

L'escoliosi de la catedral

Alan Ward i Koeck

Professor d'enginyeria i doctor en Societat de la Informació
sac@andorra.ad

Resum

L'escoliosi de la catedral

S'analitzen les diferents deformacions observades en l'edifici actual de la catedral de la Seu d'Urgell amb modelització computacional. Concretament en els arcs de mig punt i la volta de la nau central, en les pilastres centrals i en l'eix o línia mitjana d'orientació est-oest de l'edifici. I si bé es confirma que les dues primeres són pròpies de l'estil de construcció, la tercera no.

Resumen

La escoliosis de la catedral

Se analizan las diferentes deformaciones observadas en el edificio actual de la catedral de la Seu d'Urgell con modelización computacional. Concretamente en los arcos de medio punto y la bóveda de la nave central, en las pilastres centrales y en el eje o línea media de orientación este-oeste del edificio. Y aunque se confirma que las dos primeras son propias del estilo de construcción, la tercera no.

Résumé

La scoliose de la cathédrale

Les différentes déformations observées dans le bâtiment actuel de la cathédrale de la Seu d'Urgell sont analysées par modélisation informatique. Plus précisément dans les arcs en plein cintre et la voûte de la nef centrale, dans les pilastres centraux et dans l'axe ou la ligne médiane d'orientation est-ouest du bâtiment. Et s'il est confirmé que les deux premiers sont typiques du style de construction, le troisième ne l'est pas.

Abstract

The scoliosis of the cathedral

The different deformations observed in the current building of the Seu d'Urgell cathedral are analysed with computational modelling. Specifically in the semi-circular arches and the vault of the central nave, in the central pilasters and in the axis or middle line of east-west orientation of the building. And while it is confirmed that the first two are typical of the construction style, the third is not.



La catedral de Santa Maria de la Seu és coneguda per tenir una sèrie de característiques que la fan única dins tot el Pirineu, i àdhuc més enllà. Es tracta d'una catedral d'estil romànic, que va sobreviure a les èpoques en què la majoria dels seus contemporanis van ser substituïts per edificis seguint altres estils més recents. La catedral és un edifici construït en granit, una pedra relativament pesant i de difícil treballar. Finalment, ha estat àmpliament remodelat en diversos moments al llarg dels segles, per seguir prestant servei a la comunitat.

En aquest context, un dels seus aspectes que més pot xocar al visitant de l'edifici és la desviació visible d'alguns dels seus elements, principalment les voltes de la nau central. Aquestes presenten deformacions dels arcs torals, dels pilars i també de la línia mitjana o eix del conjunt, el tot en diferents direccions i sentits. Es planteja així en quin moment es van produir aquestes deformacions, si va ser ja durant la construcció de l'edifici o bé en un període posterior.

Posant aquesta situació en paral·lel amb les moltes modificacions de pla original de l'edifici, proposem en aquest estudi alguns elements de reflexió sobre les possibles informacions que se'n pot extreure de les circumstàncies en què es va construir, i aquelles que van motivar algunes de les modificacions més importants. Es vol procedir sempre des de l'aproximació de la mentalitat i la realitat de les persones que hi van participar, tant pel que fa als constructors com als promotors del projecte. Per fer-ho, es faran servir algunes eines de la tecnologia moderna per estudiar els possibles orígens de les desviacions.

1. Les alteracions observables

Podem observar amb facilitat tres desviacions o deformacions distintes dins l'edifici actual de la catedral (Figura 1). Pel que fa als elements estructurals de la nau, els arcs de mig punt que formen la volta de la nau central es troben deformades en el seu intradós, tant en el seu centre (cap abaix) com també a les seves arrencades (cap enfora). Addicionalment, les pilastres de suport de les parets de la nau mostren una deformació cap a l'interior, especialment visible a mitjana alçada de les pilastres al centre de la nau. Tal com es veurà més endavant, aquestes alteracions són típiques de l'estil de construcció romànic, i així cal considerar-les com a factors integrals de la concepció *ab initio* de l'edifici.



Figura 1. Interior de la nau central de la catedral de la Seu, vist des de la galeria damunt l'entrada principal

A més de les desviacions dels elements de suport, la nau central de la catedral presenta una tercera alteració que no es pot atribuir al mètode de construcció, que és una desviació de la línia mitjana. Es pot apreciar en qualsevol cartografia mínimament precisa de l'edifici: l'absis i el transepte tenen una orientació gairebé exacta cap a orient, mentre que el conjunt de les tres naus té una orientació que es devia lleugerament cap al sud.

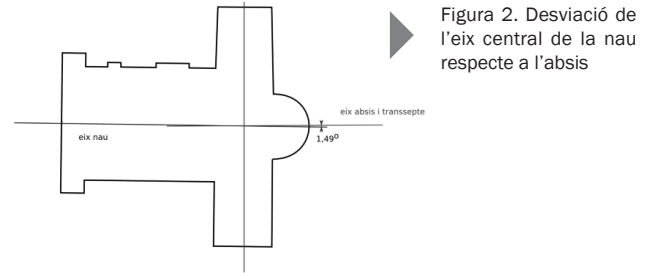


Figura 2. Desviació de l'eix central de la nau respecte a l'absis

La mesura precisa de la desviació no és fàcil, ja que varia segons els punts de referència escollits al llarg dels murs de les naus i del transepte. En tot cas, l'estimem en aproximadament $1,49^\circ$, valor suficient perquè sigui notable dins un pla, que en el seu conjunt respecta escrupolosament les orientacions principals (Figura 2).

2. Deformacions dels elements estructurals

Una de les característiques ben conegudes de l'arc de mig punt és el seu comportament com a element estructural sotmès a un pes.¹ En general, la força se sol aplicar a la part superior de l'arc, o de la volta de canó que es pot veure com una forma extrusionada de l'arc de mig punt. A l'intradós de la volta, la força es va transmetent cap a baix, transferint-se finalment cap als elements de suport (murs o pilars). El problema que sorgeix és que, per funcionar, cal que la clau de l'arc² —la dovella central a dalt de tot de l'arc— estigui sotmesa a forces de compressió laterals. Sense elles, no es pot mantenir en el seu lloc. Així, la transmissió del pes no es fa únicament verticalment cap a baix, sinó que apareix un component lateral. Aquest component té una tendència a fer separar-se la part alta dels elements de suport. A mesura que aquests elements es va deformant cap a l'exterior, la part alta de la volta també disposa d'espai per poder cedir cap a baix, i es produeixen unes deformacions típiques de l'arc.

1. Per un altre exemple d'una volta romana amb una patologia gairebé idèntica a la catedral de la Seu, veure l'anàlisi de l'església de Guimarei en [HUE].

2. Notem, en aquest sentit, que els arcs torals de la catedral de la Seu no són formats per dovelles individuals, sens dubte per què hauria calgut emprar pedres de dimensions molt grans i l'arc resultant hauria tingut un gruix excessiu. En el seu lloc, trobem un entramat de pedres amb forma de carreu que s'imbriquen per fer la mateixa funció que les dovelles d'un arc clàssic.

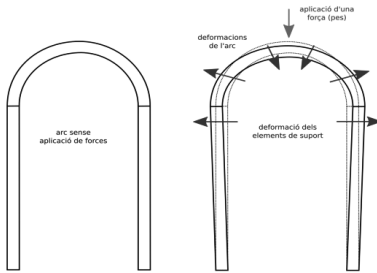


Figura 3.
Deformacions d'un arc de mig punt sotmès a una força vertical

Aquestes deformacions es poden observar a simple vista a la catedral de la Seu (Figura 3), en què prenen una forma particularment característica en els arcs torals de la nau central. Si numerem aquests arcs des del creuer baixant fins al peu de la nau, els arcs número 1 (al creuer) i 5 (integrat en la façana oest de l'edifici) són aquells que presenten una deformació gairebé nul·la, mentre que els arcs centrals i especialment l'arc número 3 al centre de la nau presenten deformacions força importants.



Figura 4.
Deformació de l'arc de faixa central (número 3)

Podem notar, de manera tangencial, que l'ús d'una volta de creueria o gòtica hauria permès disminuir la deformació de la volta, ja que les dues meitats de l'arc ogival condueixen més bé les forces verticals cap a terra a través dels pilars (Figura 4). El coneixement d'aquest fet és allò que va permetre als constructors de catedrals d'estil gòtic aconseguir alçades més importants en els seus dissenys, ajudats en això per un ús menor de pedra pels elements aeris dels seus edificis.

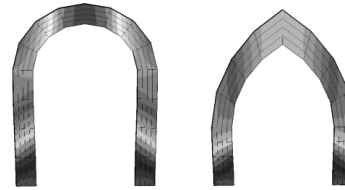


Figura 5.
Deformació vertical de les voltes amb arc romà i amb arc ogival en dos arcs de dimensions equivalents. Màxima deformació en vermell a dalt

Tot i això, fins i tot amb l'estil gòtic a vegades l'ambició dels constructors va ser major que les seves capacitats tècniques. Es coneixen fenòmens semblants als descrits — deformacions i àdhuc caiguda de pedres— en catedrals gòtiques del segle 13, com ara Sant Pierre de Beauvais (França) [ALL]. El motiu és l'aparició de forces laterals que s'exerceixen sobre els elements verticals de suport en els seus punts d'ancoratge a terra (Figura 5). Les tensions tallants resultants es poden reduir afegint *arcbotants* per repartir les forces laterals sobre un nombre de pilars més gran. És interessant notar, en aquest sentit, que la construcció o la renovació de les primeres esglésies emprant el *francigenum opus* o estil gòtic —com ara la Basílica de Saint-Denis o Notre Dame de París— es van iniciar durant el segle 12, en un moment en què la catedral de la Seu encara estava en curs de construcció. És, també, en aquest moment que s'introdueix l'arcbotant, absent a Saint-Denis però present a Notre Dame.



Figura 6.
Aparició de tensions tallants degudes a les forces laterals en el peu dels arcs romà i gòtic. La màxima tensió en vermell a baix

La importància de les deformacions depèn de dos factors. El primer és, naturalment, la intensitat de la força aplicada. El pes total suportat és format no només per aquell dels elements arquitectònics que estiguin suportats per l'arc, sinó també pel pes del mateix arc. En el cas de la catedral

de la Seu, l'absència de revestiments a l'interior de la volta central després de la neteja practicada a principis del segle 20 per Puig i Cadafalch [OBI] permet conèixer amb precisió la composició dels arcs i dels altres materials de les voltes; es tracta de la mateixa pedra de granit que es va emprar per la construcció de columnes i parets exteriors. Ara bé, el granit és malauradament una pedra bastant densa, amb valors entre 2.600 i 2.700 kg/m³ [EDU]. Es tracta d'un material excel·lent pel que fa a la seva capacitat per transmetre forces de compressió quan aquestes es transmeten verticalment, cosa que en aquest cas sense dubte ha permès als fonaments i part baixa dels pilars de l'edifici aguantar bé el pes del conjunt. Però, en conjunció amb l'ús de l'arc de mig punt, la densitat del material haurà contribuït a sotmetre els arcs torals a una pressió lateral que ha acabat per desplaçar les dovelles que la conformen lateralment, deformant així els arcs sotmesos a major pes. El segon factor que determina la deformació és la relació entre alçada i separació dels elements de suport. Si els pilars o murs de suport són molt alts, qualsevol inclinació —per mínima que sigui— es traduirà per un desplaçament important dels extrems superiors dels pilars, i així dels punts d'unió entre els suports i l'arrencada de l'arc. Quan l'arc té relativament poca llum i una proporció estreta, aquest desplaçament esdevé important en proporció a la seva forma. Per aquest motiu, els edificis romànics relativament baixos poden presentar deformacions menors de les voltes. En el cas de la catedral de la Seu, però, l'alçada de la nau central és important tant en termes absoluts com també en proporció a la separació entre les columnes principals. Així, és més fàcil que els extrems superiors de les columnes es desplacin cap a l'exterior. Per perfilar més precisament quines són les deformacions esperades en aquesta geometria, s'ha fet servir el programari Calculix [DHO] per construir un model computacional de la nau central així com els seus elements de suport. Per simplificar el procés de càlcul, s'ha considerat un material únic de construcció, corresponent a un granit amb densitat $\rho = 2.700 \text{ kg/m}^3$. Pel que fa a les característiques d'elasticitat, s'ha optat per un mòdul de Young $E = 20 \text{ GPa}$ i coeficient de Poisson $\nu = 0,2$. Aquests valors són comparables amb altres que es fan servir

correntment per fer models de temples romànics en granit, entre altres [GIR] qui fan servir $E = 50 \text{ GPa}$, $\rho = 2.700 \text{ kg/m}^3$ i $\nu = 0,15$.³

S'ha modelitzat una nau amb les mateixes dimensions que aquella de la catedral. Composta per quatre trams separats per arcs torals, cada tram presenta un parell d'*occuli* afrontats. En un primer experiment, s'ha deixat una lateral sense cap suport des de l'exterior, mentre que l'altre lateral disposa d'una part dels seus pilars amb suport exterior tal com li ho proporcionaria una nau lateral situada en aquell costat.

Dels resultats de l'execució d'aquest model, se'n dedueixen dues conseqüències. La primera és que, sense algun altre element que els doni un reforç lateral, els elements de suport de la volta de la nau central amb aquesta proporció molt alta i estreta arribarien a una situació crítica (Figura 6). La zona sotmesa a un major esforç és aquella de la unió entre els elements de suport i l'arc de la volta. Tot i la presència dels òculs no massa llunyans d'aquesta zona, en realitat aquests no semblen tenir un efecte gaire important pel que fa a la integritat estructural del conjunt.

Per altra banda, una vegada que s'ha establert un reforç lateral gràcies a la presència d'una nau lateral i les seves arcades corresponents, aquesta és d'un gran ajut per reduir la deformació de la volta. Les naus laterals no només serveixen per eixamplar l'espai destinat als feligresos, sinó que a més són elements de suport essencials per assegurar l'estabilitat de la volta principal. En la realitat, però, és evident que en aquest edifici el reforç lateral no era del tot suficient per evitar l'aparició de deformacions de la volta de la nau.

Si examinem la deformació lateral de la nau des d'un punt de vista lateral (Figura 7), observem que sense suport als dos extrems, els seus elements de suport —modelitzats aquí com simples pilars— pateixen una deformació

3. De manera molt ràpida, el mòdul de Young correspon a la força que cal aplicar a una peça per aconseguir una deformació donada, i correspon a una pressió. Com més alt és aquest valor, menor serà la deformació de la peça. Per altra banda, el coeficient de Poisson és la proporció entre la deformació lineal de la peça i el seu eixamplament. És un coeficient sense unitat.

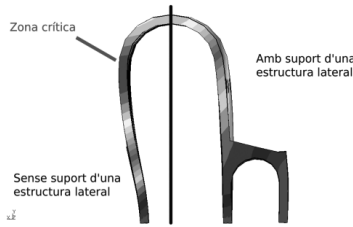


Figura 7.
Deformacions
transversals de la nau,
amb i sense suport
lateral

important arran de terra. Es pot explicar aquest fet que és en aquest punt on les columnes són ancorades als fonaments en què el conjunt de totes les forces laterals generades en les parts superiors de les voltes s'han de transmetre a terra. D'aquest resultat, deduïm la importància cabdal dels elements que estiguin relacionats amb la nau als seus dos extrems: en una punta, l'estructura del creuer i el reforç que suposa la unió entre les parets laterals de les naus i del transsepte, i a l'altra la façana i les dues torres octagonals que s'hi troben.

Comparant el model computacional amb la realitat, s'observa que en la realitat, la nau de la catedral ha aguantat prou bé la seva forma tant a la façana oest com al creuer a la capçalera. Així, aquest reforç ha actuat per donar més rigidesa als seus extrems. Però la situació és diferent en el centre dels murs laterals. Observem que els dos trams centrals de la nau presenten una deformació important cap a l'exterior, visible sobretot en proximitat de les dues portes laterals que donen a la plaça del mercat i cap al claustre (Figura 8). En aquest punt, la base dels murs laterals són fixos en la seva posició inicial, mentre que la part superior ha perdut la seva verticalitat i s'ha inclinat cap a l'exterior.

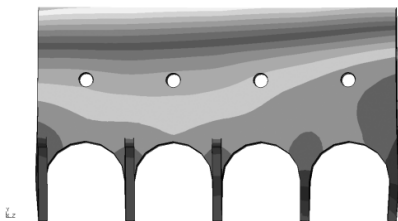


Figura 8.
Deformació de les
extremitats de la nau.
Els tres primers pilars
des de l'esquerra
tenen suport lateral,
mentre que és
absent en els dos
últims



Figura 9. Deformacions dels
laterals de la nau, visibles a
l'exterior

En un segon experiment, es va introduir en el model computacional el suport lateral al llarg de totes dues bandes de la nau central, corresponent a les arcades de les naus laterals. A més, es va fixar la posició dels dos extrems de la nau per tenir en compte el suport del creuer i de la façana oest. Amb aquestes modificacions, el model respon bé a allò que s'observa en la realitat (Figura 9 i 10). D'una banda, observem que les deformacions verticals ja no afecten els dos extrems de la nau: el suport rebut és efectiu. Per contra, la part central de la volta de la nau és la que rep una deformació màxima cap a baix, tal com era d'esperar. Naturalment, l'arc toral central és aquell que se sotmet a una deformació vertical elevada, i en resposta existeix el moviment lateral. Així tot el conjunt del mur a cada lateral de la nau té una tendència a desplaçar-se cap a l'exterior. Ho fa sense, però, alterar les posicions respectives dels seus elements. És interessant notar, novament, que la deformació màxima es produeix per damunt del nivell dels òculs, cosa que torna a confirmar que aquests no hi participen com a factor de debilitat de l'estructura. Per altra banda, el model ens confirma la deformació cap a l'exterior dels pilars principals de la nau, associats als arcs torals corresponents (números 2, 3 i 4). Ens podem preguntar si aquesta deformació ja era visible en el moment de la construcció inicial, sia mentre els

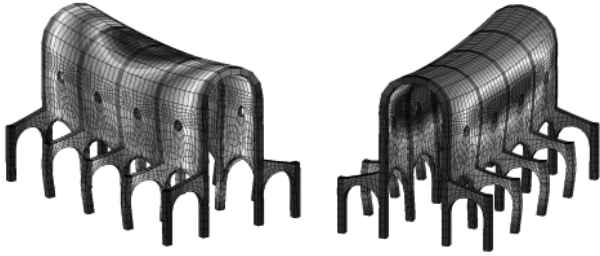


Figura 10. Deformacions de la nau.
a) Deformacions en sentit vertical.
b) Deformacions en sentit lateral

suports de forma estaven encara en el seu lloc, sia en el moment de retirar les formes i permetre que les voltes prenguin el seu emplaçament lliure [COS, p. 89].

De ser-ho, una possible mesura correctora hauria estat afegir contraforts exteriors que permeti assegurar més bé els elements de suport principals de la nau. Efectivament, observem dos elements afegits al lateral nord. Un engloba tot el tram del mur que va des de l'arc toral primer fins al segon, i que incorpora la porta exterior. El segon és més estret, i s'emplaça tan sols per donar suport a l'arc toral tercer, entre la porta lateral i la torre octogonal al peu de la nau. Aquests elements s'observen també en el mur lateral sud. Pel seu estil arquitectònic, es troben molt ben integrats en el conjunt de l'edifici; addicionalment, els materials emprats semblen correspondre exactament a aquells emprats en altres zones com ara les dues torres del transsepte. Per aquest motiu, pensem que formen part del pla de construcció original o que, possiblement s'hi van poder incloure bastant ràpidament i en tot cas abans de donar l'obra com a acabada. D'aquesta manera, malgrat que el mur lateral mostra una decidida inclinació cap a l'exterior que tradueix un cert desplaçament de la part alta de la nau, el conjunt sembla estable.

Addicionalment, es pot apuntar que el pes afegit corresponent a la construcció d'un mur suplementari per tancar l'espai damunt la nau lateral nord sens dubte ha participat en assegurar el conjunt. Aquest mur també es troba ben integrat dins el projecte arquitectònic, tot i que amb la particularitat de comportar espitlleres, cosa que en

fa un element defensiu a més de religiós. Situat tot al llarg del costat nord de la nau, la seva influència estabilitzadora s'haurà exercit tot al llarg d'aquell costat i especialment en els trams centrals de la nau.

Per altra banda, podem notar que el lateral oposat damunt del claustre no disposa d'aquest mur suplementari. Tot i això, sí que és present un contrafort suplementari situat al centre de la nau, donant suport lateral a l'arc toral segon —que es troba al centre de la nau— des del sud (Figura 11). En aquest cas, però, la influència estabilitzadora haurà estat tan sols localitzada en aquest arc. S'haurà exercit de manera desigual al llarg de la nau, introduint així un aspecte asimètric dins l'evolució del conjunt. És en aquest sentit que podem parlar d'una certa sinuositat de la línia mitjana de la nau, i del temple en el seu conjunt. No afecta els fonaments arran de terra, sinó tan sols les parts més elevades de l'edifici.

La factura més basta d'aquest contrafort únic pot fer pensar que es tracti d'un afegit posterior a la construcció, en resposta a un moviment observat de la meitat sud de la nau i de la mà d'un interventor menys hàbil que els operaris originals. Podem, fins i tot, dubtar dels seus efectes reals, ja que l'estructura afegida té poc pes propi i, davant del moviment lateral del mur tan sols es desplaçarà cap a l'exterior acompanyant-lo.



Figura 11. Suport únic al lateral sud de la nau

3. La seqüència de construcció de la nova catedral

Per buscar una explicació de la deformació de la línia mitjana de l'edifici, possiblement convé reflexionar al desenvolupament de l'obra. Com és sabut [PUI], l'edifici que ha perdurat fins als nostres dies no és l'edifici original, sinó que substituïa pel cap baix dos o tres edificis anteriors bastits consecutivament en el mateix lloc. Treballs de prospecció recents amb georadar han permès a Boto Varela [BOT] determinar la presència d'elements de construccions anteriors en el subsòl. Pel que fa als fonaments de l'edifici actual, el mateix autor sembla interpretar l'existència de tres fases en la seva construcció:

- 1- Construcció dels fonaments de la capçalera.
 - 2- Construcció dels fonaments dels peus de l'edifici.
 - 3- Aixecament de les parets laterals de les naus.
- Posteriorment, s'hauria anat pujant la construcció dels elements verticals.

Aquesta visió del procés és certament coherent amb les dades disponibles.

Ara, bé, la seqüència constructiva no es pot concebre de manera aïllada, sense tenir en compte les necessitats materials dels usuaris de l'edifici al llarg de l'obra. En aquest sentit, podem assenyalar dos requeriments principals que els constructors devien tenir molt presents. Un seria poder assegurar l'ús continuat de l'edifici al llarg de tota la duració de les obres. Un segon seria poder mantenir la posició de l'element sacra principal del temple, l'altar major.

El primer condicionant devia ser especialment important. En el moment d'iniciar la construcció, ja se sabia perfectament bé que el conjunt del procés s'allargaria unes quantes dècades, pel cap baix. Potser no es podia imaginar que finalment prop de noranta anys, però una previsió inicial —per optimista que fos— no baixaria de vint o trenta anys. Es plantejava de manera aguda la qüestió de la continuïtat del culte, i això de manera especial en un temple que havia de complir el paper de seu del Bisbat, i també de punt de parada important al llarg del Camí de Sant Jaume. No era qüestió de “tancar per obres”, per dir-ho d'alguna manera, i encara menys de fer-ho per una llarga durada.

Per altra banda, l'Església catòlica no es coneix per celebrar

l'eucaristia a l'aire lliure, llevat d'algunes circumstàncies molt determinades i relacionades amb el cicle agrícola (aplecs i trobades). Per aquest motiu, una de les urgències que els constructors tenien al seu davant era poder cobrir molt ràpidament els espais destinats al culte, per permetre el seu ús mentre es continuava la construcció de la resta de l'edifici. Aquest motiu podia revestir una importància especial, tenint en compte les temperatures i les precipitacions típiques de la regió en període hivernal.

Pel que fa al segon condicionant, no cal recordar que l'altar major és sense dubte la part central del temple, ja que és a partir d'aquest indret que l'oficiant invoca directament la divinitat en nom del poble. Per aquest motiu, el seu ús continuat durant tot el període anterior li haurà atorgat un caràcter sagrat no només de forma, sinó també pels feligresos que hauran vist els seus pares i avantpassats combregant davant d'aquell mateix altar. La continuació del culte havia de constituir un argument molt fort per mantenir la seva posició dins el nou edifici. Aquest enfocament de mantenir l'edifici anterior al llarg del procés constructiu seria el mateix emprat en altres èpoques en catedrals com la de Tortosa [COS, p. 147].

Estant així les coses, com procedir per començar la construcció del nou edifici, tot mantenint la funcionalitat del conjunt? Altrament dit, com podien fer compatibles el màxim nombre d'elements de nova construcció amb la presència continuada de l'edifici existent (Figura 12)?

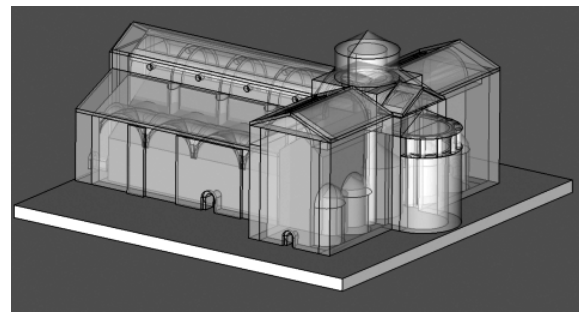


Figura 12. El problema dels constructors: com fer compatibles la presència alhora d'elements de l'edifici existent amb aquells de nova construcció

Per fer-ho, un primer dubte que hem de resoldre mínimament són les característiques i dimensions de l'edifici substituït. Tres elements ens poden permetre una aproximació.

El primer és el fet que l'edifici substituït no era una església qualsevol, sinó que ja tenia la funció de catedral del Bisbat. Es tractava, doncs, d'un edifici que no només havia de donar servei al culte de la ciutat, sinó que a més era de prestigi. En aquest sentit, ens esperàvem que fos una església de dimensions superiors a les altres de la diòcesi. Concretament, un dels temples que tenia més importància —i, possiblement, gaudia de recursos econòmics importants— seria l'església del monestir de Sant Serni de Tavèrnoles. En aquest cas, es tracta també d'un edifici d'estil romànic, amb tres naus i una capçalera ben desenvolupada amb tres absis i algunes absidioles. Seria raonable suposar que la catedral de la Seu havia de tenir dimensions mínimes corresponents a aquest edifici. En tot cas, no es pot obviar la possibilitat que fossin superiors.

El segon element que ens facilitaria l'aproximació a les característiques de l'edifici substituït seria la detecció d'evidències materials en el subsòl de l'edifici actual, cosa que va ser un dels objectius de la campanya de recerca amb georadar del projecte *TEMPLA* de l'any 2017 [BOT]. En aquest estudi, es va detectar «una planta de edificio basilical de tres naves [...] con la nave central [...] mucho más ancha que las laterales y un transepto desarrollado [...] al que se abrían cinco ábsides.» Aquesta determinació de les característiques de la catedral anterior recorda molt la forma general de l'església de Sant Serni, amb una distribució i dimensions properes de les naus però una configuració diferent dels absis. Així, trobem cinc absis en línia en el cas de la catedral, contra tres absis repartits en un trilobulat en posició central i dos a les puntes del transsepte en el cas de Sant Serni de Tavèrnoles.

Tot i aquest resultat força precís, val a dir que el georadar té la limitació de tan sols poder trobar allò que existeix en el subsòl que, tractant-se d'un edifici, seran sobretot els fonaments que donen suport als elements de més pes de la construcció. En un edifici amb forma d'església romànica, aquests són sens dubte els pilars de la nau central, i sobretot els quatre pilars que donen suport al creuer, ja que totes aquestes han d'aguantar el pes de les

voltes. Addicionalment, podem esperar que els murs laterals i la façana principal tinguin fonaments ben desenvolupats, atès el seu paper de suport de les càrregues de les voltes. Per contra, pot ser difícil detectar amb precisió els contorns dels absis, ja que aquests elements tenen en realitat un desenvolupament vertical petit associat a un pes relativament modest. Així, no necessiten una fonamentació amb la mateixa resistència que les altres parts de l'edifici.

Finalment, el tercer element que ens pot aportar alguna informació és el raonament següent: no tindria massa sentit pel Bisbat substituir un edifici més o menys funcional⁴ per un altre de dimensions properes. Sens dubte, es justificaria més bé la reconstrucció completa de la catedral en el cas de fer una substitució per un edifici de dimensions més grans, cosa que permetria augmentar la seva capacitat d'acolliment així com el seu prestigi.

Un apunt tècnic addicional és que els murs laterals de la nau constituïen un element especialment delicat pel que fa a la seva construcció. Es tracta de dos panys de paret relativament primers en relació amb la seva llargada i alçada. Per aquest motiu, són delicats i s'han de poder sostenir lateralment als seus dos extrems. D'aquí que, des de la pura lògica constructiva, sigui menester començar per assegurar uns bons suports als dos extrems de la nau. Dos elements arquitectònics són especialment resistents i poden proporcionar aquest suport als murs laterals: un és constituït per la unió entre murs a 90° als quatre cantons del creuer, i l'altre és la façana principal al peu de la nau. Els constructors es trobaven doncs davant de dues alternatives:

- Començar per demolir la façana occidental de l'edifici existent, cosa que comportava també tombar les naus. Aleshores, podien procedir a construir la nova façana principal i nau. Després havien de continuar amb el creuer, absis i transsepte del nou edifici.

4. Amb la condició que, segons les fonts documentals, es descriu la catedral existent com a «gairebé enrunada» [VIL]. Una altra cosa seria si ens volem creure en la realitat d'aquest estat ruïnós (quin bisbat deixa que la seva Seu decaigui, sobretot quan es fa servir diàriament pel culte?), o bé si es tracta d'un simple argument per a justificar la construcció d'un nou edifici.

- Començar per demolir el creuer existent, tot mantenint la nau central. Després, construir el nou creuer i la façana del nou edifici. En acabat, demolir la nau i la façana de l'edifici existent, i construir els elements corresponents del nou edifici.

El principal factor que els permetia decidir per una solució o l'altra és la diferència de dimensions entre els dos edificis. L'edifici existent havia de ser lleugerament més petit que el nou edifici projectat i que acabaria essent la catedral que coneixem. Per aquest motiu, els suports (façana i creuer) dels murs laterals del nou edifici havien d'anar més enfora que els existents —augmentant així les dimensions i la superfície útil de les naus—. Una possible solució constructiva, en aquests casos, és mantenir l'edifici existent, tot començant a construir el nou edifici al seu voltant. Aquesta tècnica seria factible a la catedral de la Seu, al nostre entendre. En realitat, també s'ha pogut observar en altres catedrals dels Països Catalans en el moment en què un edifici era substituït per un altre de dimensions superiors. Un exemple en seria la catedral de Tortosa descrit en [LLU], en què l'edifici de substitució era d'estil gòtic i de planta considerablement major que l'edifici substituït d'estil romànic.

El plantejament de construir la nau de la nova catedral no hauria estat possible si els constructors haguessin pres la primera opció descrita, ja que els nous murs laterals mancarien de suport al creuer durant la seva construcció. Així, proposem modificar lleugerament la seqüència constructiva proposada per Boto, de la manera següent:

1. Demolir els extrems del transsepte de l'edifici existent. Aquesta operació a penes impactava l'interior de l'edifici, i menys tenint en compte que devien ser extrems relativament modestos en proporció amb la seva llargada.
2. Marcar la posició del creuer del nou edifici i, possiblement, l'absis i el transsepte.
3. Començar la construcció dels fonaments i angles del nou creuer i absis.

A partir d'aquest moment (Figura 13), els constructors tenien l'edifici anterior (en marró) que encara ocupava l'espai central. Al seu voltant, els dos extrems de l'edifici actual (en groc) començaven a aparèixer. Desconeixem fins a quin punt es va prosseguir el seu desenvolupament

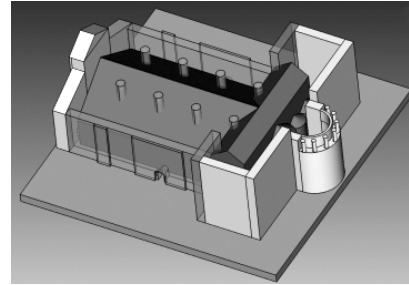


Figura 13. Estat de la construcció a finals de l'etapa 3

vertical, abans de continuar amb la pròxima fase del procés de construcció del conjunt. Aquesta fase 4 ja implicava la construcció dels pilars i murs laterals de la nau central (transparentes), moment en què la presència de l'edifici antic ja interferia de manera important amb la nova construcció.

4. Traslladar temporalment el culte dins la nau del vell edifici. Demolir el transsepte i l'absis de l'edifici antic. Acabar el creuer i l'absis de l'edifici nou així com el seu tancament per dalt, encara que fos en forma d'una solució temporal i emprant materials lleugers (possiblement, una coberta de fusta).

5. Tornar a traslladar el culte dins el nou creuer. Demolir el conjunt de la vella nau i façana.

6. Situar els fonaments de la façana del nou edifici i en especial els pilars de la nau, iniciar la seva construcció.

7. A partir del moment en què la façana i les dues torres al seu peu prenien certa entitat, iniciar els murs laterals de la nau suportant-ne els extrems en la façana i el creuer.

8. Tancar la volta de les naus central i laterals.

A partir d'aquest moment, ja disposaven de tot el conjunt troncal de l'edifici que tornava a estar plenament funcional. Podien treballar al seu ritme sobre l'acabament de les ales del transsepte i el tancament de la cúpula ja en la seva forma definitiva.⁵ És, possiblement, en aquest context que

5. Fem la distinció, aquí, entre la cúpula com a estructura constructiva amb caràcter intern —talment una volta— i el cimbori, que seria l'estructura visible externament i amb forma octagonal.

cal situar la figura del mestre d'obra Raimon Lambard qui, segons Durant i Porta [DUR], va ser contractat «especialment per concloure'n les parts altes.» Tal com apunta Gascón i Chopo [GAS], els imperatius econòmics d'un moment financerament i políticament difícil de finals del segle 12 poden haver imposat una certa simplificació d'aquests elements de tancament, cosa que es pot comprendre després d'un procés de construcció llarg i dispendiós.

D'aquesta manera, es perfilen dos períodes distints del procés de construcció:

El primer, durant el qual es van dur a terme les fases 1 a 8, intentant en tot moment mantenir la compatibilitat entre l'edifici existent i el nou edifici. Aquest estaria a càrrec dels «canonges obres», integrats en aquest col·lectiu amb l'objectiu exprés de tirar endavant la construcció de l'edifici [VIL].

El segon, en què es va emprar la nova figura de l'*operarius* —aparegut a mitjans del segle 12 [SAN]— com a direcció tècnica de l'obra, encarregat de donar els últims retocs i procedir al tancament complet de l'edifici. En aquest moment, ja s'eliminen totes les restes de l'antic edifici que encara quedin, i l'edifici nou pren la seva forma definitiva.

4. La desviació de la línia mitjana

Una escoliosi es pot definir mèdicament com una “desviació lateral del raquis, el qual adopta una forma sinuosa” [DIC]. Aquest quadre correspon a la forma final de l'eix principal de les voltes de la nau central de la catedral. La desviació de l'eix de la nau respecte a absis és una qüestió que forma part íntegra de la construcció inicial de l'edifici; no pot ser un problema sobrevingut com va ser les deformacions analitzades anteriorment. La seqüència constructiva proposada té l'avantatge d'explicar la desviació de la línia mitjana que constatem. En efecte, si es comença la construcció pel creuer i l'absis, una vegada que s'estigui a punt per començar a emplaçar els fonaments de la porta principal al peu de la nau, caldrà fer un treball de topografia acurada per situar aquests elements sobre el terreny. Si la precisió de l'operació de posicionament manqués de la precisió necessària —cosa plausible en una època en què ni tan sols es coneixien els instruments òptics refractants— és

molt possible que es produís aquesta desviació molt lleugera.

Tot i que el procediment de bastir un edifici a l'interior d'un altre pot semblar complex, en realitat no és així a condició que l'espai interior del nou edifici sigui suficient. En la Figura 14, s'ha sobreposat al pla del nou edifici de la catedral (en blanc) un possible pla d'un temple existent (en verd). S'ha volgut optar per una església ben romànica — dins la tradició pirinenca— com a hipòtesi de treball, amb tres naus i fins a quatre absidioles a més de l'absis central. Així i tot, s'observa que el pla del nou edifici se circumscriu amb certa facilitat al traçat de l'antic, llevat d'algunes interferències —en taronja—.

Aquestes interferències es limitarien als extrems del transsepte de l'edifici existent, així com als pilars de la nau central del nou edifici que caldria inserir a través de la nau de l'edifici existent. També, en alçat, trobaríem interferències entre les voltes de les naus laterals dels dos edificis. És per aquest motiu que, sense dubte, hauria estat necessari demolir la nau existent abans de poder procedir a l'emplaçament dels pilars, i doncs a la construcció de la nova nau. Una gran part tant de l'absis com de la façana oest del nou temple es podrien iniciar sense afectar la nau de l'antiga, que s'hauria pogut fer servir per a la continuació del culte mentre es començaven les obres.

De procedir així, però, és interessant observar que en el moment d'emplaçar els fonaments de la façana oest, els constructors tindrien la seva visió del creuer bloquejada en

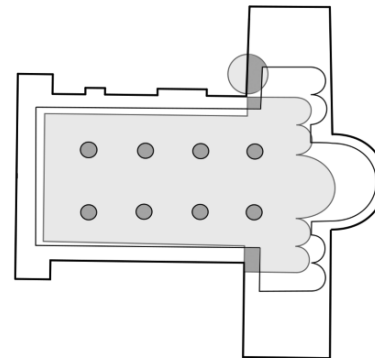


Figura 14.
Interferències entre
una possible catedral
existent i el nou edifici

gran part per la presència de la nau de l'edifici antic. Addicionalment, podem notar que els altres edificis religiosos que formen part d'aquest conjunt catedralici – Sant Pere al sud, Sant Miquel al nord, Santa Eulàlia a l'est i –possiblement– l'església del Sant Sepulcre a l'oest [CAR, AUG]– tenen tots una orientació que no respecta exactament l'eix est-oest tal com ho fan l'absis i el transsepte de la catedral actual. Al contrari, l'orientació de totes aquestes esglésies sembla trobar-se lleugerament desviada cap al sud. Per respectar l'harmonia del conjunt, no és no raonable suposar que la nau de la catedral anterior també ho fes així, i que aquesta part de l'edifici hagi servit als constructors com a guia en el moment de traçar les línies de la nau de l'edifici actual. Aquests dos fets podrien, conjuntament, explicar una desviació de tan sols 1,49° entre la nau i l'absis.

Finalment, en el diagrama anterior no hem pogut evitar marcar la situació hipotètica de l'estructura circular de la qual encara es conserven les restes al lateral nord de l'edifici. Avui en dia situada mig a l'exterior, i mig a sota del mur del transsepte nord de la catedral actual, possiblement havia quedat totalment a l'exterior de l'edifici anterior. S'obre la porta a una sèrie d'hipòtesis sobre la seva funció. En tot cas, des del punt de vista tècnic, l'únic element que es pot aportar amb certesa és que el gruix del seu mur seria suficient per poder elevar una estructura d'una certa alçada, potser fins a tres o quatre pisos – tot recordant que, també a Sant Serni de Tavèrnoles, existeix fins als nostres dies el campanar del temple romànic i que és de planta circular.

5. Conclusions

En aquest estudi, vam començar per plantejar en quin moment es van produir les tres tipologies de deformació observables en l'edifici de la catedral de la Seu d'Urgell. D'una banda, s'ha pogut comprovar emprant un model computacional que la proporció molt alta i relativament estreta de la nau central augmenten el risc d'una deformació de la volta de canó de la nau central, cosa que era una característica integrant de l'estil romànic. Davant d'aquesta situació, la presència de les naus laterals i de les seves arcades resulta primordial per assegurar l'estabilitat

del conjunt. Tot i això, sens dubte es van produir ja algunes deformacions al centre de la nau amb un moviment cap a baix a l'alçada de l'arc toral central, acompanyat per moviments laterals cap enfora dels laterals de la nau. La resposta dels constructors va consistir en l'aplicació de reforços laterals als dos costats exteriors de la nau, emprant estils i materials propers a la resta de l'edifici. Possiblement, aquests reforços ja es van fer abans de finals de l'obra.

Pel que fa a la deformació de l'eix central, aquest s'explica en part si fem la hipòtesi de la implementació d'un sistema de construcció del nou edifici mentre l'anterior encara estava parcialment dempeus. Aquest sistema tindria l'avantatge de permetre la continuació del culte al llarg dels noranta anys de construcció. Amb tot, el fet d'haver d'iniciar la construcció la nova façana principal oest al peu de la nau abans d'haver procedit a demolir la nau de l'edifici existent complicaria especialment l'emplaçament dels seus fonaments per manca d'una línia de vista ininterrompuda amb l'absis nou. Addicionalment, una lleugera desviació cap al sud de la línia medial de l'edifici existent hauria provocat la mateixa desviació de l'eix medial de la nova nau. Així, s'explicaria la divergència entre aquest eix i l'orientació del transsepte i absis de la nova catedral.

De la mateixa manera que altres autors, sembla que ens hem de decantar per l'existència de, pel cap baix, dos períodes distints del procés de construcció: el primer durant el qual serien els mateixos canonges especialitzats qui s'encarregaven de la seva projecció i construcció. Sens dubte, comptaven si més no parcialment amb els consells tècnics o òdhuc la participació activa d'externs estrangers. Durant el segon període, apareixeria la figura de l'*operarius*, conegut documentalment com en Raimon Lambard, que «conclou» les parts altes en un estil més simple. No es pot excloure l'existència d'altres períodes o organitzacions entremig del període inicial i del final.

La impressió que es desprèn de l'existència de diverses fases és que els constructors de la catedral van haver de modificar els plans originals en diferents moments, ja durant la construcció. En aquest estudi, ens hem centrat en les modificacions causades per motius tècnics, com ara els reforços de les laterals de les naus. Sens dubte, també

van existir altres modificacions provocades per altres consideracions, com ara les econòmiques o bé l'ús social de l'edifici?. En aquest sentit, podem destacar l'adequació de l'espai damunt de la nau lateral nord. Tot i que l'afegit d'una mica de pes i d'unes arcades suplementàries haurà ajudat a assegurar l'estabilitat del conjunt, cal recordar que els constructors disposaven d'altres recursos possibles per ajudar a disminuir les deformacions de la volta, com podrien ser uns contraforts. Així, aquest espai no pot respondre a motius arquitectònics, o si més no, no hi pot respondre de manera exclusiva.

De la mateixa manera, es podria discutir sobre la funció de les dues torres octogonals al peu de la nau. Per la seva forma i emplaçament, poden servir tant per les escales de pujada a les parts superiors de les naus, com també com a mecanisme de consolidació del peu de la nau mitjançant el seu pes. S'observen construccions semblants a l'església de Santa Maria de Ripoll i a Sant Serni de Tolosa. En aquest últim cas, com també a la Seu, es planteja el dubte per què no es va prosseguir la construcció vertical. Queda clar que, tan sols amb una alçada equivalent a aquella de la nau central, les torres existents ja complien amb la funció purament tècnica de suport de la nau. Tot i això, no ens podem deslliurar de la sospita que l'harmonia de la construcció es va sacrificar per motius aliens a la tècnica, possiblement econòmics.

Finalment, cal fer un breu esment del passat geològic de la regió. Es coneix la influència nefasta que van tenir els terratrèmols sobre els edificis al llarg dels segles, i especialment la de la sèrie del segle 15 que va afectar Sant Serni de Tavèrnoles, possiblement l'any 1428 [TUR]. Aquests moviments sísmics també es devien ressentir a la Seu d'Urgell, distant tan sols d'uns pocs quilòmetres d'Arcavell. Van afectar l'estructura de la catedral, i en quina mesura? Partint d'una situació en què la nau central ja devia tenir les deformacions que hem descrit, seria plausible que afectessin negativament els elements ja fragilitzats, augmentant els desplaçaments dels arcs fins a prendre la posició força desviada que ocupen actualment. També es pot proposar que el reforç únic del costat del claustre de la nau s'hagi instal·lat en aquell moment, en resposta a un moviment del conjunt de la volta. Tot i això,

la manca de documentació tan escrita com d'altres evidències no ens permeten tenir una visió clara de l'afectació que pugui haver tingut l'edifici de la catedral en aquelles circumstàncies imprevistes pels seus constructors.

Referències

- [ALL] ALLEN, P.K., TROCCOLI, A., SMITH, B., STAMOS, I. & MURRAY, S. (2003) The Beauvais Cathedral Project. *2003 Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshop*. IEEE, p. 10.
- [AUG] AUGÉ I MARTÍNEZ, O., GASCÓN I CHOPO, C. (2016) Muralls medievals de la Seu. Una aproximació des de l'arqueologia. *Interpontes. Annals de l'Institut d'Estudis Comarcals de l'Alt Urgell*, (4), p. 45–72.
- [BOT] BOTO VARELA, G. (2017) Morfogénesis arquitectònica i organització de los espacios de culto en la catedral de la Seu d'Urgell. La iglesia de Santa María (1010-1190). *Materia y acción en las catedrales medievales* (ss. IX-XIII), Bar Publishing.
- [CAR] CARRERO SANTAMARÍA, E. (2010) La Seu d'Urgell, el último conjunto de iglesias. Liturgia, paisaje urbano y arquitectura. *Anuario de Estudios Medievales (AEM)* 40/1, enero-junio, p. 251–291.
- [COS] COSTA I JOVER, A. *Análisis del proceso de construcción-deconstrucción de la catedral de Tortosa*. Tesis doctoral, Universitat Rovira i Virgili, 2016.
- [DHO] DHOND, G. (2004) *The Finite Element Method for Three-Dimensional Thermomechanical Applications*. John Wiley & Sons.
- [DIC] Diccionari.cat, Grup Enciclopèdia Catalana, entrada escoliosi. Data de consulta: 20.12.2021
- [DUR] DURAN I PORTA, J. Sobre l'origen de Raimon Lambert, obrer de la catedral d'Urgell, *Locus Amoenus* 8, 2005-2006. p. 19–28.
- [EDU] Edumine. *Rock Types and Specific Gravities*. URL: <https://web.archive.org/web/20170831000357/http://www.edumine.com/x toolkit/tables/sgtables.htm> Data de consulta: 26.12.2021
- [GAS] GASCÓN CHOPO, C. (2015) *La catedral saquejada*, Ed. Salòria.
- [GIR] GIRESINI, L.; BUTENWEG, C.; ANDREINI, M.; DE FALCO, A. & SASSU, M. (2014) Numerical calibration of a macro-element for vaulted systems in historic churches. In *Proceedings of the 9th international conference on structural analysis of historical constructions*, Mexico City.
- [HUE] HUERTA, S. & LÓPEZ, G. (1997) Stability and consolidation of an ashlar barrel vault with great deformations: the church of Guimarei. *Transactions on the Built Environment*, 26. WIT Press, p. 557–596.
- [LLU] LLUIS I GINOVART, J.; COSTA JOVER, A. & COLL PLA, S. La reconstrucció de un palimpsesto romànic mediante técnicas no destructivas, *Informes de la Construcción*, 66, 536, e045, octubre-diciembre 2014. doi: <http://dx.doi.org/10.3989/ic.13.184>
- [OBI] OBIOLS I PERARNAU, LL. (2014) Les restauracions de la catedral de la Seu d'Urgell, *Frontissa*, 28, desembre, p. 3.
- [PUI] PUIG I CADAVALCH, J. (1918) *Santa Maria de la Seu d'Urgell*, Barcelona.
- [SAN] SÁNCHEZ I MÁRQUEZ, C. El perfil del operari i la administració de la obra en las catedrales hispanas (siglos XII-XIII), *Anuario de Estudios Medievales*, 50/1, enero-julio de 2020, p. 443–471.
- [TUR] TURU I MICHELS, V. I GASCÓN CHOPO, C. (2010) Pont trencat: La seqüència sísmica de 1427-1428 a la Vall de Valira. *Interpontes. Annals de l'Institut d'Estudis Comarcals de l'Alt Urgell*, (1), p. 209–230.
- [VIL] VILLARÓ, A. (1995) *Hèrcules i la ciutat*, Ed. Caixa de Catalunya.