

Antoni Gaudí i el disseny estructural. La síntesi de la geometria i de la resistència

Discurs llegit el 26 de setembre de 2005
en la sessió inaugural del curs 2005-2006

PERE ROCA I FABREGAT

Membre de la Secció de Ciències i Tecnologia

1. Introducció

L'estudi de l'obra d'Antoni Gaudí s'ha centrat, tot sovint, en els aspectes més exclusivament formals —els elements compositius, decorativistes o simbòlics— de la seva arquitectura. En general, s'ha prestat molt poca atenció a les seves aportacions i fites en l'àmbit més científic o tècnic de la resistència i el disseny estructural. Tanmateix, és possible trobar en aquest àmbit aportacions de gran interès.

En la nostra opinió, l'anàlisi de les aportacions i dels mèrits de l'obra de l'arquitecte en l'àmbit esmentat no ha estat encara mai escomesa d'una manera profunda. Entenem que aquesta anàlisi, però, no és senzilla i que ha de ser realitzada des d'una perspectiva històrica de l'evolució de l'arquitectura i de la peculiar situació que aquesta activitat humana experimenta a principis del segle XX. En aquest moment s'esdevé un canvi de paradigma, una veritable transició entre dues maneres molt diferents d'entendre l'art de

construir i l'arquitectura. Gaudí, segons creiem entendre, es troba en la mateixa frontera entre ambdues concepcions, en el límit d'una transformació que comportarà, de manera implacable, el trencament d'unes tradicions o d'uns conceptes mantinguts durant segles.

Amb aquesta presentació, desitgem reflexionar al voltant d'alguns aspectes de l'obra d'Antoni Gaudí i tal vegada contribuir a reivindicar-ne l'aportació en l'àmbit de la ciència de les estructures. La tesi que, en definitiva, desitgem formular és que l'aportació de Gaudí, en aquest marc, és plena d'innovacions potencialment útils per a l'arquitectura del futur; alhora, desitgem fer esment que aquestes innovacions no han trobat, de moment, lloc en la pràctica constructiva actual a causa dels particulars paradigmes de la construcció i de l'arquitectura contemporànies. Tanmateix, aquesta situació podria ser transitòria. En un futur proper, determinats canvis conceptuals, possibles transformacions tècniques o culturals, podrien retornar-nos cap a un nou tipus d'arquitectura on les innovacions de Gaudí sí que resultessin directament inspiradores i tècnicament aplicables. Per a exposar aquesta idea, però, cal realitzar prèviament certes consideracions en relació amb la història de la construcció.

2. Una visió històrica

La història de la construcció és segurament una de les matèries més complexes i controvertides amb les quals un estudiós de l'arquitectura o de l'enginyeria es pot enfrontar. Això es deu, entre altres motius, al nostre desconeixement de molts dels conceptes i de les intencions dels constructors del passat a l'hora de portar a terme les seves construccions. Cal parlar de les dificultats que, des del nostre inevitable provincianisme d'enginyers i arquitectes del present, experimentem per a apropar-nos als estats de la ment, a la intel·lectualitat i al món emocional dels qui van concebre i aixecar les grans construccions del passat.

Si alguna cosa hem après, tot apropant-nos al món de la construcció històrica, és que l'enginy del constructor antic ha sabut portar gairebé sempre els materials i les tècniques disponibles al límit de les seves possibilitats físiques i de resistència. El coneixement que observem de les possibilitats dels materials i de les tècniques en les obres dels constructors antics és sempre extrem. I ho és fins i tot, o especialment, abans de la revolució científica i tecnològica experimentada a partir del segle XVIII. La mestria dels constructors dóna lloc a estructures tècnicament insuperables. Les construccions de l'Imperi romà o bé les catedrals gòtiques són exemples evidents d'aquesta idea. Avui en dia, les catedrals gòtiques ens sorprenen tant per la gosadia estructural com per l'encert formal.

En un sentit molt restrictiu, és possible observar en les construccions del passat un nivell major o menor de bondat tècnica. Aquesta «bondat tècnica» pot resultar, per exemple, de la consideració d'algun paràmetre alhora tècnic i econòmic, com la relació entre l'envergadu-

ra dimensional i el consum de material. Certament, hi ha construccions que presenten una gran lleugeresa, en el sentit que aconsegueixen cobrir un espai molt gran amb un consum moderat de material, mentre que d'altres poden ser considerades «pesades» o poc satisfactòries perquè tot i que acumulen una gran massa de material resistent cobreixen un espai reduït. La consideració del context cultural i econòmic de cada època i de cada societat ens força, però, a relativitzar o a qüestionar la noció de *superioritat tècnica*.

Per als constructors romans, per exemple, la millor opció consistia en l'exploració intensiva d'un material —el formigó— que presentava grans avantatges en termes de disponibilitat, de versatilitat arquitectònica i de resistència. D'una banda, tenien a l'abast els materials necessaris per a la formació del formigó putzolànic, gairebé sense limitació, en els estrats volcànics del subsòl de la regió de Roma i altres regions italianes. D'altra banda, i per tal com s'adapta a qualsevol encofrat, el formigó podia donar lloc a una varietat pràcticament il·limitada de formes i funcions estructurals. La capacitat de resistència del material, finalment, el feia especialment apte per a suportar càrregues importants o cobrir espais diàfans. Amb formigó es van construir cobertes de gran llum en forma de cúpula, volta de mig punt o volta creuada. Des del punt de vista dimensional, aquestes cobertes han estat només superades amb l'adveniment del formigó armat o de la ceràmica armada al llarg del segle XX. Com és conegut, entre les construccions romanes més espectaculars hi ha el Panteó de Roma, amb una coberta de 43 m de diàmetre interior, o la Basílica Nova (o de Maxenci i Constantí), construïda a partir de l'any 313 i situada en el fòrum de Roma, amb tres voltes creuades de més de 25×25 m² de superfície.

El cas d'aquest últim monument mereix especial atenció. L'estudi de l'edifici permet descobrir una sèrie d'analogies sorprenents amb l'estructura d'una catedral gòtica. A més de l'existència d'unes voltes creuades —encara que no típicament gòtiques, ja que resulten de la intersecció simple de dues voltes de canó—, l'edifici disposa d'uns elements semblants als arcbotants, la missió dels quals és precisament recollir part de l'empenta provocada per les grans voltes de la nau central i dur-la a la fonamentació a través dels grans contraforts interns. Per molt que l'estructura de l'edifici mantingui alguna similitud amb l'estructura pròpia d'una gran catedral gòtica, les grans dimensions de les voltes de la basílica no tenen, en canvi, cabuda en tals construccions.

No obstant això, i a diferència de les catedrals gòtiques, la Basílica Nova constituïa un edifici essencialment massiu, ja que la fragilitat del material de les seves voltes —el formigó en massa— requeria, com bé van comprendre els seus constructors, una base extremament estable i rígida, aconseguida mitjançant una fonamentació certament potent i uns murs extremament amples. Pels romans, aquestes exigències eren ben assequibles, atesa la disponibilitat del material i d'una mà d'obra molt nombrosa i poc especialitzada. Cal fer notar, però, que el caire rígid i massiu de l'edifici no va impedir que, a conseqüència de l'abandó i dels terratrèmols, resultés destruït cap al segle IX (figura 1).



FIGURA 1. Restes de la Basílica Nova al fòrum romà. (Fotografia de René Seindal, 2002.)

El màxim exponent del canvi de concepció estructural entre Roma i Bizanci és l'església de Santa Sofia a Constantinoble, construïda mitjançant maó i morter en el segle V en un període de tan sols cinc anys. Santa Sofia presenta un vast rectangle de $81 \times 71 \text{ m}^2$ cobert amb una gran cúpula central sobre un quadrilàter de 31 m de costat, assentada sobre quatre grans arcs de maó que, al seu torn, arrenquen de quatre potents pilastres de 40 m. La cúpula assoleix una altura de 65 m (figura 2).

L'aixecament de la basílica de Santa Sofia a Istanbul, entre els anys 532 i 537, suposa un notable canvi de paradigma constructiu en relació amb les tècniques o amb els dissenys estructurals de la Roma imperial. Si bé sembla que no existeix encara una limitació notable quant a recursos humans i materials, el desig de completar la construcció en un temps extremament limitat encoratja l'ús de recursos constructius innovadors, que suposen una optimització real de la quantitat de material i de la mà d'obra necessaris. S'opta per un material lleuger, comparat amb el formigó —l'obra de maó—, i per un sistema estructural innovador, l'estabilitat del qual no recau en l'acumulació de rigidesa i potència, sinó en l'adequada i delicada combinació de les formes i de les relacions geomètriques entre parts, dins d'un

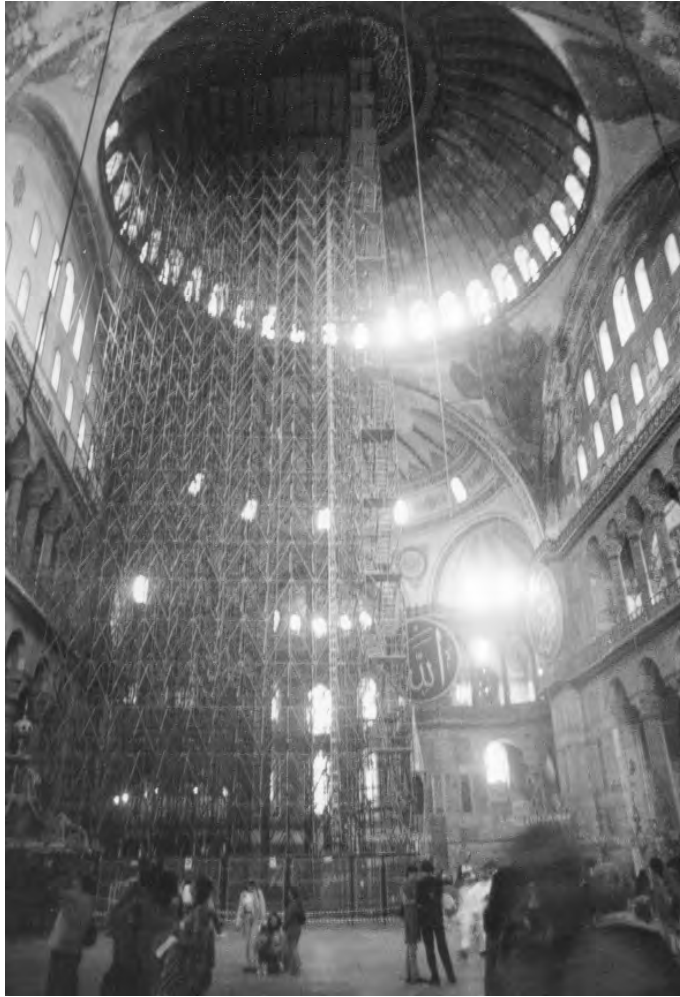


FIGURA 2. Interior de la basílica de Santa Sofia a Istanbul. (Fotografia de l'autor, 1997.)

esquema encertadament equilibrat. Conseqüentment, és possible cobrir una superfície molt àmplia —comparable a la Basílica Nova— amb un consum molt menor de material. D'altra banda, es diria que en la concepció de Santa Sofia es tolera un cert marge de risc o d'especulació, com sembla que suggereix el fet que, certament, durant el procés de construcció es requereixen una sèrie d'importants correccions, que fonamentalment afecten el disseny dels arcs principals i de la cúpula central.

La limitació en la disponibilitat de material i de mà d'obra sí que constitueix, en canvi, un condicionament fort durant l'edat mitjana europea i, particularment, durant l'era de les catedrals gòtiques, entre els segles XII i XV. El constructor medieval europeu supleix aquestes mancances extremant la seva preferència per un disseny ben fonamentat en l'encaix geomètric. L'estructura, cada vegada més orgànica i lleugera, queda desproveïda d'allò realment no essencial per a l'estabilitat. De manera racional, o bé intuïtiva, els mestres constructors medievals entenen que l'estabilitat quedarà assegurada si l'edifici respecta determinades proporcions i si els elements que l'integren s'organitzen d'acord amb les necessitats de l'equilibri. Amb el gòtic, l'estructura esdevé totalment esquelètica o lineal, excepte per la plementeria de les voltes, i, per tant, guanya en lleugeresa i flexibilitat enfront dels precedents romans i fins i tot bizantins; i no per això queda endarrere en dimensions i en grandiositat expressiva. L'art gòtic s'ha de comunicar d'un constructor a un altre; d'una regió a una altra: per molt que algunes de les innovacions que introdueixi puguin ser producte d'una ment genial i única, les consecucions conceptuals que se'n derivin han de ser transmissibles. L'art de construir les catedrals pertany a tota una civilització i és, de fet, una activitat per mitjà de la qual aquesta s'afirma i es transmuta. Així doncs, la construcció gòtica es troba marcada per una certa codificació funcional que, tot i que admet importants variacions, unifica en gran mesura les solucions i els procediments.

3. L'estructura de la catedral de Mallorca

En aquest punt és interessant reflexionar al voltant d'una de les catedrals gòtiques més imponents i estructuralment més agosarades mai construïdes, i de la qual Gaudí, reconegudament, va aprendre molt i va extreure molts conceptes. Ens referim a la catedral de Mallorca.

La contemplació atenta d'aquest edifici obliga l'arquitecte o l'enginyer modern a desprendre's de qualsevol noció de supèrbia tècnica pròpia. L'altura de les voltes, de 44 m, només és igualada o superada per les catedrals de Beauvais (46,3 m), de Colònia (44 m) o de Milà (44 m). La llum lliure entre pilars, és a dir, la distància sense recolzaments intermedis, és de 19,9 m, quantitat únicament superada per la catedral de Girona. Però convé recordar que la catedral de Milà disposa de tirants a nivell de tots els arcs i voltes, la qual cosa en facilita molt l'equilibri; convé recordar que la llum de les voltes de la catedral de Colònia és de solament 12,6 m, mentre que la catedral de Beauvais, amb una llum de 13,4 m, simplement, va col·lapsar poc després de ser construïda, de tal manera que avui en dia només en resta la capçalera. Però l'aspecte més sorprenent de l'edifici és l'esveltesa dels pilars. Es defineix l'esveltesa geomètrica com el quocient entre l'altura del capitell del pilar, sota l'arrencada de les voltes, i el diàmetre circumscrit corresponent. En el cas de la major part de les catedrals gòtiques franceses, aquest valor oscil·la entre 5 i 7; a la catedral de Colònia, l'esveltesa dels pilars és

de 5. A la catedral de Barcelona, amb pilars sensiblement més esvelts, és de 8,5. En el cas de la catedral de Mallorca, el valor de l'esveltesa és de 13 a 15, atès que hi ha més d'un tipus de pilar, i assoleix, per tant, un extrem únic. És aquesta esveltesa el que proporciona a la catedral la incomparable diafanitat del seu espai interior (figura 3).

Tant per les dimensions com per l'extrema esveltesa dels elements que la integren, l'estructura de la catedral de Mallorca repta la nostra concepció moderna del disseny estructural i de la resistència. Construït amb materials no especialment resistents, i malgrat l'aparent gosadia estructural, l'edifici ha aguantat el pas de més de sis segles, i ha arribat als nostres temps gairebé intacte. Al llarg de la seva història, la catedral ha suportat terratrèmols d'una certa significació, com el que s'esdevingué l'any 1851, d'intensitat estimada entre VII i VIII en l'escala Mercalli.

Com és conegut, Gaudí dirigí les obres de restauració de la catedral, escameses durant els anys 1901 a 1912 per iniciativa del Capítol. És també conegut que l'edifici va resultar-li extremament revelador, i que va ser a través d'aquest contacte amb les estructures gòtiques que Gaudí va accedir a una nova manera d'entendre i projectar les seves pròpies construccions, de la qual tenim com a principals exponents el temple de la Sagrada Família i l'església de la Colònia Güell.



FIGURA 3. Interior de la catedral de Mallorca. (Fotografia de l'autor, 2004.)

Per a entendre aquesta nova manera de concebre i projectar els edificis, cal primer introduir algunes nocions al voltant del disseny estructural de les catedrals gòtiques. De fet, el que sorprèn d'aquestes construccions és que tenen una geometria que gairebé dibuixa les trajectòries de les empentes, és a dir, de les forces resultants que afecten les seccions dels components estructurals, incloent-hi pilars, arcs, arcbotants i contraforts.

El càlcul pioner de l'estructura de la catedral de Mallorca, realitzat per Juan Rubió i Bellver,¹ il·lustra clarament aquesta idea. Rubió i Bellver va treballar com a col·laborador d'Antoni Gaudí durant els treballs de restauració de la catedral de Mallorca i va realitzar un càlcul basat en l'estàtica gràfica, una teoria elaborada al llarg del segle XIX a partir d'uns principis albirats per enginyers i científics dels segles XVII i XVIII. D'acord amb aquesta teoria, l'estructura resisteix si la línia d'empentes, és a dir, l'envolupant dels llocs geomètrics de les forces resultants a cadascuna de les seccions, queda continguda dins del volum de l'estructura. Rubió i Bellver va emprar aquest concepte per a trobar una solució que expliqués l'equilibri dels pòrtics de la catedral de Mallorca (figura 4). És fàcil constatar com l'estructura s'adapta satisfactòriament a la distribució de les forces i com les línies de pressions queden efectivament contingudes dins dels arcs, els arcbotants i el contrafort.

De fet, hi ha alguns aspectes difícils d'entendre. Per exemple, l'arcbotant superior és poc justificable des d'un punt de vista exclusivament estructural. Les catedrals del nord d'Europa n'exhibeixen, però sovint es tracta d'un giny dispost o bé durant la construcció o bé posteriorment per a compensar la força que el vent exerceix contra les altes cobertes a doble vessant d'aquestes catedrals. La catedral de Mallorca, com les catedrals construïdes a Catalunya, va ser aixecada sense coberta a doble vessant. Avui en dia, la catedral disposa d'una coberta de teula, però aquesta coberta va ser instal·lada per primera vegada durant el segle XVIII. El fet és que, com demostra el càlcul, la disposició d'aquest arcbotant superior, en el cas de la catedral de Mallorca, tendeix a generar un cert desequilibri; és per a compensar aquest desequilibri que s'hi van col·locar els pesos morts en forma de piràmide d'obra de carreu que encara avui en dia podem observar sobre les claus de les voltes i dels arcs de la nau central. En qualsevol cas, els arcbotants superiors actuen com a canals per al desguàs de l'aigua de pluja acumulada sobre la coberta de la nau central i, des d'aquest punt de vista, són del tot imprescindibles.

El disseny d'una catedral gòtica tendeix a assemblar-se molt al dibuix geomètric de la distribució i trajectòria de les forces que n'assenyalen l'equilibri. Tanmateix, aquest disseny es troba condicionat per diversos aspectes que l'allunyen d'una adaptació perfecta a aquest esquema ideal. En primer lloc, la comprensió d'aquest equilibri per part dels constructors medievals és encara imperfecta, malgrat la seva ciència, i es basa principalment en regles geo-

1. J. RUBIÓ, «Conferència sobre els conceptes orgànics, mecànics i constructius de la catedral de Mallorca», a *Anuario*, 1912.

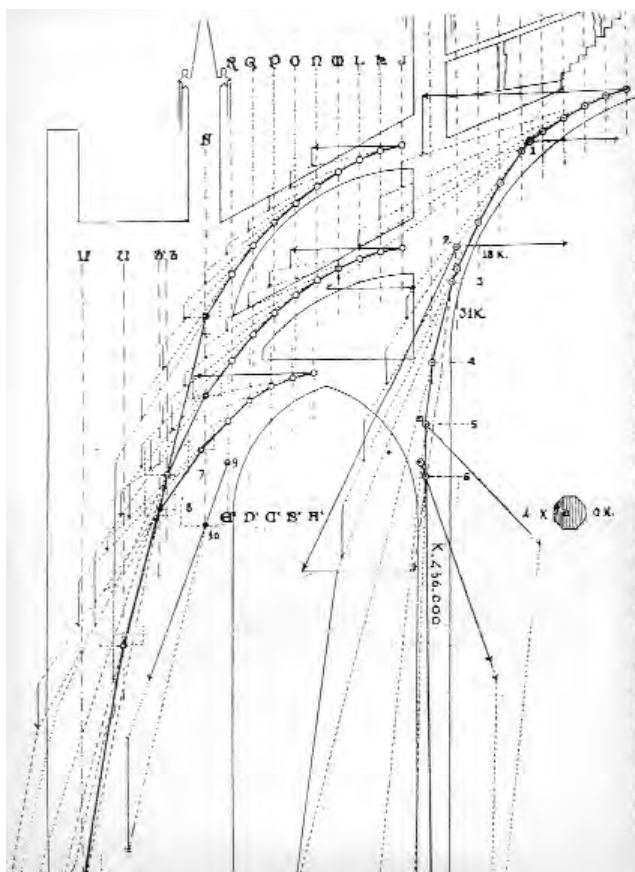


FIGURA 4. Càlcul gràfic de l'estructura de la catedral de Mallorca realitzat per Rubió i Bellver (fragment). (Font: J. Rubió, «Conferència sobre els conceptes orgànics, mecànics i constructius de la catedral de Mallorca», a *Anuario*, 1912.)

mètriques simples que, si bé són compatibles amb l'equilibri, no l'ajusten d'una manera rigorosa. En segon lloc, la finalitat del disseny no rau solament en les necessitats de resistència; el disseny també respon a necessitats de caire cultural o religiós. L'objectiu últim del disseny no és la pura optimització estructural, sinó un resultat més global que inclou elements de resistència juntament amb elements estrictament formals o culturals, com la recerca de determinades sensacions i la connexió entre aquestes impressions i les funcions litúrgiques o religioses.

Gaudí entén, d'una banda, el potencial d'una arquitectura adaptada a les formes generades per l'equilibri de les empentes. D'altra banda, també entén que existeix encara, res-

pecte a l'arquitectura gòtica, la possibilitat d'extremar el concepte i de deslliurar-lo de tota servitud no estructural fins a obtenir una arquitectura plenament orgànica: una arquitectura que sintetitzi totalment la geometria amb la resistència. Això és el que Gaudí dona a entendre quan confessa la seva intenció de «superar» l'arquitectura gòtica. I això és el que intenta aplicar en el disseny de l'estructura del temple de la Sagrada Família i en l'església de la Colònia Güell.

4. Adaptació *versus* evolució progressiva

Així doncs, Gaudí culmina d'alguna manera un camí històric al llarg del qual les construccions han tendit cap a una adaptació gradual a la geometria de la trajectòria de les forces, un camí al llarg del qual geometria i resistència han maldat per retrobar-se. Un primer pas el veiem en la basílica de Constantí i Maxenci, on apareix un insòlit acostament cap a l'arquitectura gòtica; un segon pas —en aquest cas, un pas de gegant mercès a l'ús d'arcs i elements cupuliformes a gran escala— el veiem en la basílica de Santa Sofia a Istanbul. Un tercer pas, que s'acosta, encara que sense arribar-hi, a l'extrem perfecte, apareix amb l'arquitectura gòtica. Gaudí representa encara un quart pas a través d'un intent conscient d'arribar a l'extrem ideal i de produir finalment una arquitectura totalment orgànica.

Ara bé, creiem que seria erroni veure en aquesta evolució històrica una veritable tendència unilateral cap a una perfecció ideal, és a dir, una evolució veritablement progressiva. Només des de la percepció del conglomerat de valors culturals i religiosos que envolten una construcció antiga podem, en rigor, jutjar l'èxit i l'encert de les solucions estructurals proposades pels constructors antics. D'alguna manera, l'evolució de la tecnologia de les estructures és comparable a l'evolució de les espècies biològiques, la qual, segons alguns experts actuals, no presenta realment un progrés cap a formes evolutives sempre més perfectes o més capacitades, sinó simplement, una adaptació a circumstàncies sempre canviant. Aquesta és l'opinió de Stephen Jay Gould, un paleontòleg prou conegut per l'interès i la qualitat dels seus llibres de divulgació científica, el qual, al llarg de la seva obra, sovint va recórrer a metàfores relacionades amb l'arquitectura i les estructures per tal de reforçar els seus arguments sobre biologia i evolució.²

En aquest cas, però, proposem la metàfora en sentit contrari. Com en el cas de l'evolució de les espècies, a propòsit de la història de la construcció, sembla també més propi parlar d'una adaptació permanent que d'una superació progressiva. La tecnologia de les estructures ha evolucionat per a adaptar-se a les aspiracions i les disponibilitats tècniques de cada

2. S. J. GOULD i R. LEWONTIN, «The spandrels of San Marco and the Panglossian Paradigm: A Critique of the Adaptationist Programme», *Proceedings...*, sèrie B, vol. 205, núm. 1161 (1979).

societat, reelaborant-se i produint, en cada ocasió, una nova manifestació d'algunes solucions elementals. En determinats moments, com a l'antic Egipte, la Grècia clàssica, o actualment, hom ha preferit els sistemes allindats regulars; en altres moments, han proliferat les solucions de geometria corba i complexa. Hom ha construït estructures massives i rígides, com a l'Imperi romà, o bé ha retornat cap a allò orgànic i adaptable, com a l'edat mitjana. Els esquemes i tipus estructurals fonamentals han estat reeixidament adaptats a les circumstàncies canviants, i han donat lloc a les múltiples manifestacions que avui en dia componen una part valuosa del nostre llegat arquitectònic. A cada moment, i mitjançant aquesta adaptació formidable, l'arquitectura ha expressat i culminat algunes de les màximes aspiracions dels seus contemporanis. Els intents de millorar o de superar les solucions del passat són, de fet, adaptacions d'aquestes solucions a les circumstàncies d'un present molt diferent en termes de tecnologia i de context cultural. Aquesta visió és segurament molt discutible des d'un punt de vista estrictament tècnic; creiem, però, que des d'un punt de vista antropològic és més acceptable i reveladora.

El desig de superar l'estructura gòtica segurament hagi estat una idea poderosament inspiradora per a Gaudí; no obstant això, és possible qüestionar que aquesta idea tingui autèntic sentit històric o un valor epistemològic real, i que pugui aportar veritable coneixement al crític o estudiós de l'obra de l'arquitecte. Al nostre entendre, el que Gaudí sí que aconseguí mitjançant obres com la Sagrada Família, o l'església de la Colònia Güell, és una adaptació formidable de les solucions arquitectòniques a un nou estat de necessitats socials i possibilitats tècniques, i també, en la seva actualització més enllà de l'àmbit purament arquitectònic, a un conjunt evolucionat de valors de referència. Alguna cosa molt semblant al que ja va realitzar Alessandro Antonelli a finals del segle XIX, a Itàlia, expressat en edificis íntegrament construïts amb obra de maó, com San Gaudenzio de Novara o la Mole de Torí (figura 5),³ els quals, tant per les seves extraordinàries dimensions com per la seva lleugeresa, sembla que desafien les possibilitats del mateix acer com a material estructural.

En paraules de Gaudí, «l'estudi de les corbes de pressió i contencions de forces es podria aplicar a l'estudi de la construcció en general, i no serien febles els resultats que s'obtidrien. S'entén que en el segle mitjans no s'apliquessin directament tals teories, ja que no es coneixien, i es fessin les construccions d'una manera intuïtiva i pràctica, però nosaltres bé ens podem aprofitar d'aquests avantatges *per a fer construccions apropiades als avenços de la nostra època*, aprofitant les facilitats i evitant els inconvenients que no hi ha possibilitats de salvar».⁴

3. F. ROSSO, *Alessandro...*, 1977.

4. A. GAUDÍ, *Antoni Gaudí...*, recopilació de Laura Mercader, 2002.



FIGURA 5. Mole antonelliana de Torí. (Fotografia de l'autor, 2001.)

5. L'aportació de Gaudí

La clau no rau en la superació dels assoliments arquitectònics i estructurals històrics sinó en la capacitat d'adaptar-los a noves tècniques de disseny i anàlisi, possibilitades pel desenvolupament d'un corpus teòric —sorgit de la mecànica racional—, així com en la implantació d'una exigència d'objectivitat basada estrictament en aquest corpus. També són importants les noves possibilitats tècniques que ofereixen el càlcul, el maquetisme i la fotografia. Per aconseguir-ho, Gaudí va comptar amb col·laboradors experts, entre els quals fou notable, per exemple, el cas de Rubió i Bellver com a analista estructural, a qui ja ens hem referit a propòsit del seu estudi de l'estructura de la catedral de Mallorca.

Al llarg del segle XIX, la fosa i després l'acer es consoliden com a materials competitiu i capaços, i són emprats per a la construcció de les majors estructures de l'enginyeria civil.

L'entrada d'aquests materials en l'edificació és molt més tardana i no es consolida fins a principis del segle XX. Seria erroni, no obstant això, suposar que l'èxit de la construcció metàl·lica va comportar l'abandó de la construcció basada en materials petris. Ben al contrari, maó i ferro es complementen i fins es combinen de manera íntima, encara que no sempre encertadament, en les construccions de l'Art Nouveau o del Modernisme català. Algunes de les realitzacions més espectaculars, construïdes a finals del segle XIX o a principis del XX, són enterament de maó o pedra, com és el cas dels edificis d'Antonelli, als quals ja ens hem referit, o d'alguns dels ponts més emblemàtics, com el pont Adolphe, dissenyat per Paul Séjourné i construït a Luxemburg entre 1899 i 1903, el qual inclou un arc de pedra de 84,65 m de llum. Les principals construccions d'Antonelli, majoritàriament de maó, es caracteritzen per una extrema lleugeresa i una sofisticada organització estructural.

Així, a la fi del segle XIX i a principis del segle XX, el maó és un material estructural perfectament vigent, i les construccions de maó —i fins i tot de pedra— segueixen sent susceptibles de desenvolupament i sofisticació tècnica i arquitectònica. L'èxit de Rafael Guastavino als Estats Units constitueix també un reflex de la vigència de la fàbrica de maó, en aquest cas, amb la volta de maó pla, la qual es comercialitza, enfront de l'estructura metàl·lica, com una forma constructiva a prova d'incendis.⁵

Per al temple de la Sagrada Família i per a l'església de la Colònia Güell, Gaudí opta per uns materials —pedra i maó, respectivament— perfectament vigents i susceptibles de revisió o actualització quant a possibilitats. Sense dubtar a mobilitzar els recursos apropiats, Gaudí aconsegueix estendre el potencial d'aquests materials atorgant-los noves possibilitats constructives, estructurals i compositives.

La invenció d'allò possible en maó traspua en la cripta i en el porxo de l'església de la Colònia Güell; a la Sagrada Família, per contra, l'envergadura de les dimensions propicia més aviat una derivació cap a solucions estructurals més universals, que, si en principi es conceben per a la pedra, bé es podrien traslladar a altres materials com el formigó armat, com finalment s'ha esdevingut, o fins i tot, arribats a l'extrem, l'acer. Per a la Sagrada Família, Gaudí concep solucions genuïnes que, segons creiem, obren noves possibilitats al disseny estructural d'edificis de grans dimensions, amb independència del material emprat per a construir-los. L'associació que sovint es realitza entre Gaudí i la construcció pètria ens sembla, per tant, excessivament reduccionista, atès que l'obra de l'arquitecte ofereix possibilitats perfectament traslladables a altres materials.

La limitada proclivitat de l'arquitecte a publicar, la incompleció del temple i, fins al present, l'escassa disposició dels crítics a interpretar les obres de Gaudí en termes de disseny estructural, han impedit que les seves solucions estructurals assolissin certa difusió pràctica. Evidentment, l'interès per la coberta ondulada de les escoles de la Sagrada Família per part

5. R. GUASTAVINO, *Essay...*, 1893.

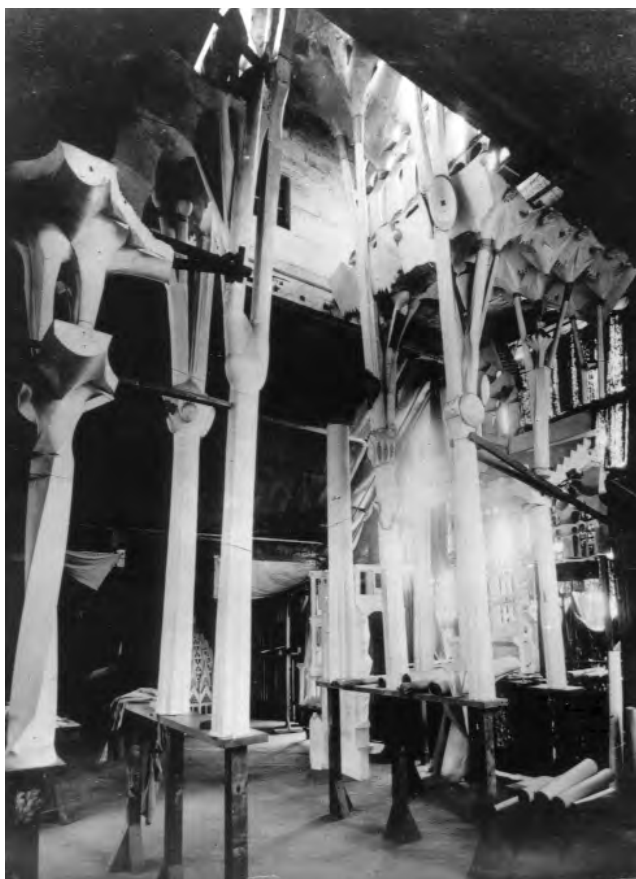


FIGURA 6. Pilars arborescents de la nau central del temple de la Sagrada Família. Maqueta original construïda a l'obra d'Antoni Gaudí. (Font: Arxiu del temple de la Sagrada Família.)

de Le Corbusier i l'adopció d'aquest element per a algunes de les seves pròpies construccions constitueix una excepció. Per contra, altres assoliments de Gaudí han passat inadvertits i fins i tot han estat reinventats o desenvolupats independentment per altres arquitectes al llarg de la segona meitat del segle XX, com succeeix amb els pilars arborescents de la nau del temple (figura 6). Les escasses publicacions sobre pilars arborescents estructurals —estudiats i emprats, entre d'altres, per Otto Freï a mitjan segle XX— no fan ni tan sols esment de l'ús pioner que Gaudí en va fer per a la nau de la Sagrada Família.⁶

6. J. HENNICKE, «Structural trees. Comments on some fundamental design and construction aspects of tree-like branching columns», *Bulletin...*, vol. 36, núm. 118 (1995).

L'abandó que a mitjan segle XX experimenta el maó com a material estructural —abandó que en realitat mai no és complet— es deu principalment a la generalització del formigó com a material plenament competitiu des del punt de vista econòmic. Es construeixen llavors interessants estructures de tipus laminar, de gran mèrit estructural i plàstic, amb les quals resulta possible cobrir espais molt diàfans. Els principals creadors d'estructures laminars de formigó armat —Candela, Torroja i Frei, entre d'altres— es confessen admiradors de l'obra de Gaudí i, de fet, comparteixen amb ell la preferència per una arquitectura orgànica, basada en la geometria, enfront de la generalització de les estructures purament porticades. Finalment, cap als anys setanta, el cost de la mà d'obra, entre altres factors, provoca una forta davallada de la construcció mitjançant làmines de formigó. No obstant això, aquest tipus estructural va experimentar una nova espurna a través de l'obra d'Eladio Dieste en ceràmica armada.

Avui en dia el cost de la mà d'obra és molt elevat comparat amb el cost dels materials. Alhora, hem pres consciència dels riscos que comporta l'execució de les obres sobre la seguretat i la salut. També és característica del nostre present una preocupació molt creixent per la conservació del medi ambient i la construcció sostenible. En particular, preocupa la contaminació que la fabricació i l'ús dels materials de construcció poden generar. La fabricació del formigó de ciment pòrtland és altament contaminant, ja que genera importants quantitats de CO₂, que contribueixen a l'escalfament del planeta a través de l'efecte d'hivernacle; a més, i com en el cas de l'acer, la fabricació del formigó requereix un elevat consum d'energia. Per això, ens sembla possible que, amb el temps, materials tradicionals com el maó o la fusta —materials escassament o nul·lament contaminants, la producció dels quals és força més sostenible— puguin retrobar un gran interès per a aplicacions estructurals de gran envergadura. Qui sap si, més endavant, retornarem als assoliments d'Antonelli i de Gaudí per idear futures construccions. Caldrà, llavors, satisfer encara una altra condició que també s'insinua positivament en algunes obres de Gaudí, com ara en els edificis del parc Güell: la industrialització dels components i de les construccions, per a reduir les necessitats de mà d'obra.

6. L'ordinador analògic

Hom ha dit que si Gaudí hagués disposat del modern ordinador digital i del programari de simulació actualment disponible, sens dubte se n'hauria servit de manera intensiva i n'hauria explotat les possibilitats per al disseny arquitectònic. Gaudí no disposava d'ordinador digital, però es va afanyar a desenvolupar el seu propi ordinador analògic en forma de maqueta funicular penjant per al disseny de l'església de la Colònia Güell (figura 7). En aquest sentit, sembla que es reafirma aquesta voluntat d'actualitzar mètodes i conceptes, és a dir, d'adaptar l'expressivitat i les formes de l'arquitectura a unes noves possibilitats tecnològiques.



FIGURA 7. Fotografia de la maqueta de fils original. (Font: Càtedra Gaudí.)

Tanmateix, el disseny d'una construcció real a partir d'una maqueta de fils no és una tasca òbvia ni fàcil. Són moltes les dificultats o els reptes previsibles. La *encarnació*, o necessitat de materialitzar la geometria dels fils del model en elements materials i construïbles, tal com apunten Casals i González en el seu escrit,⁷ constitueix tan sols un aspecte d'aquestes dificultats.

La visió de la maqueta funicular com un «ordinador», encara que analògic, més que com un simple model estàtic, té, al nostre judici, significatives implicacions relacionades amb la utilització d'aquest giny com a extensió de la ment i de la capacitat creativa del projectista. En plena era informàtica, en l'era del disseny assistit per ordinador i de la realitat virtual, tal vegada ens sembli obvi que l'arquitecte o l'enginyer es pugui servir d'una màquina per a

7. A. CASALS i J. L. GONZÁLEZ, «Gaudí y el misterio de la encarnación (las incógnitas de la Cripta de la Colònia Güell)», *Informes...*, vol. 42, núm. 408 (1990).

estendre no únicament les seves habilitats mecàniques sinó també la seva autèntica capacitat creadora. Aquest és un extrem que, considerat amb certa perspectiva històrica, ens il·lumina sobre el profund significat que per al disseny arquitectònic i estructural —com en punts d'altres camps del saber humà— ha tingut l'adveniment de l'ordinador i de la informàtica. Tot just fa alguns decennis, l'artista o el tècnic tenien la seva pròpia ment com a únic instrument vàlid per a la creació; l'única ajuda la proporcionaven laboriosos dibuixos o costoses maquetes. Aquests elements (dibuixos i maquetes) difícilment admetien un diàleg o una relació dinàmica, i gairebé sempre quedaven relegats a una pura representació, sense arribar a oferir al projectista una extensió efectiva del seu propi pensament.

Aquesta interpretació pressuposa que la maqueta penjant constitueix efectivament un banc de proves, un sistema dinàmic que sofreix successives actualitzacions a mesura que el creador, en tant que albira la resposta a les seves preguntes, hi interacciona i el modifica una vegada i una altra, fins a arribar a uns nivells òptims estructurals i formals. L'ús de la maqueta —l'ordinador analògic— permet assajar possibles variacions o alternatives, però garantint sistemàticament que la solució obtinguda encaixa dins l'espai de les solucions vàlides del punt de vista estructural i mecànic. El que distingeix la maqueta de fils d'altres tècniques de modelització —la representació gràfica o les maquetes «rígides» de guix, com les utilitzades per al temple de la Sagrada Família— és la flexibilitat, la capacitat per a contenir una infinitat de variacions o de respostes. De fet, l'edifici resultant és plenament deutor del procés de disseny utilitzat; sens dubte, l'edifici deu al mètode de disseny —la maqueta i la dinàmica de projecte que se'n deriva— gran part de la profunda originalitat de la seva ordenació estructural i compositiva. En altres paraules, l'«ordinador» ha dialogat efectivament amb la ment del creador i li ha inspirat una solució inèdita, profundament original i expressiva, encara que impregnada del concepte o de l'analogia que en regeix el funcionament.

7. Les limitacions de la modelització

En tot intent de basar el disseny en una analogia numèrica o física apareix amb força la necessitat de superar les limitacions pròpies de la modelització. L'objecte concebut com a ideal s'ha d'encarnar finalment en materials físics apropiats per a la construcció, la qual cosa exigeix una elaboració addicional molt important. Fonamentalment, apareixen, al nostre entendre, dues dificultats significatives:

- La necessitat de triar uns materials estructurals apropiats i mecànicament compatibles amb el procés de disseny ideat.
- La necessitat d'imaginar un procés constructiu possible que, des de la viabilitat tècnica i econòmica, permeti arribar a l'estat final o complet tot superant reeixidament totes

les fases intermèdies. Cada fase intermèdia dóna lloc a una estructura parcial que, òbviament, ha de ser estable per si mateixa. La maqueta funicular sols representa, de fet, l'equilibri de la configuració final i acabada de la construcció. Tota etapa intermèdia i inacabada s'escapa de l'equilibri previst; com si de manera sobtada talléssim alguns fils de la maqueta. Tanmateix, cal dissenyar el conjunt de manera que les etapes intermèdies també resultin viables i estables.

De fet, l'opció de la maqueta de fils com a mètode de disseny es pot considerar posterior a l'elecció del material petri com a mitjà constructiu. Efectivament, la maqueta penjant no fa més que traslladar a les tres dimensions el principi de la corba antifunicular o catenària, que, des del segle XVIII, i com ja s'ha esmentat, ha estat aplicat per al càlcul d'arcs de pedra o maó. Es tracta, per tant, d'un mètode vàlid per al disseny d'estructures lineals de fàbrica de maó o pedra. Queda, no obstant això, la necessitat d'assignar a cadascun dels fils de la maqueta una veritable secció material, caracteritzada per una forma, unes dimensions i una certa composició, és a dir, una estructuració interna i un espessiment adequats.

A aquest efecte, Gaudí desplega gran varietat d'alternatives, tot formant aquí columnes massisses de pedra, allí pilastres de maó, així com arcs de secció constant o bé diafragmàtics, entre una gran varietat de formes constructives. La maqueta funicular pren forma, però ho fa sota els auspicis sempre creatius de l'arquitecte. L'ordinador, per tant, ha constituït una eina efectivament útil per a la creació. Però Gaudí no ignora la necessitat de reinterpretar críticament els resultats amb la finalitat de culminar encertadament els objectius compositius, constructius i de resistència. El mur perimetral de la cripta —comparable a una làmina plegada materialitzada en pedra— és tal vegada un dels elements que experimenta una reelaboració creativa més extraordinària; els fils que en conformaven el perímetre han quedat materialitzats en un complex continu, bidimensional i plegat, que sintetitza meravellósament les dimensions plàstica i de resistència.

Per apropar-nos al segon problema ens hem basat tant en l'anàlisi clàssica de l'equilibri d'empentes com en mètodes moderns de càlcul computacional (figura 8). Malgrat que queda molt per elaborar i entendre, és possible apuntar alguns raonaments.

El model penjant, en principi, només descriu l'equilibri en la configuració completa de l'edifici. Per tant, l'estabilitat de l'edifici en les seves etapes constructives intermèdies no quedaria garantida. Hom pot imaginar que Gaudí va preveure tal circumstància i que va rectificar el disseny en algun sentit per assegurar l'estabilitat de la construcció en les etapes parcials. En particular, Gaudí va haver d'analitzar i, tal vegada, millorar l'estabilitat de l'estructura parcial de la cripta, que, com és sabut, constitueix actualment l'única part construïda del conjunt. No existeix cap documentació o testimoni que ens informi sobre com Gaudí va resoldre aquest aspecte. És possible fer la hipòtesi, no obstant això, que Gaudí realment va considerar aquest problema i que el va resoldre modificant adequadament la geometria dels

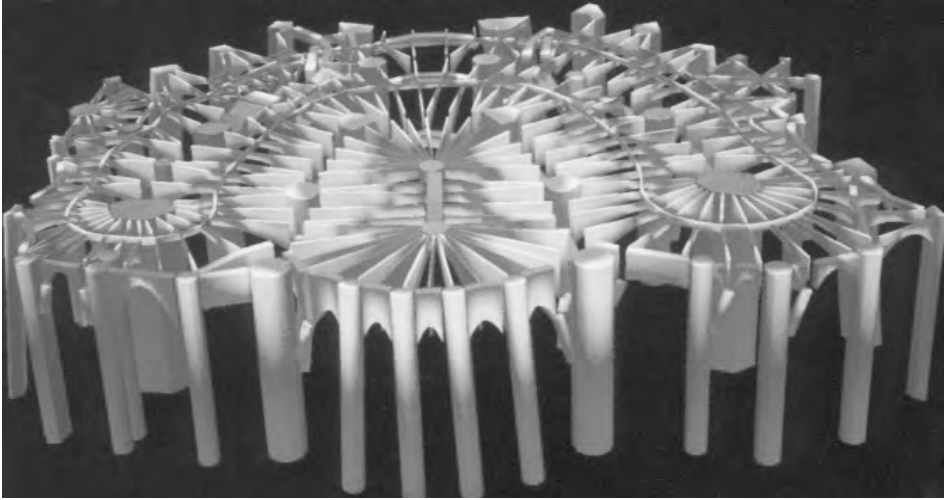


FIGURA 8. Model de l'estructura de la cripta de l'església de la Colònia Güell elaborat per a l'anàlisi de resistència mitjançant aplicacions informàtiques. (Fotografia de l'autor, 1996.)

elements de la cripta de manera que també resultessin estables en la configuració parcial. Els càlculs realitzats per ordinador, en qualsevol cas, han permès demostrar que la resistència i l'estabilitat de l'estructura de la cripta eren les adequades.⁸

A l'hora de construir l'església, Gaudí va materialitzar, principalment, la geometria del model general d'una manera coherent, tal com es pot reconèixer en les fotografies disponibles de la maqueta original (actualment desapareguda) i en la maqueta reconstruïda.⁹ No obstant això, l'anàlisi efectuada¹⁰ sembla que suggereix que alguns dels pilars de la cripta van ser especialment dissenyats de manera que proporcionessin equilibri tant en la configuració parcial com en la configuració final de l'edifici. Per exemple, és remarcable que, en l'estructura realment construïda, el plànol dels arcs perimetrals del nucli central de l'edifici és sen-

8. P. ROCA, J. L. GONZÁLEZ, R. BRUFAU i J. GÓMEZ-SERRANO, «Consideraciones sobre la dimensión estructural de la obra de Antoni Gaudí», *Obra Pública*, núm. 38 (1996); P. ROCA, A. GONZÁLEZ, J. L. GONZÁLEZ i A. CASALS, «Numerical Study of Gaudí's Cripta de la Colonia Güell», a *Structural Preservation...*, 1993.

9. J. TOMLOW, «El modelo colgante de Gaudí y su reconstrucción», *Informes...*, vol. 41, núm. 404 (1989).

10. P. ROCA, J. L. GONZÁLEZ, R. BRUFAU i J. GÓMEZ-SERRANO, «Consideraciones sobre la dimensión estructural de la obra de Antoni Gaudí», *Obra Pública*, núm. 38 (1996); P. ROCA, A. GONZÁLEZ, J. L. GONZÁLEZ i A. CASALS, «Numerical Study of Gaudí's Cripta de la Colonia Güell», a *Structural Preservation...*, 1993.

siblement menys inclinat que en el model funicular, tal com han notat Casals i González.¹¹ Una anàlisi detallada de les similituds i diferències entre la geometria de la maqueta i l'estructura realment construïda, encara per realitzar, podria resultar molt reveladora per a entendre millor el procés i les dificultats que va ser necessari superar per a fer-ne possible la construcció.

8. Notes finals

Al nostre entendre, és possible apreciar en l'obra d'Antoni Gaudí l'intent recíbit d'actualitzar solucions del passat —en realitat, solucions arquitectòniques intemporals— a les possibilitats i demandes tecnològiques, econòmiques i culturals de la seva època. Cal no confondre aquesta capacitat amb un suposat «perfeccionament», en sentit estricte, de les solucions del passat, la qual cosa ni té valor per al coneixement de la història de la construcció ni orienta cap a una correcta interpretació o valoració de l'obra de l'arquitecte. Més que no pas culminar un passat, el que fa Gaudí és albirar solucions genuïnament adaptades a les condicions del seu present; solucions que, tot explotant tècniques i materials posats a disposició pels avenços tecnològics, constitueixen importants innovacions estructurals, constructives i arquitectòniques.

La moderna explotació intensiva de la construcció allindada (o porticada) de formigó armat o estructura metàl·lica ha significat, en gran mesura, l'abandó d'ideals o models arquitectònics de caràcter més geomètric i orgànic. Conseqüentment, l'obra de Gaudí sembla que ha quedat separada de les pràctiques del nostre present per a constituir-se en un capítol genuí de la història de la construcció. No obstant això, existeixen en l'obra de l'arquitecte elements de gran vigència i interès per a l'arquitectura del present i del futur. Dues notes finals, relatives al material i al procés de disseny, tal vegada serveixin per a il·lustrar aquesta idea.

L'església de la Colònia Güell constitueix una magnífica demostració de les possibilitats estructurals i plàstiques de la fàbrica de maó. No hem de veure en l'explotació del maó, en tant que material estructural, cap anacronisme. Gaudí i Antonelli, entre d'altres, han mostrat les seves espectaculars possibilitats estructurals i arquitectòniques. Més modernament, Eladio Dieste ho ha demostrat novament amb la ceràmica armada. Atès que la ceràmica és un material més sostenible, des del punt de vista mediambiental, que l'acer o que el formigó (en termes de contaminació i de consum energètic per a la producció), és possible que l'ús del maó pugui ressorgir en un futur no gaire llunyà. Quan això s'esdevingui, trobarem

11. A. CASALS i J. L. GONZÁLEZ, «Gaudí y el misterio de la encarnación (las incógnitas de la Cripta de la Colònia Güell)», *Informes...*, vol. 42, núm. 408 (1990).

en l'obra de tals arquitectes un catàleg de solucions del màxim interès per als nostres futurs propòsits.

Així mateix, per a la concepció de l'església de la Colònia Güell, Gaudí sotmet els seus conceptes a l'exploració d'una analogia física basada en el model funicular penjant. Treballar sobre la base del model equival a romandre sistemàticament en l'espai de les solucions estables i apropiades per al material petri. Això, d'alguna manera, es pot comparar a un modern procés de disseny assistit per ordinador. Aquest recurs és utilitzat de manera plenament creativa per Gaudí, que troba en l'analogia física una font d'inspiració més que una servitud limitadora. En aquest acostament al procés de creació assistit podem trobar un exemple de les possibilitats que té un ús realment encertat i creatiu de l'ordinador o de les analogies físiques per a la creació arquitectònica; unes possibilitats que, precisament en aquests moments, sorgeixen amb vigor i alimenten fortament els arquitectes actuals més creatius, els quals, d'altra banda, sembla que també s'interessen per la recuperació d'una arquitectura més lliure i orgànica.

Referències

- CASALS, A.; GONZÁLEZ, J. L. «Gaudí y el misterio de la encarnación (las incógnitas de la Cripta de la Colònia Güell)». *Informes de la Construcción*, vol. 42, núm. 408 (1990).
- GAUDÍ, A. *Antoni Gaudí: Escritos y documentos*. Recopilació de Laura Mercader. Barcelona: El Alcantilado, 2002.
- GOULD, S. J.; LEWONTIN, R. «The spandrels of San Marco and the Panglossian Paradigm: A Critique of the Adaptionist Programme». *Proceedings of the Royal Society of London, sèrie B*, vol. 205, núm. 1161 (1979).
- GUASTAVINO, R. *Essay on the Theory of History of Cohesive Construction*. Boston: Massachussets Institute of Technology, 1893.
- HENNICKE, J. «Structural trees. Comments on some fundamental design and construction aspects of tree-like branching columns». *Bulletin of the International Association for Shell and Spatial Structures*, vol. 36, núm. 118 (1995).
- ROCA, P.; GONZÁLEZ, A.; GONZÁLEZ, J. L.; CASALS, A. «Numerical Study of Gaudí's Cripta de la Colonia Güell». A: *Structural Preservation of the Architectural Heritage*. Zurich: IABSE, 1993.
- ROCA, P.; GONZÁLEZ, J. L.; BRUFAU, R.; GÓMEZ-SERRANO, J. «Consideraciones sobre la dimensión estructural de la obra de Antoni Gaudí». *Obra Pública*, núm. 38 (1996).
- ROSSO, F. *Alessandro Antonelli i la Mole de Torino*. Torí: Stampatori, 1977.
- RUBIÓ, J. «Conferència sobre els conceptes orgànics, mecànics i constructius de la catedral de Mallorca». A: *Anuario, 1912*. Barcelona: Asociación de Arquitectos de Cataluña.
- TOMLOW, J. «El modelo colgante de Gaudí y su reconstrucción». *Informes de la Construcción*, vol. 41, núm. 404 (1989).