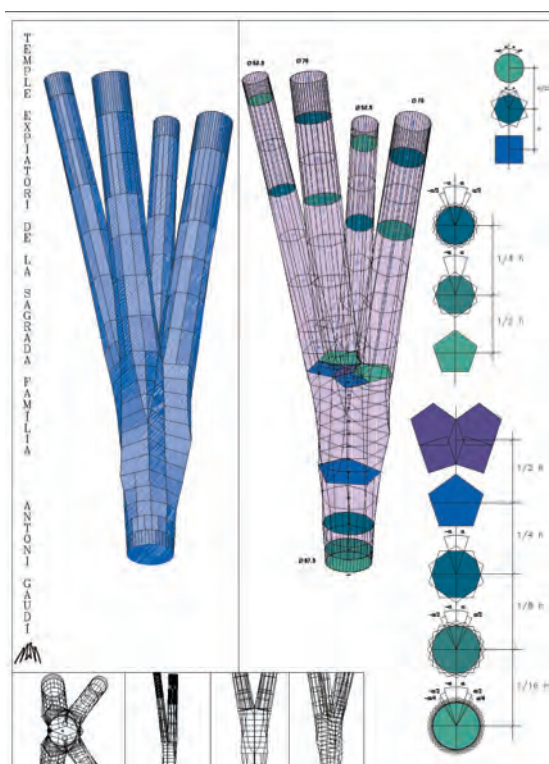
© Temple de la Sagrada Família

FIGURA 23. Columna d'enllaç de la columna de la nau central.

— Al damunt de les columnes de base octogonal parabòlica de la nau central, la planta superior de la columna és una macla de dues columnes quadrades i dues de pentagonals, que es transformen en un pentàgon al centre de

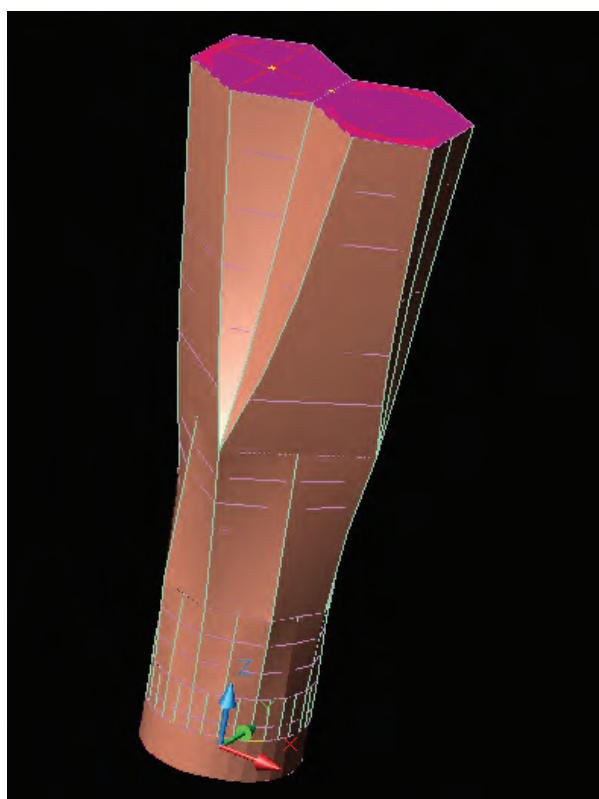
la columna i, després, en un decàgon, un polígon de vint costats i un altre de quaranta (figures 22 i 23).

— Al damunt del nus de les columnes centrals del creuer, la planta superior de la columna és la macla de dos



© Temple de la Sagrada Família

FIGURA 22. Columna d'enllaç de la columna de la nau central: geometria.



© Temple de la Sagrada Família

FIGURA 24. Columna d'enllaç del creuer (dibuix informàtic).



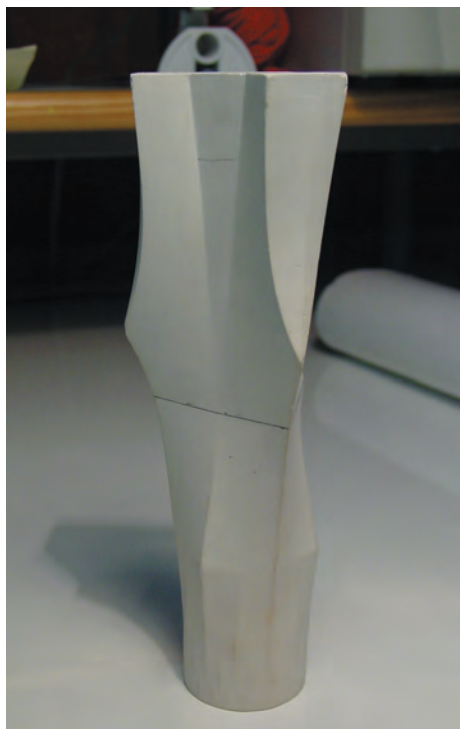


FIGURA 25. Columna d'enllaç de l'absis (model de guix).

Temple de la Sagrada Família

Sèrie	12	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
Intereix	90	75	67,5	60	52,5	45	37,5	30	22,5	15	7,5
Fracions	1	5/6	3/4	2/3	7/12	1/2	5/12	1/3	1/4	1/6	1/12
∅	210	175	157,5	140	122,5	105	87,5	70	52,5	35	17,5
Formes											
Nomenclatura	Columna 12	Columna 10	Columna 9	Columna 8	Columna 7	Columna 6	Nau central	Nau lateral	Nau lateral	Columna	Columna
	210	-35= 175	-35= 140	-35= 105	-35= 70	-35= 35					
	6/6	5/6	4/6	3/6	2/6	1/6					
	3	2	2	1	2	2	1	1	1	1	
mesures											
El líquid del nus 8	180	150	135	120	105	90	75	60	45	30	15
El líquid del nus 10	360	300	270	240	210	180	150	120	90	60	30
El líquid del nus 12	450	375	337,5	300	262,5	225	187,5	150	112,5	75	37,5
	540	450	405	360	315	270	225	180	135	90	45

FIGURA 26. Modulació de les dimensions del temple.

3. *Modulació*: L'ús de mòduls prefabricats al parc Güell, el sistema de proporcions a la Sagrada Família (1, 1/3, 1/4, 1/2, 3/4, 2/3, 1) (figura 26) o el reticulat a l'estructura de la Casa Milà, són exemples definitius del gust gaudinià per ordenar l'espai modulant (modulació que no és mai evident quan l'obra ja s'ha recobert i acabat).

4. *Moviment helicoidal*: Aquest principi combina de manera complexa rotacions al voltant d'un eix i translacions en la direcció de l'eix, i crea així un interessant moviment ver-

hexàgons, que es transforma en un quadrat al centre de la columna i en un octàgon i uns polígons de setze i trenta-dos costats en la meitat inferior (figura 24).

— Al damunt de les columnes de l'absis, una macla de dos quadrats i un pentàgon es converteix en un triangle equilàter, després en un hexàgon, en un dodecàgon i en un polígon de vint-i-quatre costats, proper al cercle, amb el qual la columna entra en el capitell el·lipsoïdal inferior (figura 25).

### La creativitat tridimensional geomètrica

A continuació sintetitzarem algunes de les característiques dels recursos d'exploració de l'espai que Gaudí utilitzà en les seves obres:

1. *Translació*: És el procés de repetir desplaçant, creant l'efecte sanefa, que Gaudí usa també especialment a Bellesguard, als arcs del col·legi de les Teresianes, el rosari d'esferes de pedra del parc Güell, etc.

2. *Simetrizació*: És el procés d'emprar plans de simetria, generant objectes amb simetria especular. La façana de les cases Calvet i Batlló, l'escalinata d'accés al parc Güell, les plantes del Palau Episcopal d'Astorga, etc., són exemples de simetrizació. Els dels seus estudis estereofuniculars usant fils, cadenes i càrregues per a obtenir (reflectida en un mirall) l'estructura buscada, corresponen a una interessant simetrizació estructural.



FIGURA 27. Pinacles de la façana de la Passió.



tical lligat a les hèlices cilíndriques, l'helicoide i les rampes helicoidals.

5. *Semblances helicoidals*: Consisteix a afegir al procés descrit anteriorment la possibilitat de fer homotècies, i crear un efecte propi de les hèlices en cons. Les xemeneies del Palau Güell o l'agulla del pavelló d'entrada al parc Güell en són bells exemples.

6. *Arrodoniment*: Correspon al procés de suavitzar angles i punxes afegint contorns suaus emprant paràboles, arcs de cercle, perfils sinusoidals, etc. En un cas extrem tindrem la deformació topològica suau d'un cos. Trobem aquest efecte a l'entrada del parc Güell, a la façana de la Casa Milà, a la base de les columnes inferiors de les naus de la Sagrada Família, etc.

7. *Maclatge*: L'operació, complexa, d'intersecar diverses figures geomètriques culmina en l'obra gaudiniana a la Sagrada Família amb el maclatge de superfícies reglades, el·lipsoides, i, molt especialment, amb la creació dels pinacles dels campanars, fent maclatge de cubs i octaedres (figura 27).

8. *Buidatge*: Aquest procediment correspon a obtenir un cos espacial per substracció de determinades parts, i el trobem, per exemple, a l'arc de la porta principal del Palau Episcopal d'Astorga a Lleó, o quan amb un dit es crea un fris en la motllura de certes portes de la Casa Milà i es treu el material corresponent.

9. *Dissecció*: Aquest principi, de dissecar figures espacials (en especial superfícies) i aprofitar-ne tan sols una part, és usat per Gaudí molt selectivament, de manera que

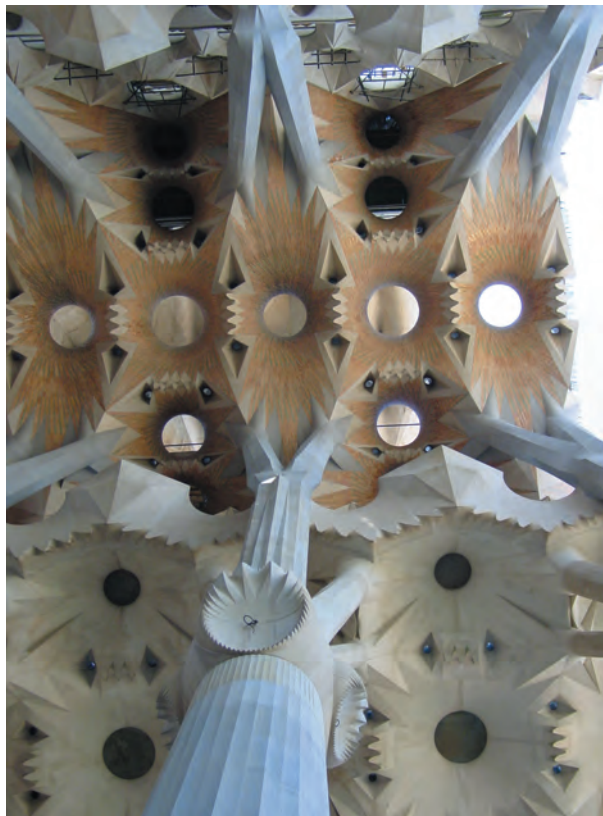


FIGURA 28. Vista de les voltes de la nau principal.



FIGURA 29. Fotografia del model original de les voltes de la nau lateral.

de vegades es fa difícil descobrir el motlle de procedència. Per exemple, Gaudí usa magistralment parts de l'hiperboloid d'una fulla i del paraboloid hiperbòlic a la Sagrada Família.

10. *Fractalitat*: El principi natural de la fractalitat en el creixement de les branques dels arbres és aprofitat per Gaudí en el disseny de columnes de la Sagrada Família: el «tronc» dóna pas a través dels «nusos» el·lipsoidals a noves «columnes-branques». Una manera magistral de distribuir i transmetre les càrregues superiors (figura 28).

11. *Autosemblança*: Aquest és el principi d'usar alhora una mateixa forma amb mides molt diferents, a escales distants. Gaudí en fa un ús magistral quan a la Sagrada Família usa paraboloides hiperbòlics de grans dimensions per enllaçar els hiperboloides de les voltes i per resoldre les cobertes, alhora que usa models minúsculs de la mateixa superfície per a resoldre l'entrega de les columnes al terra i detalls de les voltes.

### Superfícies reglades gaudinianes

Una de les grans aportacions de Gaudí a l'arquitectura moderna ha estat l'ús constructiu de les superfícies reglades. Moltes d'aquestes superfícies tenien una distingida història en l'àmbit geomètric, però fou precisament Gaudí el primer arquitecte que s'adonà de l'interès arquitectònic que algunes podien tenir.

Gaudí conegué les superfícies reglades en la seva època d'estudiant, especialment a través dels estudis de geometria descriptiva fets amb el text de Leroy.<sup>3</sup> Més enllà de les corbes especials com les catenàries, les espirals, les sinusoides, les còniques, les corbes arrodonides i les formes poligonals, la gran creativitat gaudiniana es troba en l'ús de les superfícies reglades. En aquest camp, al marge dels cilindres, cons, helicoides i rampes helicoidals, voldríem destacar el cas de dues quàdriques reglades:

1. *Hiperboloides d'una fulla*: Aquestes notables superfícies estan formades per rectes que es recolzen entre dues el·lipses iguals i paral·leles i uneixen una col·lecció ben definida

3. C. F. A. LEROY, *Géométrie descriptive*, París, 1985.



FIGURA 30. Voltes de la nau central.

de punts corresponents entre les dues corbes. Aquestes superfícies tenen dues famílies de rectes generadores, unes en un sentit i les altres en sentit contrari, i representen un cas entre els cons el·líptics i els cilindres el·líptics.

El cas comú de revolució resulta també del gir d'una hipèrbola entorn de l'eix de simetria que no talla a la corba. Aquesta superfície reglada també és descriptible com el conjunt de rectes que es recolzen simultàniament en una terna de rectes que es creuen dos a dos, sense que cap parella estigui en el mateix pla i sense que totes siguin paral·leles a un mateix pla.

Fou una superfície introduïda per Gaudí en arquitectura després de descobrir que era una forma òptima com a campana. L'usà en columnes del Palau Güell i de la Casa Calvet i formant voltes o finestrals a la Sagrada Família, sempre lligada a la il·luminació del temple (figures 29 i 30).

2. *Paraboloides hiperbòlics*: El paraboloides hiperbòlic, una de les superfícies més importants i originals usades per Gaudí, és una superfície reglada formada per rectes que recolzen en dues rectes que es creuen a l'espai de manera ordenada, és a dir, establint-se una correspondència bijectiva entre els corresponents punts de recolzament. Cal notar que si es consideressin «totes» les possibles rectes recolzades en les dues directrius, aleshores obtindríem tot l'espai.

D'acord amb un teorema de J. Binet, donada qualsevol superfície  $S$  guerxa, reglada i no desenvolupable, i una recta  $r$  de  $S$ , aleshores la superfície formada per totes les rectes dels vectors normals a  $S$  al llarg de  $r$  és el paraboloides hiperbòlic, i aquesta superfície té, doncs, un paper rellevant en tota la geometria diferencial de superfícies reglades. Noteu que la superfície del producte  $z = x \cdot y$  de nombres reals és un paraboloides hiperbòlic.

La primera obra en la qual Gaudí usa la forma del paraboloides hiperbòlic és el 1884 a la glorieta del Camp de les Figueres de la Finca Güell a les Corts de Sarrià: és una parella de paraboloides simètrics fets de maons i que suporten part del terra del mirador. En els acabats d'alguna xemeneia del Palau Güell s'aprecien també uns petits pa-

raboloides hiperbòlics. Unes primeres presències ja més importants les trobem en algunes parts del sostre de la cripta de la Colònia Güell, especialment a la zona del pòrtic, i a la coberta del pavelló de l'entrada al Parc Güell, forma que es troba decorada amb el trencadís multicolor. Serà, però, a la Sagrada Família on els paraboloides hiperbòlics tindran la seva culminació.

Un primer cas el trobem als finestrals laterals, on els paraboloides hiperbòlics s'acoblen a les sofisticades formes dels hiperboloides d'un full presents al voltant del centre el·líptic, formant part del finestral. Un segon cas es troba a les bases de les grans columnes del porxo de la façana de la Passió (figura 31), on creen una suau transició entre la planor del terra i l'inici de les columnes i a les columnes que suporten els finestrals de la nau central, on una combinació de paraboloides i mitjos paraboloides creen un passadís de perfil parabòlic (figura 32).

Al sostre de les naus laterals, els arbres de columnes són rematats per capitells hiperboloidals, i s'usen els paraboloides hiperbòlics com a solució per a suavitzar la intersecció dels hiperboloides d'un full de les lluernes, tot aprofitant restes dels hiperboloides implicats per a generatrius dels paraboloides hiperbòlics. A les mateixes voltes, petits paraboloides resolen magistralment la intersecció de dos hiperboloides i es converteixen en uns elements també decoratius amb color verd i daurat que formen angles de  $90^\circ$  i produeixen un efecte sorpre-



FIGURA 31. Base de les columnes del porxo de la façana de la Passió.





© Temple de la Sagrada Família

FIGURA 32. Passadís de columnes generades per paraboloides.

ment quan es veuen en conjunt (figura 33). Als nusos o capitells de les columnes de les naus, grups de paraboloides ressegueixen la intersecció de dos el·lipsoides (figura 34).

La culminació en l'ús dels paraboloides hiperbòlics es donarà a la coberta superior de les naus i sacristies, on les dimensions seran molt grans, així com també als campanars i al cimbori, on aquestes superfícies, que exteriorment mostraran la seva part cònca, arribaran a gran altura.

### La tecnologia en el procés de disseny i construcció actuals

Els reptes estructurals que suposa resoldre el suport de les torres centrals del temple previstes per Gaudí amb un sistema de columnes arborescents, tenint també en compte les sol·licitacions previstes en les normatives sísmiques i de vent, impliquen trobar respostes arquitectòniques i estructurals adients a partir d'estudiar les enormes possibilitats de les formes gaudinianes d'aquest projecte. L'ús del CAD en tres dimensions (CADD5 i Mechanical Desktop) permet assajar i visualitzar diferents solucions a partir dels models i dibuixos originals, abans de posar-les a prova en la maqueta de guix del conjunt, tot preveient ja en el dibuix els condicionants del procés constructiu posterior (figura 35). Els dibuixos de CAD en 3D es fan a l'oficina tècnica del temple, a la Universitat Politècnica de Catalunya i al Reial Institut de Tecnologia de Melbourne.



© Temple de la Sagrada Família

FIGURA 33. Conjunt de columnes i voltes de la nau central, generats per helicoides, hiperboloides i paraboloides.



© Temple de la Sagrada Família

FIGURA 34. Detall del nus de les columnes de la nau central, amb estrellats generats per paraboloides.





© Temple de la Sagrada Família

FIGURA 35. Dibuix de les voltes de la nau lateral i la cantoria.

Per a la determinació dels esforços en el càlcul estructural s'utilitzen models informàtics de barres i elements finits (ANSYS), que modelitzen la complexa realitat de la forma resistent.

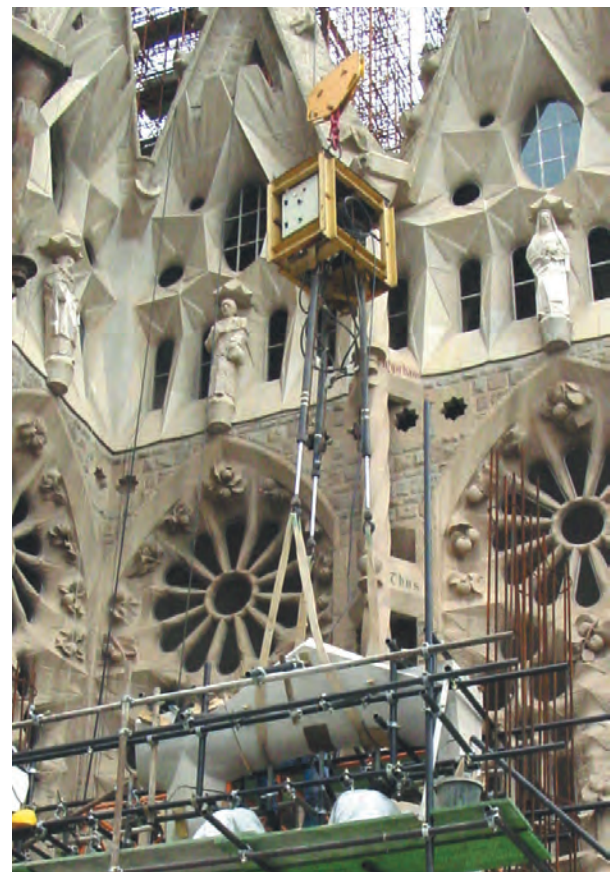
Fèlix Cardellach escriví en el mateix text esmentat abans: «Però, per a comprendre plenament en Gaudí, no n'hi ha prou amb veure-li les seves obres: s'ha de presenciar com les fa, i aleshores trobarem un deversall d'imaginació mecànica repartida en els menors detalls i procediments; veurem nous sistemes de motlluratge de pedres, noves formes de plantilles... i fins fórmules enginyoses aplicades als forats per a elevar els carreus... i fins i tot en l'apilament dels materials hi veurem el seu art i formes noves.»

Aquestes paraules defineixen Gaudí com un constructor complet, que s'ocupa de tots i cada un dels detalls del procés constructiu. Les seves propostes arquitectòniques el portaven sovint a idear mecanismes que en fessin possible la construcció. El projecte que creà per a la Sagrada Família reclama encara avui un esforç per trobar els sistemes constructius adequats, de manera que esdevé un laboratori de la construcció. S'hi apliquen formigons d'alta resistència, s'hi col·loquen prefabricats de formigó de grans dimensions, encofrats de gran magnitud de diferents materials



© Temple de la Sagrada Família

FIGURA 36. Encofrat mòbil per a la construcció d'un escala de cargol.



© Temple de la Sagrada Família

FIGURA 37. Trípod hidràulic per a la col·locació de peces.

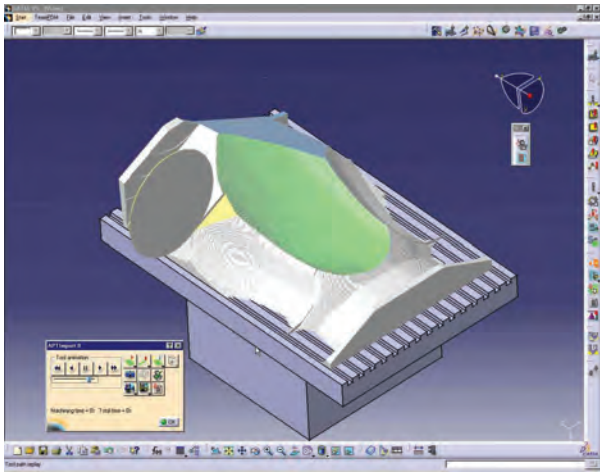


FIGURA 38. Simulació del tall d'un element de pedra.

© Temple de la Sagrada Família



FIGURA 40. Imatge del taller de modelistes de guix, amb models i maquetes de diferents escales.

© Temple de la Sagrada Família

(de polièster i fibra de vidre, de fusta en formes guerxes, de guix, etc.), s'hi executen immensos models de guix a escala natural amb l'ajut de processos de mecanització informàtica, etc. La instal·lació de les bastides és com un projecte paral·lel que demana un esforç important per idear des de la mateixa obra mecanismes especials, com bastides mòbils adaptades a la construcció de columnes, trípodes hidràulics per a situar correctament gran peces a l'espai (figura 36), encofrats mòbils per a lloses d'amples escales de cargol que es desplacen en rails helicoidals (figura 37), etc.

La seva construcció desperta l'interès d'empreses de qualitat, que hi aporten l'experiència i els recursos, per exemple en el tall d'elements de pedra, el qual s'executa amb diferents sistemes, des de la utilització de sistemes de control numèric en el tall de les columnes de doble gir in-

vers, o el tall de pedra a partir de documents STL, fins a la completa mecanització en l'execució d'elements de pedra. En els últims mesos s'està produint en granit un nus de superfícies el·lipsoïdals de 3,60 m d'alçària gràcies a l'adaptació a la pedra del programa de mecanitzat de CATIA, pensat per a la indústria aeronàutica i l'enginyeria mecànica i metal·lúrgica, en una experiència que deu ser per ara única al món (figures 38 i 39). Les noves tecnologies conviuen amb el precís i hàbil treball artesanal dels modelistes de guix, dels picapedrers, dels executors del trencadís i dels paletes que construeixen voltes de maó de pla (figures 40 i 41). Les regles de les figures geomètriques que Gaudí adoptà per al projecte del temple (helicoides, paraboloides, hiperboloides, etc.) són, per a tots, la guia que orienta els seus sistemes de treball. ■



FIGURA 39. Execució d'un element de pedra amb un disc seguint un procés complet de mecanitzat.

© Temple de la Sagrada Família



FIGURA 41. Visió de les columnes i voltes de la nau principal.

© Temple de la Sagrada Família