

EXPERIMENTACIÓ TECNOLÒGICA SOBRE L'ARQUITECTURA DE GAUDÍ A LA SAGRADA FAMÍLIA

JORDI BONET I ARMENGOL

Setanta anys després de la mort de Gaudí, el seu Temple de la Sagrada Família de Barcelona continua aixecant-se. Es construeix gràcies a les donacions que es reben —almoines, testaments, subscripcions i donatius diversos— però sobretot, gràcies a la visió de futur que ell tenia. Però el més sorprenent és que l'obra avança més de pressa perquè ho permeten unes noves tecnologies. La informàtica és avui un excel·lent auxiliar, però sense la forma original i audaç que Gaudí donà a les noves formes geomètriques del Temple, sobretot durant els darrers 14 anys de la seva vida, en els que ens llegà una arquitectura singular, en la qual aconseguí d'obtenir la síntesi entre forma i estructura, en què la geometria és l'element dominant.

Breu història del Temple de la Sagrada Família.

L'Associació de devots de Sant Josep, promotora d'aquest Temple, encomanà el projecte a l'arquitecte diocesà Villar. Es col·locà la primera pedra l'any 1882. El novembre del 1883, per dimissió de Villar, s'anomena Gaudí, a qui s'encarregà de continuar les obres (1884).

Es cobrí la cripta (1890). Un donatiu anònim molt important plantejà un nou projecte, i mentre s'aixecaven els murs de l'absis, Gaudí preparà la façana del Naixement, perquè s'havia acceptat la seva proposta d'aixecar-la, per tal de demostrar l'esforç de la seva generació i comprometre així el poble de Barcelona i de Catalunya per tirar endavant la construcció.

A finals de segle, Gaudí presentà la idea del conjunt en què sobresurt la seva verticalitat. Tres façanes, amb 4 torres (apòstols) a cada una —cimbori en el creuer— Jesucrist flanquejat per 4 torres (evangelistes), i sobre de l'absis, una agulla que simbolitza Maria.

Gaudí considerava que havia d'aportar les experiències obtingudes a les seves obres per realitzar el Temple. L'encàrrec del Comte de Güell, de la Cape-

lla de la seva colònia fabril, li permeté experimentar les seves idees, amb una nova forma de càlcul, l'estructura arborescent i l'aplicació de les superfícies reglades: helicoide-columna, paraboloides i hiperboloides-voltes. Per mostrar aquestes idees, realitzà models de guix a escala 1/10 i 1/25. Plantejà, així, una nova arquitectura, de la qual Gaudí, mort el 10 de juny del 1926, solament pogué veure acabat el pinacle del campanar dedicat a Sant Bernabé. El 1930 s'acabaren els altres campanars de la façana del Naixement. Durant la guerra civil del 1936, es destruï l'estudi-obrador de Gaudí. No es salvà cap plànol original, però es conservaren els models de guix. Els seus col·laboradors i deixebles restauraren els models i aixecaren la façana de la Passió (1956-1976). Plantejada la polèmica sobre la continuació de les obres, aquestes no obstant prossegueixen.

El Cardenal Jubany (1984) decidí aixecar les naus i continuar les obres, perquè la voluntat del poble, traduïda en una elevada quantitat de donatius, ho permetia.

Nova fase de continuació de l'obra.

El 1985, s'inicià una nova fase. Ara, ja no són els que conegueren Gaudí els que intervenen a les obres. Com a arquitecte director i coordinador, encarrego als professors Drs. arquitectes Margarit i Buxadé el càlcul estructural de la nau i a l'escultor Josep Maria Subirachs les escultures de la façana de la Passió (1986) tot introduint noves tecnologies a la construcció del Temple.

La continuació de l'obra projectada per Gaudí per a la Sagrada Família està basada en els originals de les maquetes de guix a escala 1/10, que per sort no foren destruïdes l'any 1936.

També en els plànols publicats, fotografies i documents que es conserven i el testimoni escrit dels que recolliren els seus comentaris i les seves idees. És prou conegut que Gaudí, tot i construir les seves obres a partir de les tècniques tradicionals, sempre fou partidari de servir-se d'innovacions tècniques. Darreament s'ha pogut comprovar l'ús del formigó armat en el terminal del campanar de Sant Bernabé, que ell mateix pogué veure totalment llest.

L'esforç que calia esmerçar en la seva tasca és admirable per arribar a projectar el complex tramet geomètric i modular d'interseccions de les superfícies reglades que formen el conjunt de la nau del Temple de la Sagrada Família. Amb els mitjans de l'època, això només és possible d'entendre per la intervenció d'un home genial.

Per tot això hem cregut que calia l'ús de tecnologies innovadores, tant en el dibuix, que amb l'ajut de la informàtica ens permet de ser plenament fidels a les seves idees, com en les tècniques de construcció, a la vegada que ens servim de sistemes tradicionals ajudats de la tecnologia d'avui.

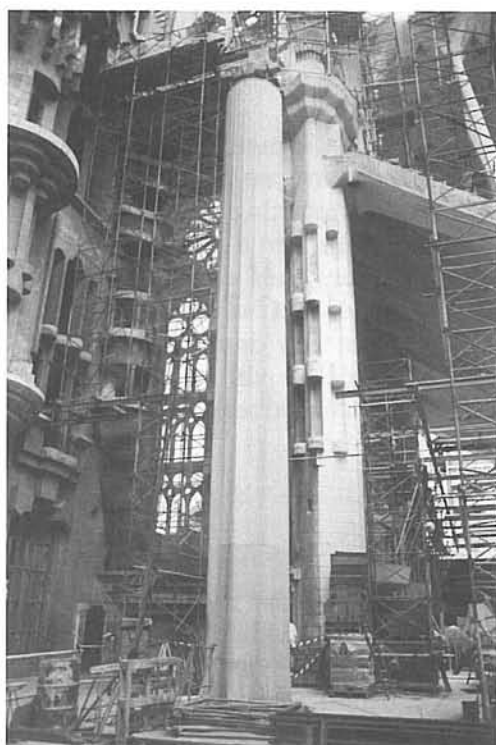


Fig. 1.- Fonamentació de les naus amb pilotatges.

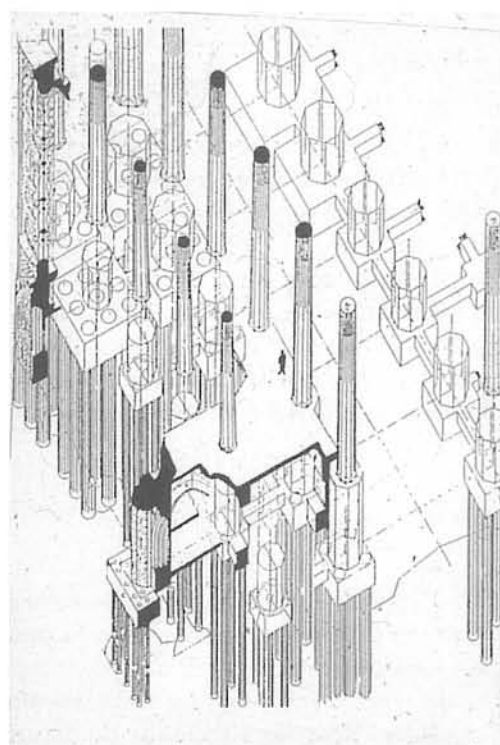


Fig. 2.- Columna de pedra granítica de 15 m d'alçada tallada al taller per màquina Van Vorden comanada per ordinador.



Fig. 3.- Execució d'elements de pedra. Buidat del cilindre interior de les peces un cop treballades.

Fonaments.

El sistema de fonamentació de les façanes del Naixement i de la Passió, que tardaren a aixecar-se 40 anys la primera i 20 la segona, no podia repetir-se a les naus, ja que calia assegurar els assentaments diferencials de les columnes. S'ha fet amb pilots de fins a 1,20 de diàmetre, que s'enfonsen a més de 16 m de profunditat per sota de les criptes, i sumen en conjunt més de 4 Km. Quasi quatre anys de feina sense resultat aparent. La tecnologia ha permès fer un pilot diari, amb maquinària italiana d'excavació, muntada damunt de camió. Malgrat tot, la construcció dels encepats i traves i la de les voltes de la planta semisoterrades a 6 m per sota el nivell del Temple, ha endarrerit l'obra.

Ús de formigó armat.

Gaudí, s'havia servit de formigó armat en els pinacles dels campanars, tal com s'ha pogut comprovar fa poc. És bo de comentar que la primera fàbrica de ciment portland a Espanya, fou promoguda pel mecenes de Gaudí, el Comte de Güell. També l'any 1923, en una conferència pronunciada per l'arquitecte ajudant i després successor de Gaudí, Domènec Sugrañes, a l'Associació d'Arquitectes de Catalunya s'explica que l'armat de les columnes arborescents de les naus es preveia per tal d'obtenir una economia important, al no fer necessari aixecar una gran i costosa bastida, que donés suport a l'enorme pes de l'estructura equilibrada del conjunt, fins que entrés en equilibri la totalitat de l'obra. Gaudí justificava aquesta decisió perquè el seu sistema estructural subdividia les càrregues, que transmetia independentment a través de la solució arborescent del conjunt.

J. Bergòs explica les observacions de Gaudí sobre el formigó armat, en relació a armadures auxiliars per evitar retraccions i clivelles, que no han figurat a la normativa fins fa ben pocs anys.

Els càlculs realitzats pels Drs. arquitectes Joan Margarit i Carles Buxadé, contemplen la nova normativa i tenen en compte terratrèmols i vents de 200 Km/h.

Amb l'ús de formigons i acer de major resistència s'ha permès, sense dificultat, mantenir els dimensionats que Gaudí dona a cada element del conjunt.

Prefabricats.

Des dels inicis del seu treball com a arquitecte, Gaudí emprà els elements prefabricats: «Pavellons Güell», «Parc Güell» —columnes dòriques— sala hipòstila, etc.



Fig. 4.- Tambor de pedra granítica foradat de la part superior d'una columna.
Se situa al seu lloc en pocs minuts, enfilant-lo a les armadures ja preparades.



Fig. 5.- Bastides i armadures d'acer laminat de suport dels finestrals de la nau central entre 30 i 45 m d'alçada.



Fig. 6.- Detalls de les armadures i peces prefabricades de formigó armat amb acer inoxidable.

Actualment, el seu ús és freqüent i per això tenim la necessitat de processos controlats per evitar errors. Control de materials: pedra, acer, formigons, etc. S'aconsegueixen resistències notables en el formigó, 400 Kg/cm^2 és el mínim amb que es treballa. Acers d'alta resistència — 5200 Kg/cm^2 — i també l'ús de l'acer inoxidable. L'ús de la pedra natural de Montjuïc, granítica de la Roca i de Lugo, basalt de Castellfollit i d'Itàlia, etc. El treballat es realitza en diferents tallers i la col·locació es comprova, primer en el propi taller i després en el muntatge. Les adherències del formigó i la pedra, també són objecte de control.

La informàtica.

Les formes geomètriques que Gaudí ideà per a les seves columnes, plantejaren, a la vista de la seva complexitat i quantia per realitzar-les manualment, el fer-les amb màquines guiades per ordinador.

a) Generació de les columnes i breu explicació de l'hel·licoide i doble gir.

Gaudí volia dotar el seu Temple d'un suport que a la vegada donés una impressió de fortalesa, però que també mostrés el moviment hel·licoidal del creixement d'un arbre. La columna salomònica no li acabava d'agradar. Després de dos anys de treballar-hi, aconseguí d'obtenir una nova columna. És el resultat de la intersecció a l'espai de dos hel·licoides que s'aixequen en sentit dextrogir i levogir a partir d'una mateixa base. Així, d'un polígon estrellat neixen unes arestes que multiplicant-se a mida que s'aixequen, arriben a una secció circular

Aquestes columnes, que segueixen l'estructura arborescent que Gaudí considerava essencial per a l'estructura del Temple, són de secció i posició diversa.

b) Voltes i Finestrals.

A partir de la secció circular en què acaben les columnes, neixen uns hiperboloids de revolució que recullen a través de generatrius uns altres hiperboloids oberts que són les voltes estrellades del conjunt. La llum hi entra a través de les voltes, com en un bosc a través de les branques i de les fulles. A la nit, també dóna la sensació de contemplar el cel estelat.

Gaudí, deixà realitzats els models a escala 1/10 del conjunt de les voltes de les cinc naus i el transepte. No obstant, tot i tenir la situació exacte a l'espai, conèixer les coordenades corresponents de cada punt, sense l'ajuda de la informàtica, hauria representat una feina inacabable. Solament la diferència d'una centèsima de grau de la inclinació asimptòtica d'un hiperboloide, pot modificar

la composició estrellada i modular de cada tram. L'ordinador permet trobar aquestes interseccions entre els milers de solucions teòriques, de manera que s'ajustin a les regles de la geometria amb plena fidelitat al model de guix o a la fotografia original de què es disposa, i permet comparar a la pantalla per assegurar la semblança.

Tot aquest complex geomètric perfectament modulat, pot solucionar-se amb la intervenció de la informàtica tot resolent les interseccions que Gaudí, pacientment, havia projectat a escala 1/10 amb els models de guix i també ens permet conèixer el pes de cada element i el seu centre de gravetat de manera molt senzilla, així com les coordenades de cada punt a l'espai.

És més, a les columnes, a l'introduir les equacions dels helicoides a un ordinador que dirigeix una serra circular de diamant, s'ha pogut reduir en gran manera les hores de feina, aconseguint-se una important economia, i finalment una perfecció notable del treballat de la pedra. Ja fa alguns anys que es treballa l'arenisca, el granit i el basalt d'aquesta forma amb immillorables resultats.

A través de convenis amb la Universitat Politècnica de Catalunya i altres Universitats —Wellington (Nova Zelanda) i Deakin (Austràlia)— s'han dibuixat bona part dels models que Gaudí deixà fets a escala 1/10. Les hipèrboles i les paràboles, ja no cal dibuixar-les punt per punt, i les plantilles a mida natural es ploteritzen. Solament és necessari que els nivells i altres coordenades es tradueixin a la realitat a partir de l'anivellador làser per evitar errors. S'ha usat el programa informàtic CADD's 5.

c) Càlcul d'estructura.

L'any 1986, s'inicià l'ús de la informàtica per al càlcul del conjunt de les naus, dels fonaments a les cobertes. A través del control dels formigons, dosificació, vibrat, etc., s'han millorat sensiblement les resistències de tal manera que, emprant acer de la millor qualitat, és habitual ara d'obtenir uns resultats notables.

Últimament s'han realitzat els càlculs de les sagristies. El procés de càlcul s'ha realitzat mitjançant el programa ANSYS de l'empresa SWANSON ANALYSSISTEMS, INC. Després d'haver-se dibuixat cada element, cada pis, les voltes, les columnes i les cobertes, s'ha comprovat que les pressions que ha de suportar aquesta estructura són homogènies i no plantegen cap problema, tot i les exigències de la normativa actual, de manera que el dimensionat que dona Gaudí queda inalterat.

L'estructura de la forma cupular de la sagristia s'ha calculat des de 3 hipòtesis de càrrega: la primera, amb el pes propi i amb els paviments i acabats de façana, als que s'hi sumen les sobrecàrregues d'ús públic. A la segona, s'hi ha sumat l'acció horitzontal del vent. A la tercera s'afegeix, a la càrrega de la primera, les accions sísmiques.

Els coeficients de majoració de càrregues, són:

Hipòtesi 1^a: 1,8

Hipòtesi 2^a: $0,9 \times 1,8 = 1,62$

Hipòtesi 3^a: l'acció sísmica sense majorar. La resta de càrregues: $0,8 \times 1,8 = 1,44$.

Les tres hipòtesis modelitzades, segons s'ha especificat al començament, s'han calculat, la primera i la segona, tenint en compte els efectes del 1er. i 2n. ordre. La tercera, s'ha realitzat amb un càlcul espectral, amb l'espectre de resposta que especifica la Norma NCSE-94 («Norma de construcció sismoresistent, part general i edificació»).

Aquest càlcul ha generat les corresponents accions sísmiques que s'han introduït a la hipòtesi tercera; el càlcul d'aquesta hipòtesi s'ha realitzat en primer ordre.

Actualment, es continua amb el càlcul del creuer i en els propers anys es realitzarà el dels cimboris que el cobreixen, així com el de l'absis.

Treball de la pedra.

És notable la millora de resultats que s'han obtingut respecte a reduir despeses, gràcies a tecnologies pròpies.

Els nusos o capitells de les columnes i els seus tambors plantejaren la possibilitat que pogués usar-se la pedra granítica a l'obra a partir d'elements buidats, per així facilitar la seva col·locació. Una vegada treballat el tros de pedra en les formes convenients, s'ha de buidar, mitjantçant una serra de fil, que permeti passar-lo després de perforar el bloc, fent-lo girar en un torn de forma programada. Del cilindre massís resultant, que de nou es treballa, en pot resultar el tambor d'una columna més petita, que pot buidar-se novament. Si es pot repetir aquesta operació, cosa fàcil, ja que hi ha columnes de diferent diàmetre, això permet obtenir fins a quatre peces que concèntricament surten del mateix bloc primitiu. L'economia resultant és notable a l'aprofitar la pedra, reduir el desbrossament de la mateixa i aconseguir, amb tambors d'un metre d'alçada, una col·locació ràpida.

També s'ha iniciat últimament, el treball amb maquinària amb serra de disc doble, que guiada per ordinador treballa dues peces conjuntament i reprodueix el model a mida natural ja existent. És important la reducció de temps, ja que així es dobla la producció.

L'ús de discs o fils de diamant —encara que més costós— ha augmentat notablement la rapidesa en el treball.



Fig. 7.- Construcció de les voltes de les naus laterals amb emmotllats de polièster.

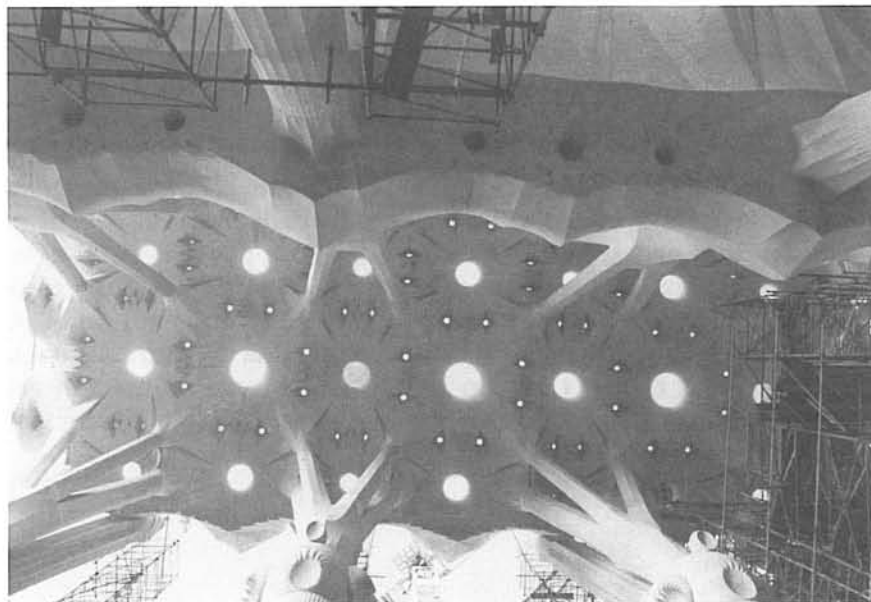


Fig. 8.- Vista de les voltes de les naus laterals de 30 metres d'alçada un cop acabades.

Bastides i armadures d'acer laminat de suport.

Constitueixen altres tecnologies innovadores, l'estructura mixta d'armadures de finestrals i façanes. El pes important de la peça de pedra d'aquests elements arquitectònics, planteja dificultats per a la seva col·locació precisa a l'estar penjat de la grua i haver de trobar suports i situació exacta a través de les bastides.

Es decidí col·locar perfils laminats des d'on es subjecta cada peça, trobant la rigidesa i la facilitat precisa a l'encaix que demana un espediment no sempre fàcil. Això ha permès reduir notablement el temps que la grua ha d'aguantar cada peça —moltes d'elles de pes entre 3 i 4 Tm—, s'aconsegueix així moure's amb seguretat i una subjecció senzilla que millora indubtablement la manera de construir.

Per a la millor seguretat en el treball, també s'ha d'esmentar el muntatge d'unes plataformes auxiliars a gran altura i de gran superfície —s'aconsegueixen els 500 m²— sobre les quals el personal pot desplaçar-se sense perill a 30 o 40 m d'altura sobre el nivell del sòl.

El replanteig de la situació de columnes és així més fàcil, però sobretot la sensació de treballar a nivell de terra ajuda enormement els rendiments, perquè el treball es realitza sense necessitat de les precaucions, que d'altra manera s'haurien de prendre.

També és bo d'esmentar que les columnes inclinades prefabricades assoleixen els 7 m d'alçada. La seva armadura té una ànima amb HEB de 18 o 20 UPN de 20 o IPN i una corona de rodons i estreps. A les grans columnes de la nau o del transepte de fins a 1,75 m de diàmetre, les armadures arriben a formar 50 grups de tres rodons de 32 m/m de diàmetre, col·locats a portell i recobertes per una massa superior als 5 cm de formigó recoberta per la pell de granit o de basalt.

A partir dels models de guix a mida natural, amb el corresponent espediment calculat gràcies al coneixement del pes de cada element perquè puguin ser aixecades per les grues, les peces de formigó o de pedra natural dels finestrals, s'executaran al taller de manera que les més exposades a la degradació es realitzaran amb pedra granítica i les interiors amb formigó emmotllat. Amb la dosificació ben estudiada resulta difícil distingir-ne una de l'altra. La col·locació de cada peça és molt ràpida i un cop comprovada la seva situació i encaix, i situada l'armadura corresponent, es procedeix al replenat amb formigó vibrat convenientment controlat.

Les voltes.

Les voltes poden construir-se tal com Gaudí preveia, a partir de motlles recuperables o amb una tècnica de llarga tradició a Catalunya, la volta de maó de pla, coneguda en altres països com a volta catalana.

En l'ús de la 1^a tecnologia, els motlles es realitzaran a partir dels models amb polièster armat amb fibra de vidre. L'encaix entre ells no és difícil, però necessita atenció i un bon rejuntat. Aquests treballs s'executen sobre unes amples bastides i sempre tenint les columnes de suport perfectament situades, perquè cada tram encaixi perfectament. El «gunitat» amb barreja ben estudiada en la seva dosificació, amb l'armadura posterior i una segona capa de «gunitat» es realitzen sincronitzats, deixant les juntes ben disposades. Posteriorment, es construeixen els elements de formigó armat calculats per absorbir les empentes derivades de moviments sísmics, que corona una solera de formigó armat. Aquesta superfície plana que en el futur quedarà sota de les cobertes projectades per Gaudí amb paraboloides, ara serveix per a la continuació dels treballs.

La tecnologia de les voltes catalanes s'emplearà a la nau central, al creuer i a l'absis. Aquesta tècnica s'utilitzà durant més de mig segle als Estats Units, introduïda per l'arquitecte Guastavino, que hi anà acompanyat d'uns quants artesans procedents de Catalunya a finals del segle XIX. Actualment, una interessant mostra de les seves obres s'ha exposat a la Universitat de Columbia (N.Y.).

A partir d'unes rajoles de 1,5 cm de gruix col·locades seguint les generatrius de les superfícies reglades, collades amb ciment i doblades amb una segona capa agafada amb ciment pòrtland, uns artesans ben preparats poden fer meravelles. Un posterior armat i engrossat amb formigó dóna una capacitat de resistència extraordinària, que permet cobrir grans espais. Aquesta tècnica s'ha empleat a diverses parts del Temple i Gaudí l'empra amb profusió a la Capella de la Colònia Güell. No és possible mostrar els resultats obtinguts perquè ara s'està iniciant aquesta tecnologia, però esperem construir el primer tram de la nau central ben aviat, una vegada obtingudes les anàlisis, adherències i possibilitats que s'estan estudiant al laboratori.

Encara que breument, s'ha intentat donar una visió general del que s'està realitzant en la construcció d'una cosa singular, en la qual malgrat les experiències recollides per un equip d'especialistes, sempre és possible d'aportar alguna cosa nova, perquè l'arquitectura concebuda per Gaudí, possiblement pot aportar encara novetats.

Barcelona, nov. 1997.