



Universitat de Girona
Escola Politècnica Superior

Projecte/Treball Final de Carrera

Estudi: Arquitectura Tècnica

Títol:

ANÀLISI ESTRUCTURAL DE VOLTES CERÀMIQUES
I PATOLOGIES DE L'ESGLÉSIA DE SANT NARCÍS

Document: MEMÒRIA

Alumne:

AMÈLIA QUINTANA MATAMOROS
ALBA ROMAGÓS AIRA

Director/Tutor: MIQUEL LLORENS SULIVERA

Departament: EMCI

Àrea: Mecànica de medis continus i teoria de les estructures

Convocatòria: Juliol de 2008



0. ÍNDEX

1. OBJECTIUS	pàg.1
A. ANTECEDENTS	pàg.2
B. OBJECTE	pàg.2
C. ABAST	pàg.3
 2. INTRODUCCIÓ	 pàg.4
A. INTRODUCCIÓ HISTÒRICA - SOCIAL	pàg.6
1. El barri	pàg.6
2. Imatges de l'època	pàg.12
 B. INTRODUCCIÓ TÈCNICA	 pàg.14
1. Les voltes de l'església	pàg.14
2. Anàlisi límit de l'estructura de fàbrica	pàg.26
 3. ESGLÉSIA	 pàg.33
A. GENERALITATS	pàg.36
1. Situació	pàg.36
2. Composició	pàg.36
3. Plànol de situació	pàg.38
4. Plànol d'emplaçament	pàg.39
 B. AIXECAMENT	 pàg.40
1. Metodologia i procés	pàg.40
2. Fotografies	pàg.42
3. Plànol planta baixa	pàg.45
4. Plànol planta cor	pàg.46
5. Plànol secció longitudinal 1	pàg.47
6. Plànol secció longitudinal 2	pàg.48



7. Plànol secció transversal	pàg.49
8. Façana principal	pàg.50
9. Façana lateral	pàg.51
10. Vista isomètrica 1	pàg.52
11. Vista isomètrica 2	pàg.53
12. Vista isomètrica 3	pàg.54
 C. ANÀLISI CONSTRUCTIU	 pàg.55
1. Unitats constructives	pàg.55
2. Procés constructiu	pàg.64
3. Fotografies	pàg.67
4. Detalls constructius	pàg.68
 D. PATOLOGIES	
1. Introducció	pàg.74
2. Patologia “1”	pàg.74
3. Patologia “2”	pàg.77
4. Patologia “3”	pàg.79
5. Patologia “4”	pàg.80
6. Patologia “5”	pàg.81
7. Patologia “6”	pàg.83
8. Patologia “7”	pàg.85
9. Pressupost reparació	pàg.90
10. Plànols patologies	pàg.91
 4. ANÀLISI ESTRUCTURAL	 pàg.97
A. ESTAT DE CÀRREGUES – MÈTODE DE CÀLCUL	pàg.101
1. Dades de la volta	pàg.101
2. Hipòtesi de càrrega	pàg.102
3. Desenvolupament del càlcul	pàg.105



B. CONSTANTS DE CàLCUL	pàg.107
1. Materials utilitzats en la construcció	pàg.107
2. Comportament de la fàbrica de ceràmica	pàg.109
 C. DESENVOLUPAMENT DEL CàLCUL	pàg.113
1. Introducció al mètode d'anàlisi	pàg.113
2. Introducció a l'anàlisi estàtic lineal	pàg.117
3. Anàlisi estàtic lineal de la volta - <i>shell 63</i>	pàg.118
4. Anàlisi estàtic lineal de la volta - <i>solid 45</i>	pàg.143
5. Anàlisi estàtic lineal de la cúpula - <i>shell 63</i>	pàg.157
6. Anàlisi estàtic lineal de la cúpula - <i>solid 45</i>	pàg.170
7. Introducció a l'anàlisi estàtic no lineal	pàg.176
8. Anàlisi estàtic no lineal de la volta – <i>solid 45</i>	pàg.178
9. Anàlisi de la patologia del pilar	pàg.190
 D. INTERPRETACIÓ DELS RESULTATS	pàg.197
1. Introducció	pàg.197
2. Tipologia d'element	pàg.197
3. Tipologia d'anàlisi	pàg.200
4. Tipologia de volta	pàg.201
5. Pilar pedra artificial	pàg.201
 5. CONCLUSIONS	pàg.202
 6. BIBLIOGRAFIA	pàg.203
 7. AGRAÏMENTS	pàg.205



1. OBJECTIUS

1.1. Antecedents	pàg.2
1.2. Objecte	pàg.2
1.3. Abast	pàg.3

1. OBJECTIUS

1.1. ANTECEDENTS

Històricament, el sector de la construcció ha estat el centre de les activitats quotidianes del que entenem per civilització. La construcció és una activitat molt habitual en la societat i per aquest motiu podríem pensar que coneixem el comportament estructural de qualsevol edifici. Però això no és així, sobretot en el cas de construccions que tot i ser antigues no han arribat a ser prou emblemàtiques per que algú es decideixi analitzar-les. Aquest és el cas en que es troba la volta de quatre punts, una volta de maó de pla desenvolupada per l'arquitecte gironí Ignasi Bosch, que sorprèn per la seva gran lleugeresa i la demostrada resistència a compressió.

Des d'antic les aproximacions al càlcul de les voltes han estat moltes i variades, i la conclusió encertada a la que s'ha arribat amb el pas del temps, és que aquests elements mantenen la seva estabilitat gràcies a un correcte traçat de la seva geometria. Malgrat això, l'arquitecte Ignasi Bosch afirmà que aquestes teories de càlcul no eren aplicables a la seva tipologia de voltes, ja que la forma de treball és diferent¹.

1.2. OBJECTE

Tot i que en un principi la fi principal es centrava en l'estudi d'una volta de quatre punts situada en algun edifici dissenyat per Ignasi Bosch, l'elecció de l'església de Sant Narcís com edifici objecte del treball va conduir a adoptar, a més de la volta de quatre punts, una segona tipologia de volta de maó de pla utilitzada per l'arquitecte, la cúpula semiesfèrica.

L'objecte d'aquest treball contempla, doncs, la modelització de les dues tipologies de voltes, situades a l'església de Sant Narcís de Girona, amb la finalitat d'establir un model de mesura i estudi aproximat de la seva capacitat portant.

¹ Bosch, Ignasi, 1949.

Tanmateix, a mesura que s'ha avançat en l'estudi s'ha cregut oportú aprofundir en tot allò que envolta l'edifici, amb la fi de completar aquest estudi.

1.3. ABAST

L'abast del projecte es pot dividir en tres grans blocs:

- Pel que fa a les bases: es desenvolupa l'origen tècnic i històric d'aquestes voltes i del barri de Sant Narcís, dos conceptes molt relacionats entre sí.
- Pel que fa a la composició de materials i elements: es duu a terme un anàlisi constructiu i patològic que defineix les característiques, ordre i deficiències de diferents elements i materials que formen part de l'edifici.
- Pel que fa al càlcul estructural: es realitzen diferents modelitzacions d'una de les voltes de quatre punts i de la volta semiesfèrica, ambdues situades a l'església de Sant Narcís, amb la fi de verificar i trobar el model més apropiat per dur a terme un anàlisi, mitjançant el programa de càlcul ANSYS.

Es tindran en compte diferents paràmetres i tipologies d'anàlisi, que es descriuran en el capítol corresponent. L'anàlisi de la volta de quatre punts escollida es durà a terme en base a la suposició de treball que promulgà l'autor de l'obra, l'arquitecte Ignasi Bosch.

En el càlcul estructural també es contempla una demostració de les causes que condueixen a la deformació dels pilars de pedra artificial.



2. INTRODUCCIÓ

A. INTRODUCCIÓ HISTÒRICA SOCIAL	pàg.6
1. El barri	pàg.6
1.1. Situació geogràfica	pàg.6
1.2. Situació històrica	pàg.6
1.3. Model urbanístic adoptat	pàg.7
1.3.1. El model alemany	pàg.7
1.3.2. El model d'ordenació de les ciutats-jardí	pàg.8
1.4. L'estat espanyol	pàg.8
1.5. Construcció del grup	pàg.9
1.5.1. Concessió de l'habitatge social	pàg.9
1.5.2. Expropiació i finançament	pàg.9
1.5.3. Amortització	pàg.10
1.5.4. Materials	pàg.10
1.6. Ordenació del barri	pàg.10
1.7. Política urbanística actual del barri	pàg.11
2. Imatges de l'època	pàg.12
B. INTRODUCCIÓ TÈCNICA	pàg.14
1. Les voltes de l'església	pàg.14
1.1. Origen de les voltes utilitzades en l'església	pàg.14
1.1.1. Origen de la volta de quatre punts	pàg.14
1.1.2. La cúpula	pàg.19
1.2. Geometria	pàg.19
1.2.1. La volta de quatre punts	pàg.19
1.2.2. La cúpula	pàg.21
1.3. Procés constructiu de la volta de quatre punts	pàg.22
1.4. Fotografies construcció volta quatre punts	pàg.24



2. Anàlisi límit de l'estructura de fàbrica	pàg.26
2.1. Algunes consideracions	pàg.26
2.2. L'arc de dovelles	pàg.27
2.3. Anàlisi d'edificis de fàbrica	pàg.28
2.4. Manteniment dels edificis de fàbrica	pàg.28
2.5. Puntualitats de diferents conceptes	pàg.31



A. INTRODUCCIÓ HISTÒRICA SOCIAL

1. EL BARRI

El barri de Sant Narcís, també conegut amb el sobrenom de *cases barates*, és un dels més singulars dels que conformen l'àrea urbana del municipi de Girona. El terme de *cases barates* procedeix, segons explica Rosa M. Fraguell¹, del concepte de ciutat jardí (iniciat en el segle XIX pel socialisme utòpic anglès). Aquesta tipologia de vivendes van ser promogudes a partir del 1911, quan s'aprovà una llei espanyola que les regulava com a solució als grans problemes de vivenda que patien les classes populars.

Aquest ideal cristal·litzà en la fórmula de la caseta i l'hortet, popularitzada per Macià, i fou introduïda de nou pels falangistes que incentivaren barris nous en tota Espanya amb les mateixes característiques: casetes unifamiliars d'una o diverses plantes, amb jardí propi, realitzades amb materials pobres dins un marc urbà de baixa densitat i amb espais verds comuns.

1.1. SITUACIÓ GEOGRÀFICA

El barri de Sant Narcís es troba situat geogràficament al sud oest del municipi de Girona; delimitat per l'antic ferrocarril Girona - Olot, la carretera de Santa Coloma, el riu Güell i el viaducte del ferrocarril Madrid - França. Tot i que quan s'ideà quedava a les afores de la ciutat, el creixement experimentat per Girona en les últimes dècades ha causat que avui dia es trobi enclavat al mig de la ciutat. Aquesta situació i l'aspecte físic característic que presenta, doten al barri d'un caire emblemàtic.

1.2. SITUACIÓ HISTÒRICA

Tal i com ja s'ha introduït, a finals de la segona meitat del segle XX, Espanya patia grans dèficits de vivenda provocats per diverses situacions, les més problemàtiques eren:

¹ Fraguell, 1988.



- En la dècada dels 40 Espanya acabava de sortir de la seva Guerra Civil, si a aquest fet li sumem les pèrdues degudes a les inundacions que va patir Girona el 17 i 18 d'octubre del 1940 es pot deduir que hi havia un gran dèficit de vivendes.
- La situació financera de l'estat no era bona, i el preu de la vivenda, tant de lloguer com de compra, era altíssim.
- A partir de la segona meitat del segle XX, s'inicia una nova etapa en el creixement urbà, augmenta l'ús de l'automòbil, es produeix una dispersió urbana en els municipis amb funció bàsicament residencial

Per sortir de la crisi de la Postguerra faltava inversió i el dèficit de vivenda era un gran problema, així doncs l'estat va decidir invertir-hi. D'aquesta manera es creen diversos organismes públics com "El Instituto Nacional de la Vivienda y la Obra Sindical del Hogar", que juntament amb el "Ministerio de la Vivienda" creen habitatges de preu baix (habitatges socials o de renda limitada).

1.3. MODEL URBANÍSTIC ADOPTAT

Pel que fa l'aspecte extern de les vivendes i la fisonomia del barri, un se'n adona ràpidament que la disposició i forma no són aleatòries, sinó que provenen d'un model racional. Aquest model és fruit de la mescla de dos corrents urbanístics que es donaren entre el segle XIX i XX, el nacionalsindicalista alemany i la ciutat-jardí de Howard.

1.3.1. El model alemany

Durant la segona meitat del segle XX començaren a aparèixer a Alemanya els primers habitatges socials, anomenats *sidelungs*.

Els *sidelungs* o barris socials s'estructuraven en fileres, entre les quals s'hi solien deixar espais amb la fi de hi toqués millor el sol. Les façanes d'aquestes vivendes es projectaven de forma senzilla i sòbria, procurant que formessin part del conjunt de la filera i evitant que semblessin una unitat diferenciada. Aquests habitatges es disposaven al voltant d'una plaça central quadrada, amb un dels extrems amb forma de semicercle que formava el nucli central del barri. Al voltant d'aquesta plaça s'hi

solien alçar els edificis oficials, els de més pes i rellevància com eren l'església o "El Hogar del Productor". També era habitual que es dissenyessin alguns carrers estrets a l'interior del barri que contrastaven amb els carrers més amples.

El model alemany no va seguir la política de construcció d'habitatges socials amb dimensions mínimes, ja que qüestionava la falta d'higiene i la impossibilitat de separar els inquilins segons el sexe; d'aquesta manera s'evitava la construcció de barris residencials amb cases reduïdes destinades a les famílies necessitades, sinó que es formaven barris on hi havia diversitat de classes socials.

1.3.2. El model d'ordenació de les ciutats-jardí

Aquesta idea d'estructuració racional de les ciutats enjardinades nasqué a mitjans del segle XIX. Amb ella es buscava planificar ciutats noves autosuficients, lluny dels nuclis urbans existents, amb vivendes unifamiliars, jardins propis i espais verds comuns per mantenir una baixa densitat de població, situant les zones industrials a la perifèria, per on hi passaria el ferrocarril.

Tot i que durant les primeres dècades el barri estudiat conservà aquestes característiques, actualment el Grup Sant Narcís respon ben poc a la idea de ciutat-jardí que proposà Howard, ja que ha passat a formar part del centre urbà, deixant de funcionar com a "ciutat dormitori".

1.4. L'ESTAT ESPANYOL

Un cop finalitzada la Guerra Civil i iniciat el Règim Franquista, a Espanya s'utilitzà l'arquitectura com a mitjà de propaganda. Seguint l'exemple d'Alemanya, es dissenyà una arquitectura monumentalista, que des d'un punt de vista social i polític no es mostrà favorable a la reconstrucció de grans barriades obreres i sí a barrejar les classes obreres i mitjanes en barris de cases barates.

Tot i així, el que no va poder evitar el govern franquista fou adoptar una construcció de caire ruralitzada ja que existia un gran dèficit de materials de construcció, com el ferro i el formigó. D'aquí nasqué la necessitat de construir barris socials en el que les voltes



de maó de pla eren molt habituals, ja que és una estructura lleugera, de fàcil muntatge i que permet el reciclatge d'altres materials.

1.5. CONSTRUCCIÓ DEL GRUP

D'aquest conjunt de situacions nasqué el barri de Sant Narcís a finals de la dècada dels 40. Si bé en un principi es trobava enclavada al mig del camp, a les afores de Girona i a mig camí de Salt, actualment la seva situació és privilegiada, ja que és el barri residencial més cèntric de la ciutat. Tot i que la situació que s'escollí en part era deguda al model de ciutat-jardí, la causa principal de l'elecció de la mateixa fou el baix cost dels terrenys rústics, amb el que s'aconseguia abaratir el preu final del producte.

Ignasi Bosch i Reitg fou l'arquitecte encarregat de projectar el barri. Amb el seu treball reflectí els ideals de la tendència de les ciutats-jardí mesclats amb les premisses del govern espanyol, que volia aconseguir un resultat similar al del govern Alemany. L'avantprojecte inicial del conjunt s'elaborà l'octubre de 1942, però no fou fins al 1947 que quedà aprovat. En aquest, es preveia la construcció d'uns 500 habitatges distribuïts en una superfície aproximada de 140.000 m².

1.5.1. Concessió de l'habitatge social

La distribució de l'habitatge entre la població es va realitzar sense distinció de classe social amb la fi d'evitar un barri marginal; és per aquest motiu que no podem parlar d'un barri uniforme, tant des del punt de vista morfològic, com del social. Es realitzaren diferents models de vivendes i pisos, que responien a les necessitats i poder adquisitiu de tota la societat, amb el que es planificaren tres categories d'habitatges: els de la primera superaven els 120 m², els de la segona els 90 m², i els de la tercera el 70 m².

1.5.2. Expropiació i finançament

L'expropiació no fou fàcil degut a que els terrenys eren propietat de diferents terratinents amb molta influència en els estaments locals; aquest fet va portar a reduir 50.000 m² de superfície reservada inicialment per la construcció del grup.



En quan al finançament² l'obra quedà finançada en un 44,7% per un préstec sol·licitat a la Caixa Postal i d'Estalvis de caràcter estatal, amb un interès del 4% anual. Un altre 44% es va finançar per l'Obra Sindical del Hogar mitjançant el Instituto Nacional de la Vivienda, i el 1,3% restant s'aconseguí directament de la prestació dels beneficiaris

1.5.3. Amortització

Com és propi dels habitatges de protecció oficial, els lloguers o les amortitzacions foren força baixos, ja que el període de duració de l'amortització eren llargs. D'aquesta manera, els habitatges es pagaren en 40 anys, dividits en dos períodes de 20 anys.

Posteriorment, amb la mort del general Franco l'any 1975 el govern de transició promogué la dissolució de l'Organització Sindical, comportant en sí la liquidació de comptes pendents i l'anticipació de l'amortització que restava a cada titular.

1.5.4. Materials

L'escassetat de materials determinà la construcció dels edificis del barri. En aquella època disposar d'acer era gairebé un luxe, i el que es podia aconseguir era de mala qualitat. El formigó estava poc desenvolupat i es fabricava sense armar. Degut a aquesta situació el material principal en la construcció d'aquell moment era el maó ceràmic, el 4x14x29 foradat per fer-ne les voltes, el 5x14x29 en la formació de parets dobles parets exteriors i envans interiors, el totxo massís de 5x14x29 per anar vist en parets d'obra vista, la teula àrab en la formació de cobertes, el paviment de gres de 25x25x2, i el totxo massís de 2,5x14x28 en baranes.

1.6. ORDENACIÓ DEL BARRI

La disposició del barri és regular ortogonal, amb carrers rectilinis i encreuats en angle recte, que parteixen de forma concèntrica de la plaça Assumpció. Aquesta àrea central comprèn la rambla Catalunya, la plaça de l'Assumpció, l'avinguda de la Hispanitat, l'Església, la plaça principal, els petits comerços i "El Hogar el Productor"(centre de

²Fraguell, 1988.

reunió). Els carrers principals que formen el barri són l'avinguda Sant Narcís, la rambla Catalunya i Ntra. Sra. De la Salut; mentre que els secundaris són estrets i no permeten un doble sentit de circulació.

Les edificacions es situen a cada banda dels carrers, amb diferents tipologies de vivendes. La majoria de les cases van adossades i estan compostes per planta baixa i planta pis, tot i que també trobem cases de tres plantes o blocs de pisos. Encara que des de l'exterior dels habitatges s'hi disposessin columnes i motllures de caràcter monumentalista, a l'interior predomina la senzillesa de la construcció.

1.7. POLÍTICA URBANÍSTICA ACTUAL DEL BARRI

L'ajuntament de Girona és conscient del gran valor urbanístic que té el barri, i així ho fa patent en el seu Pla General d'Ordenació Urbana, on determina que aquesta zona del sòl urbà és objecte d'una especial preservació i protecció, i que per les seves particularitats ha de ser ordenada i regulada amb uns paràmetres específics i singulars segons les pròpies característiques que presenta.

Per tant, l'any 1993 s'aprovà un pla especial específic per aquest barri. Aquesta nova normativa permet la ubicació d'un garatge per a un vehicle per habitatge, i la creació d'un traster, fixant les dimensions màximes, el tipus de coberta, alçada i pendents d'aquestes construccions auxiliars.

També regula la subsanació de les instal·lacions inadequades, l'acceptació o no dels materials de les façanes, l'arbrat dels jardins privats i públics a conservar i les obres de rehabilitació, modificació i ampliació dels interiors dels habitatges. Pel que fa aquest últim punt, les ampliacions estan regulades, però no es posa gaires impediments pel que fa a les remodelacions interiors, sempre i quan no afectin a la configuració original de les façanes.

Podríem dir, per tant, que aquest pla especial permet i alhora regula l'adequació del usos i espais a les noves necessitats dels veïns del grup, respectant sempre la idea original i el caràcter inicial del grup.

2. IMATGES DE L'ÈPOCA



*FIG 1: Plaça de l'Assumpció en plena construcció. S'observa que encara mancava la urbanització dels carrers alhora que es comprova la precarietat dels mitjans auxiliars utilitzats en la realització de l'obra. Finals dels anys 40.
Font: Arxiu municipal de Girona*



FIG 2: Plaça de l'Assumpció en plena construcció, finals dels anys 40. S'observen els pilars de pedra que conformen la base sobre la qual es recolzen els arcs i les voltes dels porxos. Font: Arxiu municipal de Girona

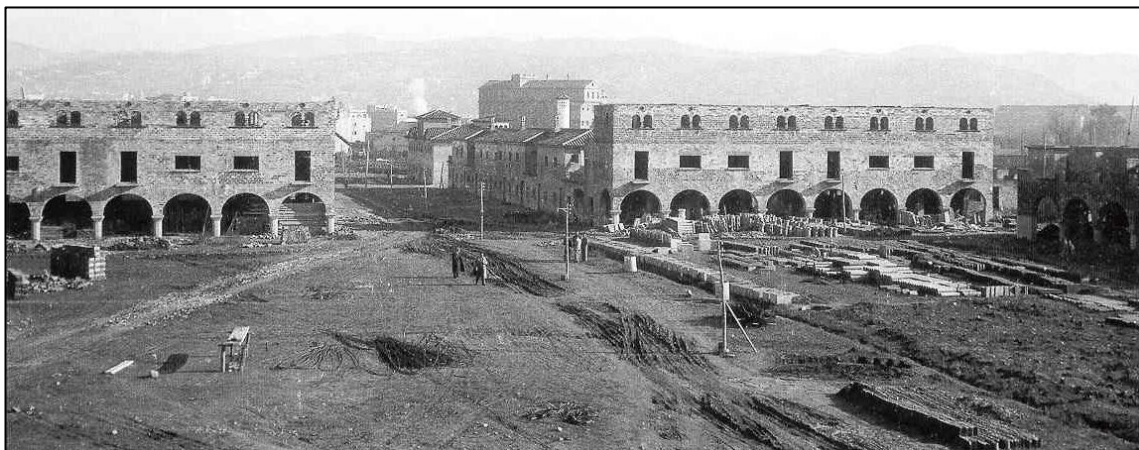


FIG 3: La fotografia està presa en la Plaça de l'Assumpció, en direcció Rambla Catalunya, finals dels anys 40. En la foto s'observa com es prioritza la construcció d'habitatges abans de la urbanització del barri. Font: Arxiu municipal de Girona

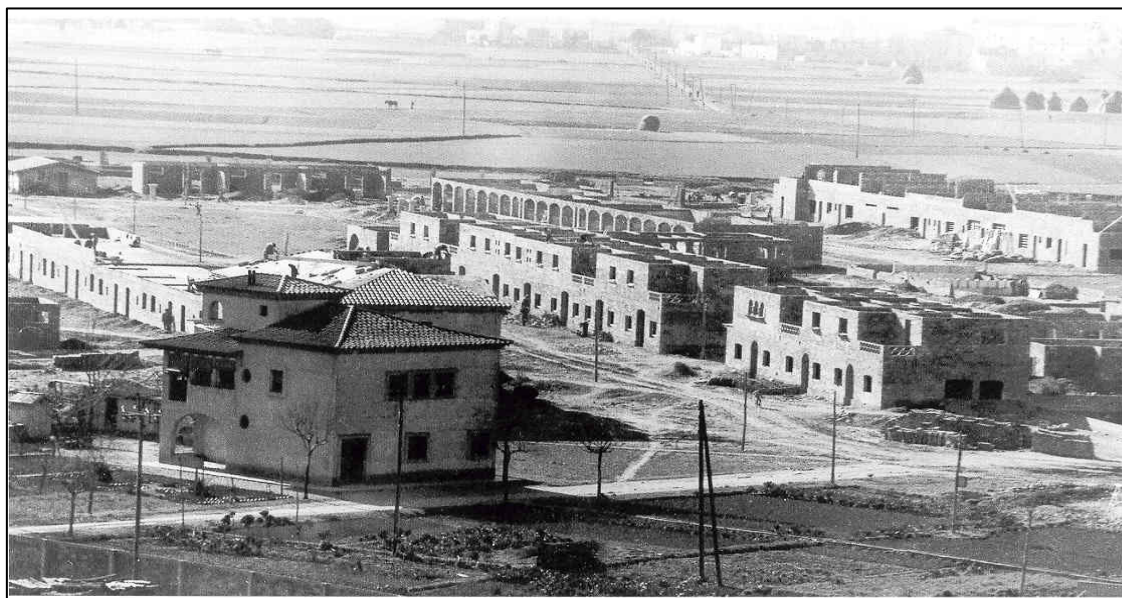


FIG 4: Vista general del barri de Sant Narcís, en plena construcció. En primer terme s'observa una casa senyorial ja construïda però avui dia inexistent, en segon terme un seguit de cases en construcció que conformarien la Rambla Catalunya. Més al fons hi ha la plaça Assumpció, amb els porxos en construcció que li conferiran la singularitat de plaça porticada. En la fotografia s'observa que en l'emplaçament actual de l'església hi existia una casa de planta baixa. Finals de la dècada dels 40. Font: Arxiu històric municipal de Girona.

B. INTRODUCCIÓ TÈCNICA

1. LES VOLTES DE L'ESGLÉSIA

1.1. ORIGEN DE LES VOLTES UTILITZADES EN L'ESGLÉSIA

En aquest apartat es desenvolupa l'origen de les dues tipologies de voltes objecte d'estudi, la de quatre punts i la semiesfèrica.

Tot i que en el primer apartat l'explicació fa referència al desenvolupament de la volta de maó de pla en forma de quatre punts, en el segon tan sols es desenvolupa la cúpula en general, ja que l'adaptació d'aquesta en maó de pla és un cas molt puntual que no ha tingut gaire rellevància en la resta de construccions.

1.1.1. Origen de les volta de quatre punts

a) El precedent: la volta catalana

L'origen de la volta catalana és un fet incert; tanmateix hi ha dues grans hipòtesis: la primera, defensada per Choisy, atribueix l'inici a la tècnica dels romans; la segona, exposada per Joan Bergós, defensa el seu origen en la cultura constructiva medieval, ja que no existeix cap edifici anterior al 1400 que verifiqui l'anterior hipòtesi¹.

Un dels estudis que treballa sobre la hipòtesi medieval, realitzat per Joan Bassegoda, cita que la primera referència arquitectònica que es té d'aquesta volta és la capella del Rei Martí l'Humà (Catedral de Barcelona, any 1407), tot i que actualment queda tapada per un sostre fals de guix. Posterior a aquesta, entre el 1415 i el 1420, trobem la sala capitular del monestir de Pedralbes.

Pel que fa a l'evolució de la volta catalana com a element constructiu, cal remarcar l'expansió que es produí a França a partir del 1700, quan a arrel del Tractat dels Pirineus molts mestres catalans quedaran a la part francesa i reproduïren en la nova regió el que havien après anteriorment. Aquest fet queda constatat en nombrosos

¹ Truñó, Ángel, 2004.

textos històrics, i és degut als grans avantatges econòmics i tècnics que aportava la volta catalana.

Aquests textos valoren molt positivament el sistema estructural de la volta: facilitat d'execució, resistència i sobretot la lleugeresa, que permetia reduir els murs per contrarestar l'empenta. El text més rellevant és el de Fray Lorenzo de San Nicolás² (1633) que aportà unes normes de proporcions per al càlcul dels estreps.

En la segona meitat del segle XIX s'intensificà la construcció de la volta catalana degut a una creixent industrialització i una descoberta constant de nous materials. A Catalunya es feren nombroses edificacions amb volta catalana, aglomerats hidràulics i materials ceràmics de primera qualitat que permetia aixecar-les d'una forma ràpida, eficaç i amb una esveltesa mai aconseguida, habilitat pròpia dels mestres d'obra catalans que donà origen al nom utilitzat.

A finals del segle XIX, a través de l'Escola d'Arquitectura de Barcelona i de les aportacions del seu professorat, es despertà en l'alumnat l'inquietud per l'estudi, càlcul i utilització de les voltes de maó de pla. Un dels personatges que destacà en aquell moment fou Rafael Guastavino. L'any 1881 emigrà a Nova York i amb el temps arribà a fundar la R.Guastavino Company, amb la que, aplicant la tècnica de la volta de maó de pla, arribà a construir més de 1000 edificis. Entre les obres més destacades hi ha la volta de 29,9 metres de llum que cobreix el creuer de la catedral presbiteriana de St. John the Divine, a Nova York.

A principis del segle XX, la tècnica de la volta de maó de pla passa a formar part del repertori més expressiu dels arquitectes modernistes catalans; una gran quantitat de formes arquitectòniques modernistes són conseqüència directa d'aquesta tècnica. Cal destacar l'obra de Gaudí, que utilitzà el procediment de la volta catalana per crear voltes amb forma parabolòide.

² Lorenzo de San Nicolás, Fray (1633). *Arte y Uso de la Arquitectura*.

b) El pas de la volta catalana a la de quatre punts

Cap a mitjans del segle XX, es realitzaren diferents estudis i publicacions sobre les voltes de maó de pla. En un moment en que la construcció travessava molt inconvenients a causa de la crisi dels materials, especialment del ciment pòrtland i el ferro, es buscaren solucions més racionals, econòmiques i sòlides, tenint com a base les construccions tradicionals. Entre aquests estudis destacà el fet per l'arquitecte Ignasi Bosch i Reitg, que es centrà en la tipologia de les voltes de quatre punts, un sistema més econòmic, lleuger i estructuralment resistent que la seva predecessora.

Tanmateix, un cop arribat a aquest punt, cal definir amb certa exactitud els diferents conceptes als quals ens referim, per tal de no confondre'ls:

- Anomenem volta catalana a la formada per maons col·locats de pla, uns a continuació dels altres, en tota la seva curvatura i en diferents gruixos o doblats. El primer gruix sol ser de rajola prima, es col·loca amb morter de guix o de ciment ràpid, i els altres successius, amb morter de ciment lent o pòrtland. Entre les diferents capes o gruixos de la volta hi ha una discontinuïtat completa de juntes, amb el que es crea una estructura semblant a la d'una closca elàstica, on els seus elements treballen a tracció i a compressió.
- Quan ens referim a volta de maó de pla ens centrem en un tipus de volta catalana, aquella que només disposa d'un sol gruix de maó foradat. Cal ser molt curós amb la diferenciació de les dues tipologies ja que les conseqüències de fer tan sols el senzillat, són molt diferents a les de realitzar senzillat més doblat.³

Ignasi Bosch apostà per les voltes de maó de pla d'un sol gruix, però quins avantatges aportava aquesta respecte les que s'havien estat utilitzant fins aquell moment?

- En primer lloc, que la volta tan sols disposi d'un sol gruix de rajol foradat, dóna una gran lleugeresa amb comparació a la seva predecessora. Abans es considerava que la capacitat resistent de la volta la donava el doblat. Tanmateix, sense el doblat, s'aconsegueix una gran reducció de tota l'estructura, és a dir, en disminuir el pes de la volta

³ Jordi Collell, Carles, 2005.

disminuïm les càrregues transmeses als pilars i parets de càrrega, i conseqüentment, la secció d'aquests elements.

- Una segon avantatge és la gran reducció de costos que comporta la simplificació de l'estructura, fet molt important en la postguerra, quan s'utilitzava la volta de maó de pla d'un sol gruix per a la construcció de grans barris de vivendes de protecció oficial.
- Finalment, cal considerar que la realització d'una sola fulla dota a l'estructura d'una senzillesa que la fa més fàcil de ser calculada i analitzada.

Per tant, si fins aquell moment es creia que el doblat donava a la volta la capacitat resistent, quin fou el argument que utilitzà l'arquitecte Ignasi per rebutjar aquesta suposició?

Ignasi defensava que el doblat de la volta tindria sentit si fos construïda amb rajola massissa, en forma d'arc parabòlic i carregués uniformement en tota la seva totalitat. Tot i així aquesta situació seria la ideal, ja que és fàcil que aquestes rebin una lleugera càrrega aïllada asimètrica.

L'arquitecte, a més, afirmà que el que realment dóna capacitat resistent a la volta és un major moment d'inèrcia⁴, i que per aconseguir-ho, igual que es fa en les estructures metàl·liques amb les gelosies, es pot obtenir amb els rajols de maó foradat en les voltes ceràmiques.

L'estudi que realitzà Ignasi Bosch el portà a determinar que les voltes de maó de pla extralleugeres que volia aconseguir no eren capaces de contrarestar les càrregues asimètriques amb el seu pes propi. Aquest problema, però, quedava resolt al passar de voltes d'una sola curvatura a voltes de doble curvatura o cupulars, on queden disminuïts els efectes de flexió degut a càrregues asimètriques i les possibilitats de vinclament.

La més simple de les voltes cupulars o de doble curvatura és la volta de quatre punts. La seva construcció parteix d'un cindri de fusta en forma d'arc rebaixat, a tall de

⁴Característica de la configuració d'un cos que s'expressa mitjançant la suma dels productes de les masses o superfícies dels seus elements pels quadrats de llurs distàncies a un eix de referència.

generador, que es va desplaçant recolzant els seus dos extrems sobre cintres d'iguals característiques, com es mostra a la figura.

Aquesta tipologia prové d'una volta esfèrica en la que s'han tallat amb plans verticals els casquets que sobresurten de la planta inscrita⁵. Els arcs frontals resultants tenen la mateixa forma que la generatriu.

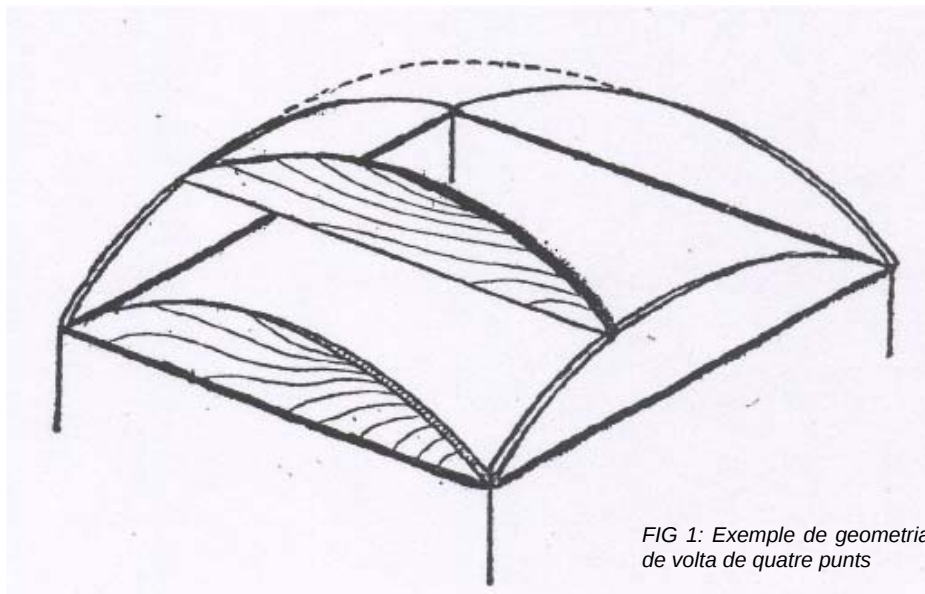


FIG 1: Exemple de geometria de volta de quatre punts

Un gran avantatge de les voltes de doble curvatura és que al concentrar les reaccions de recolzament sobre els quatre vèrtexs o angles de la planta es pot prescindir de les parets de càrrega i tan sols transmetre les càrregues a través dels pilars.

En les voltes de quatre punts es produeixen quatre empentes, en els punts de recolzament, que van dirigides segons la direcció de les diagonals de la volta. Per tal d'aconseguir travar la volta es col·loquen uns ferros que fan de tirants, seguint el seu perímetre. Normalment aquests queden amagats a l'envà situat just sota la volta, però si aquesta es recolza sobre pilars, el tirant quedarà ocult sobre la filada de la volta. D'aquesta manera es pot dir que la volta es pot construir sola i recolzada sobre quatre punts, i les jàsseres són, simplement, uns tirants perimetrals de trava.

⁵ És fàcil de confondre amb la volta de mocador, per la similitud de forma que presenten ambdues. La de mocador té com a base una cúpula rebaixada.

1.1.2. La cúpula

La construcció de la cúpula ha estat molt poc explicada. Hi ha hagut pocs escriptors que deixessin constància dels invents que es produïen en les construccions segons les necessitats que s'havien de resoldre. És cert que alguns autors que s'han dedicat a recollir-ne l'evolució, però ho han fet d'una forma general, justificant a grans trets la geometria de l'arquitectura. Aquest és un dels grans problemes a la hora de concretar-ne el seu origen.

La cúpula forma part d'un dels primers grans invents de l'home, sorgit de la necessitat de cobrir grans espais. Exactament no es sap quan s'inicià la construcció d'aquest element. És molt possible que abans de la cúpula que conté el Panteó d'Agripa, una de les primeres referències, haguessin existit construccions similars que fossin grans intermitjos en l'evolució d'aquests grans elements, però avui dia no n'existeixen restes; amb el que es considera el Panteó com un objecte únic en el seu temps i paradigma de totes les altres cúpules que es construïren posteriorment. D'altres exemples són l'Hagia Sofia, l'església de Santa Maria de la Flor o la basílica de Sant Pere del Vaticà.

1.2. GEOMETRIA

1.2.1. La volta de quatre punts⁶

Per tal de facilitar la descripció de la geometria de la volta de quatre punts, és convenient descriure alguns dels conceptes que s'utilitzaran en el desenvolupament d'aquest apartat:

- Arc generatriu o generador: és l'arc que pel seu moviment engendra un o més arcs. En aquest cas engendra un seguit d'arcs que formen la superfície de la volta.
- Arc directiu o director: és l'arc que determina les condicions de generació d'un altre arc. Sobre aquest es desplaça l'arc generatriu.
- Arc rebaixat: es caracteritza per la forma que dóna com a resultat que la fletxa sigui menor que la meitat de la llum. La seva forma és "aixafada", i

⁶ Àngel Truñó, 2004.

és l'adoptada pels arcs generatrius i directors que formen la volta de quatre punts o volta rebaixada.

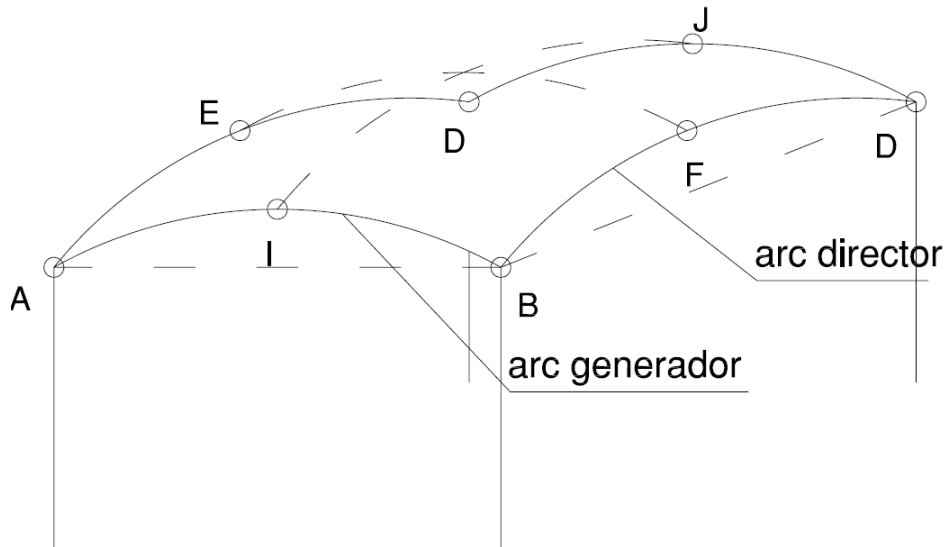


FIG 2: Detall isomètric de la volta de quatre punts

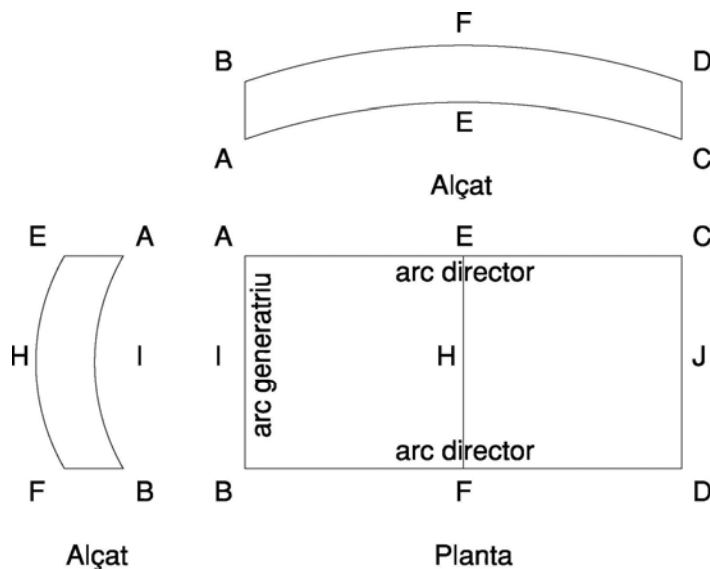


FIG 3: Detall de la generació de la volta de quatre punts

En la volta de quatre punts, la superfície es genera a partir del desplaçament d'un arc generador (AIB), sobre dos arcs directors (BFD).

Per determinar la fletxa dels arcs directors i generador, es procedeix a mesurar la longitud de la llum de l'arc diagonal en planta; aquesta es divideix entre 10 parts per obtenir la fletxa de l'arc diagonal. Aquest últim valor dividit entre dos correspon a la fletxa de l'arc generador i l'arc director. Per tant, si tenim una volta de 5 metres de

longitud i 3 d'amplada, s'obté que la llum de l'arc diagonal és de 5,83 metres, amb el que la fletxa d'aquest serà de 58 centímetres. Si aquest valor es divideix entre dos la fletxa dels cindris directors i generador és de 29 centímetres.

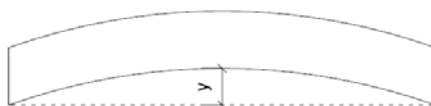
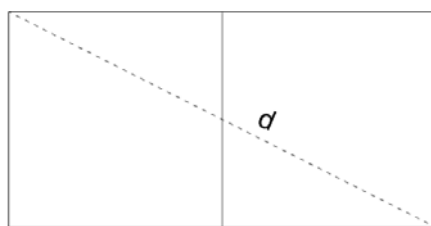
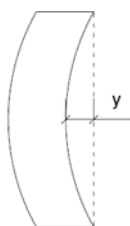


FIG 4: Geometria de les fletxes de la volta quatre punts



$$y = (d/10)/2$$

d=llum de la diagonal de la volta en planta

1.2.2. La cúpula

El terme cúpula prové de l'italià *cupola* amb arrels llatines *cupella* i aquesta, a la vegada, del grec *kupellon*, que significa petita tassa, en relació amb la forma d'aquest element.

La cúpula és una volta engendrada per la rotació d'un arc i, en general, pren el nom de l'arc que l'engendra, excepte quan aquest és de mig punt, que es passa a denominar semiesfèrica (la de l'església de Sant Narcís pertany a aquesta tipologia).

La cúpula pot cobrir una superfície rodona, quadrada, poligonal o el·líptica. En la que es tracta en aquest PFC la superfície és quadrada, resolent el problema del pas de la secció quadrada a octogonal mitjançant trompes⁷ situades en les quatre cantonades de la planta del creuer.

A més, tal i com es pot veure en els plànols de l'apartat d'aixecament, aquesta cúpula està reforçada amb un total de quatre contraforts, dos per cada banda, que transmeten els esforços a les parets exteriors de l'església.

⁷ Les trompes són un element en voladís que fa de transició entre la planta rectangular del transsepte i la planta octogonal de la coberta que segueix a continuació.

FIG 5: Trompa

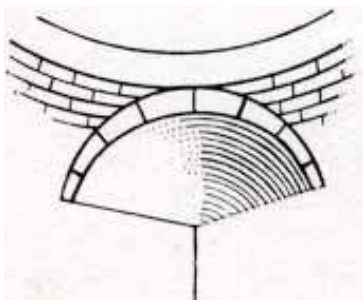
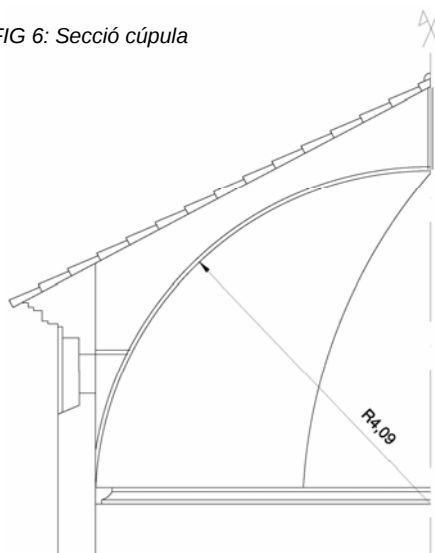


FIG 6: Secció cúpula



1.3. PROCÉS CONSTRUCTIU DE LA VOLTA DE QUATRE PUNTS

En aquest apartat es desenvolupa el procés constructiu genèric d'una volta de quatre punts.

Abans de procedir a la construcció de la volta cal considerar els cindris i els encofrats necessaris per suportar-la mentre aquesta no hagi pres resistència. Per això, cal saber que durant la seva execució la volta actua com una volta cilíndrica d'arc rebaixat i carrega els esforços del seu pes propi cap els costats, on s'hi situen els cindris directors, així que aquests s'hauran de travar durant l'execució amb estintolaments, que es podran treure un cop finalitzada la volta.

També cal saber, abans de procedir a l'execució, que en voltes que cobreixen grans llums i que es recolzen principalment sobre pilars, com és el cas de l'església de Sant Narcís, interessa que el ferro quedi totalment amagat. Per això, aquest s'haurà de col·locar sobre mateix de la volta, en els costats i immediatament sobre els arcs generadors i directors.

Un cop s'ha col·locat el ferro de trava, es passa a la construcció de la volta ceràmica en sí. Si l'arc director es recolza sobre pilars perquè la distribució és diàfana, s'utilitzaran cintres per tal de donar forma a l'arc director (en el cas de que la cintra

quedés encastat a la paret, es podria realitzar una regata amb la forma d'aquest). Posteriorment, es col·loquen les cintres dels arcs generadors, que quedaran perpendiculars als anteriorment descrits.

Un cop col·locades les cintres es realitza la primera filada aferrada amb morter de calç i es desplaça l'encavallada de l'arc generador en el mateix pla horitzontal, i es va repetint el procés fins al final de la volta. En altres edificacions s'ha utilitzat un arc generador de curvatura variable⁸, tot i així, el procés descrit correspon a l'aplicat en l'església de Sant Narcís.



FIG 7: En la fotografia es pot observar la col·locació dels cindris d'una volta de quatre punts amb arc generador de curvatura variable (per tant, el cindri es desplaçarà seguint la curvatura dels altres dos cindris laterals). La foto correspon a la construcció que féu Arnau Blancafort en el seu PFC. En aquesta, a part d'utilitzar una curvatura substancialment diferent, també aplicà altres materials com és la rasilla ceràmica.

Font: Arnau Blancafort, 2006

⁸ També en el PFC de l'Arnau Blancafort.

En les voltes ideades per Ignasi Bosch es col·locaven els maons amb juntes contínues en ambdues direccions i al llarg segons la llum de la volta.

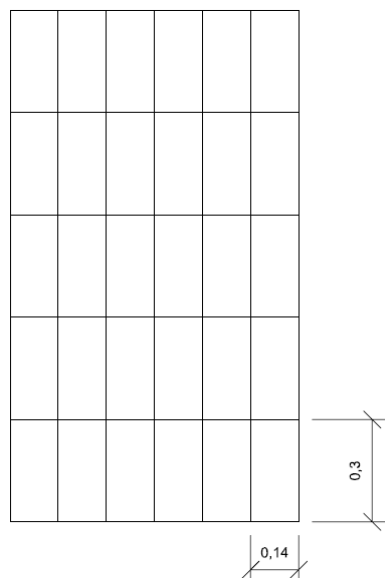


FIG 8: Descripció gràfica de la col·locació de les peces en la construcció de les voltes de quatre punts de l'arquitecte Ignasi Bosch.

1.4. FOTOGRAFIES CONSTRUCCIÓ VOLTA QUATRE PUNTS



FIG 8: En la fotografia de dalt es pot observar uns obrers finalitzant la construcció d'una volta de quatre punts amb tan sols una filada de maó foradat col·locat en pla, de dimensions força grans i amb quatre costelles en cadascuna de les diagonals.

Font: Albert Cabrera, 2005.

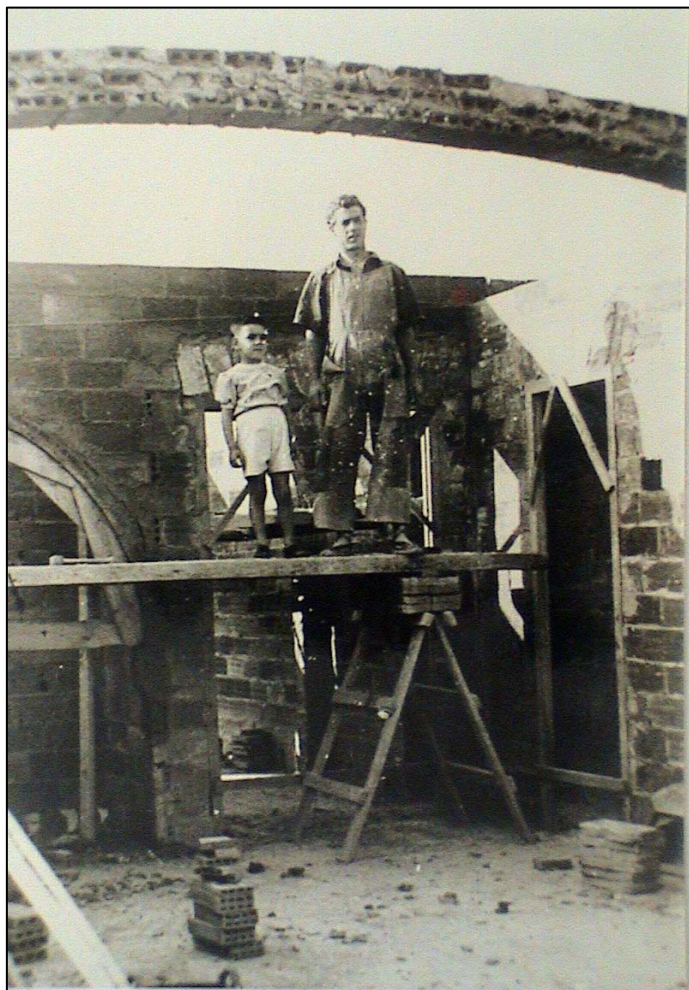


FIG 9: En la fotografia de l'esquerra s'observa la formació dels envans amb maó foradat col·locat de cantell, i d'un arc amb tres filades del mateix maó col·locat en planta. Correspon a la construcció de la vivenda situada a la Rambla Catalunya núm. 5 del barri de Sant Narcís.

Font: Albert Cabrera, 2005.



FIG 10: En la fotografia de l'esquerra s'observa un obrer executant un ar. Alhora, s'hi poden apreciar els cables de ferro que treballaran com a tirants.

A més, s'hi reflexa la precarietat de mitjans utilitzats a l'obra

Font: Albert Cabrera, 2005.

FIG 11: S'observa l'execució de la mateixa tipologia de volta. En aquest cas veiem que les encavallades són molt més simples degut a que la llum a cobrir és menor. Tanmateix, es dóna forma d'arc a la paret per tal que aquesta s'hi recolzi, amb el que la volta deixa de treballar tal i com es venia explicant.

Font: Albert Cabrera, 2005.



2. ANÀLISI LÍMIT DE L'ESTRUCTURA DE FÀBRICA

En aquest apartat s'explicarà un tipus de teoria estructural d'arcs i voltes desenvolupada pel Professor Jacques Heyman. Aquesta teoria és diferent a la que es desenvolupa en el projecte, però és interessant exposar-la per tal de conèixer en quins teoremes, teories i principis es basa, el comportament i característiques dels elements de fàbrica en general.

2.1. ALGUNES CONSIDERACIONS

Per tal d'entendre el funcionament elemental de les estructures de fàbrica, s'exposen els dos principis de l'anàlisi límit d'aquest tipus d'estructures a través d'alguns exemples generals:

- a) Si al retirar les cintres d'un arcbotant, aquest resta subjectat durant 5 minuts, llavors ho farà durant 500 anys.

Per a cargues estàtiques la prova d'aquest teorema deriva immediatament del teorema de la seguretat. El límit superior de 500 anys depèn de la degradació del material.

b) Si la fonamentació d'una estructura de fàbrica permet petits moviments, aquests mai provocaran en sí mateix el col·lapse de l'estructura.

Els assentaments de les fonamentacions produiran esquerdes o obertures a les dovelles. Tanmateix, aquest clivellament és, com s'explicarà més endavant, l'estat normal de la fàbrica. Per a petits assentaments les esquerdes poden tenir l'espessor d'un cabell o estar tancades en virtut de l'elasticitat de la pedra i ser, per tant, invisibles. Però aquestes esquerdes, que tan sols representen la incapacitat de la fàbrica per a suportar traccions, no són en sí mateixes perilloses.

2.2. L'ARC DE DOVELLES

L'anàlisi de l'arc de dovelles permet exemplificar que el col·lapse es produeix quan es formen suficients articulacions que donen com a resultat un mecanisme.

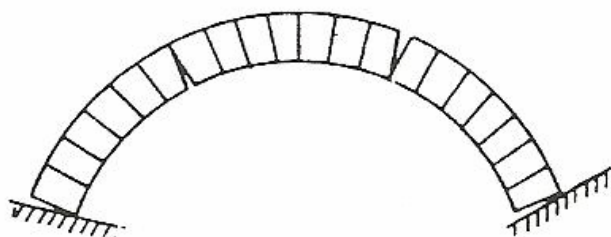


FIG 12: Representació gràfica de l'arc a dovelles actuant com un mecanisme articulat. S'observa el correcte esquema de l'alternança d'articulacions que s'obren i es tanquen.

Font: Jacques Heyman.

La figura mostra un model d'arc a dovelles amb quatre articulacions. Considerada mecànicament, la estructura és ara un mecanisme de tres bieles, capaç de moure's amb un grau de llibertat.

El número d'articulacions que es requereix perquè un mecanisme col·lapsi és fàcilment calculable. Per exemple, en el cas de l'arc, aquest és un element considerat des del punt de vista de l'anàlisi estructural convencional una estructura hiperestàtica de tercer grau, per tant, tres articulacions la fan estàticament determinada (isostàtica). La quarta articulació convertiria l'estructura isostàtica en un mecanisme, i permetria trobar el valor de la càrrega de ruptura.

2.3. ANÀLISI D'EDIFICIS DE FÀBRICA

L'estabilitat del conjunt de la fàbrica ve donada, per tant, per la compactació dels diversos elements sota l'acció de la gravetat. Aquesta estructura estarà sotmesa a un estat general de compressions, que només admetrà, sense dubte, traccions febles.

La forma de la construcció es mantindrà en peu si l'aparell entre els elements és perfecte; ja que si existís qualsevol tendència al lliscament, les forces de fricció actuarien en dites cares i erradicarien el problema. Per tant, les forces verticals de compressió actuaran com una espècie de 'pretensat' de la fàbrica, mantenint l'estabilitat general, i permetent que els esforços oblics interns es transmetin sense causar traccions ni lliscaments.

Per estimar l'ordre de magnitud dels esforços de compressió procedents del pes propi del material, sabem que la tensió a la base d'un mur simple d'espessor constant deguda al pes propi és $p \cdot h$, essent p el pes específic del material i h l'alçada del mur.

Resulta interessant comparar aquesta tensió deguda al pes propi amb la resistència de ruptura a compressió de la pedra. En un càlcul aproximat, una pedra de qualitat mitja pot presentar una resistència de ruptura a compressió d'uns 40.000 kN/m², mentre que el seu pes específic ronda els 20 kN/m³. L'alçada h per a la que el mur trenca per aixafada a la base és de 2.000 m. Si les tres quarts parts de la base fossin buides per finestres, arcades, etc., la porció restant de mur encara podria suportar una alçada de 500 m, un ordre de magnitud molt superior a l'habitual en construcció.

2.4. MANTENIMENT DELS EDIFICIS DE FÀBRICA

Les grans estructures de fàbrica precisen una vigilància i manteniment continu per assegurar que la pedra no s'alteri excessivament i mantingui les seves característiques estructurals. Per tant, és bo que s'analitzin tres criteris estructurals per tal de garantir el bon comportament. Aquests criteris són la resistència, la rigidesa i l'estabilitat.

La resistència i la rigidesa no són rellevants en el càlcul de les estructures de fàbrica,

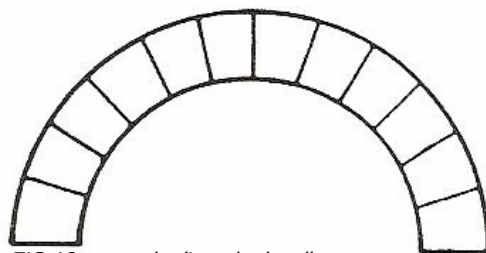
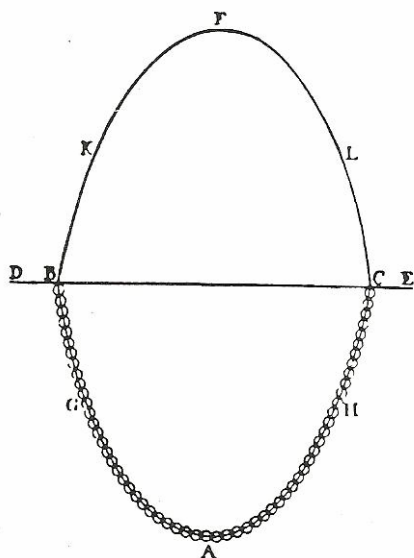


FIG 13: exemple d'arc de dovelles

Font: Jacques Heyman.

tanmateix, l'estabilitat és fonamental. L'únic factor necessari per assegurar l'estabilitat d'una estructura de fàbrica és que les forces actuïn a l'interior de l'element. Així, per a l'arc adovellat de la figura 13, es pot imaginar que cada dovella es troba en equilibri entre el seu propi pes i les reaccions amb les seves veïnes. Les posicions d'aquestes reaccions defineixen una línia d'empentes de l'arc, restant l'estabilitat assegurada si aquesta línia es troba per complet dintre de la fàbrica.



A partir de l'afirmació que feu Hooke “de la mateixa manera que penja un fil flexible, així, però invertit, se sostindrà l'arc rígid”, Poleni en reproduí la il·lustració de la catenària, en la figura 14, que recull la forma d'un cable carregat a tracció (catenària) que suporta idèntiques carregues a compressió.

FIG 14: reproducció de la catenària de Poleni.

Font: Jacques Heyman.

Així, els pesos de les dovelles condueixen a una catenària d'una certa forma; aquesta forma es mostra invertida com a línia d'empentes (en discontinua dins l'arc). La línia d'empentes es troba dintre dels límits de la fàbrica; això demostra que l'arc és segur.

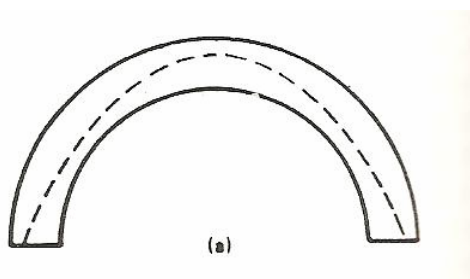


FIG 15: forma de la línia d'empentes dins la fàbrica, per a un arc d'un cert gruix.

Font: Jacques Heyman.

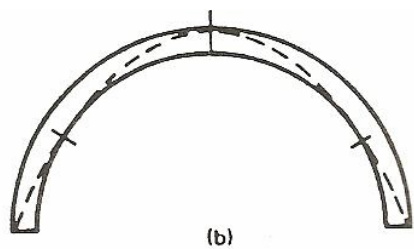


FIG 16: forma de la línia d'empentes al límit de la fàbrica, per un arc esvelt.

Font: Jacques Heyman.

S'apreciarà que la forma de la línia d'empentes per a l'arc de la figura 16 és idèntica a la obtinguda per a l'arc de la figura 15, tot i que aquest últim és més esvelt ha estat dibuixat de forma que conté just les forces estructurals. Un arc d'aquest gruix estaria

teòricament al límit de l'estabilitat i qualsevol alteració accidental de la geometria, o qualsevol lleu asimetria a les càrregues, portaria a que les empentes deixessin d'estar contingudes a la fàbrica i conseqüentment l'arc col·lapses. Per tant, s'arriba a concloure que s'assegurarà l'estabilitat de l'arc en base una geometria satisfactòria, que sigui capaç de contenir la línia d'empentes dins el seu gruix.

Per tal d'entendre millor l'afirmació exposada, es mostren les posicions límit de la línia d'empentes en les figures 17 i 18, cada una corresponent a un estat diferent d'equilibri amb esforços diferents que col·laboren en mantenir l'equilibri de l'arc.

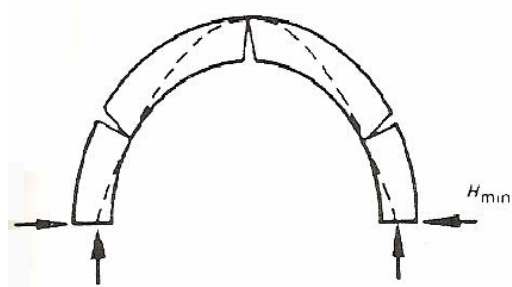


FIG 17: posició límit de línia d'empentes, l'empenta sobre el contrafort està al seu valor mínim.

Font: Jacques Heyman.

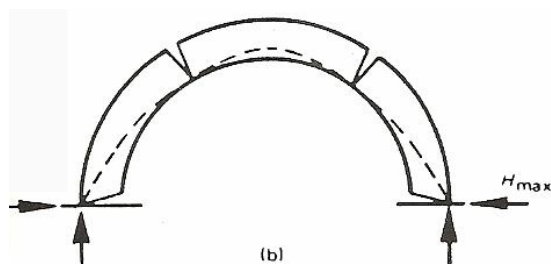


FIG 18: posició límit de línia d'empentes, l'empenta sobre el contrafort està al seu valor màxim.

Font: Jacques Heyman.

Per exemple, si tenim un pont on els seus contraforts han cedit lleugerament, la llum del pont haurà augmentat mentre que l'empenta sobre el contrafort haurà disminuït fins arribar al seu valor mínim; si a més s'ha format una articulació a la clau com s'exemplifica en la figura 17, es podrà afirmar que l'element es troba fora de perill, ja que l'articulació per clivellament a la clau indica que els contraforts van cedir, segurament fa molt temps.

Si a l'estructura hi ha evidència de deformacions progressives, o es preveu que en un futur les càrregues permanents poden provocar aquests moviments, o be els contraforts continuen cedint, llavors és precís prendre mesures per estabilitzar la geometria global de l'estructura en el seu estat actual.

Si, al contrari, no hi ha cap evidència dels esmentats moviments o sembla, per posar un exemple, que el terreny ha consolidat sota els fonaments, es considera que l'estructura és estable i no requereix cap intervenció.

2.5. PUNTUALITATS DE DIFERENTS CONCEPTES

Anàlisi límit. També anomenat anàlisi plàstic o de ruptura. Aquest anàlisi estructural permet esbrinar les càrregues que causen el col·lapse d'una estructura formada per un material perfectament plàstic. A una estructura de fàbrica se li podrà aplicar l'anàlisi límit sempre i quan compleixi amb unes determinades condicions de comportament:

- (a) La fàbrica no té resistència a tracció,
- (b) La fàbrica presenta una resistència a compressió infinita
- (c) L'error per lliscament és impossible.

Teoremes fonamentals de l'anàlisi límit. Si en una construcció de fàbrica es compleixen els tres principis de l'anàlisi límit, es podran demostrar tres teoremes fonamentals que constitueixen la base per a l'anàlisi o el càlcul d'estructures de fàbrica. Aquests teoremes són:

- De la seguretat, també anomenat del "límit inferior". S'ocupa dels estats d'equilibri de l'estructura. Una estructura de fàbrica és segura (estable) si és possible trobar una situació d'equilibri compatible amb les càrregues que no violi la condició de límit (això és, les càrregues es transmeten sempre dins de la fàbrica). La potència del teorema rau en que aquesta solució no té per què ser 'real'; n'hi ha prou amb trobar una solució per demostrar que l'estructura és segura. Per tant, un arc de fàbrica serà segur si és possible dibuixar una línia d'empentes continguda en el seu interior.
- De la inseguretat, també anomenat del "límit superior". S'ocupa dels valors de la càrrega que produeixen el col·lapse de l'estructura. Una estructura s'enfonsarà si desenvolupa un nombre suficient d'articulacions com per convertir-se en un mecanisme de col·lapse cinemàticament admissible. Un arc de fàbrica s'enfonsarà si podem dibuixar una línia d'empentes que, tocant alternament el trasdós i l'intradós, produeix un nombre d'articulacions que el converteixen en un mecanisme (és a dir, quatre o més articulacions).
- De la unicitat. Estableix que la càrrega de col·lapse d'una estructura és única, ja que és impossible trobar en una estructura simultàniament situacions d'equilibri i de col·lapse (l'estructura s'enfonsa o no s'enfonsa; no pot sostenir-se i enfonsar-se alhora).



Nota:

Aquest anàlisi estructural i forma de calcular exposada pel professor Heyman no és aplicable a les voltes que s'analitzen en aquest projecte.

Tal i com afirmà Ignasi Bosch⁹, les voltes de quatre punts no comparteixen els principis de l'anàlisi límit de les fàbriques ceràmiques per l'extrema lleugeresa, gruix i disposició de les peces que conformen els arcs i les voltes, entre altres motius, ja que és impossible pensar que l'estabilitat d'aquestes estructures be donada pels esforços de compressió procedents del pes propi del material.

⁹ Bosch, Ignasi (1949).



3. ESGLÉSIA

A. GENERALITATS	pàg.36
1. Situació	pàg.36
2. Composició	pàg.36
3. Plànol de situació	pàg.38
4. Plànol d'emplaçament	pàg.39
 B. AIXECAMENT	pàg.40
1. Metodologia i procés	pàg.40
1.1. Introducció	pàg.40
1.2. Recerca	pàg.40
1.3. Desenvolupament	pàg.40
2. Fotografies	pàg.42
3. Plànol planta baixa	pàg.45
4. Plànol planta cor	pàg.46
5. Plànol secció longitudinal 1	pàg.47
6. Plànol secció longitudinal 2	pàg.48
7. Plànol secció transversal	pàg.49
8. Façana principal	pàg.50
9. Façana lateral	pàg.51
10. Vista isomètrica 1	pàg.52
11. Vista isomètrica 2	pàg.53
12. Vista isomètrica 3	pàg.54
 C. ANÀLISI CONSTRUCTIU	pàg.55
1. Unitats constructives	pàg.55
1.1. Moviments de terres i fonamentació	pàg.55
1.2. Base de formigó en paviments	pàg.56
1.3. Parets	pàg.56



1.4. Arcs	pàg.57
1.5. Pilars ceràmics i de pedra artificial	pàg.58
1.5.1. Ceràmics	pàg.58
1.5.2. Pedra artificial	pàg.59
1.6. Voltes de maó de pla	pàg.59
1.7. Coberta	pàg.63
1.8. Elements decoratius	pàg.63
1.9. Acabats	pàg.64
2. Procés constructiu	pàg.64
3. Fotografies	pàg.67
4. Detalls constructius	pàg.68
4.1. Sistema constructiu fonament- paret de càrrega	pàg.68
4.2. Arc nivell A	pàg.69
4.3. Arc nivell B	pàg.70
4.4. Arc nivell C	pàg.71
4.5. Arc nivell D	pàg.72
4.6. Coberta i ràfec	pàg.73
 D. PATOLOGIES	 pàg.74
1. Introducció	pàg.74
2. Patologia "1"	pàg.74
2.1. Fotografies	pàg.74
2.2. Descripció i localització	pàg.76
2.3. Causes	pàg.76
2.4. Intervencions a realitzar	pàg.76
3. Patologia "2"	pàg.77
3.1. Fotografies	pàg.77
3.2. Descripció i localització	pàg.78
3.3. Causes	pàg.78
3.4. Intervencions a realitzar	pàg.78



4. Patologia “3”	pàg.79
4.1. Fotografies	pàg.79
4.2. Descripció i localització	pàg.79
4.3. Causes	pàg.79
4.4. Intervencions a realitzar	pàg.80
5. Patologia “4”	pàg.80
5.1. Fotografies	pàg.80
5.2. Descripció i localització	pàg.80
5.3. Causes	pàg.81
5.4. Intervencions a realitzar	pàg.81
6. Patologia “5”	pàg.81
6.1. Fotografies	pàg.81
6.2. Descripció i localització	pàg.82
6.3. Causes	pàg.82
6.4. Intervencions a realitzar	pàg.83
7. Patologia “6”	pàg.83
7.1. Fotografies	pàg.83
7.2. Descripció i localització	pàg.84
7.3. Causes	pàg.84
7.4. Intervencions a realitzar	pàg.84
8. Patologia “7”	pàg.85
8.1. Fotografies	pàg.85
8.2. Descripció i localització	pàg.86
8.3. Causes	pàg.88
8.4. Intervencions a realitzar	pàg.89
9. Pressupost reparació aproximat	pàg.90
10. Plànols patologies	pàg.91-96



A. GENERALITATS

1. SITUACIÓ

L'església del grup Sant Narcís es troba situada a la plaça de l'Assumpció, encarada frontalment a la Rambla Catalunya i delimitada per la banda dreta pel carrer Roma.

Tot i que és força complex trobar informació del temple, es pot afirmar que és construït cap el 1950 seguint el projecte realitzat per Ignasi Bosch, un cop ja s'hagueren finalitzat els primers habitatges del grup.

2. COMPOSICIÓ

L'església, de planta rectangular, presenta les dimensions i forma habituals d'un temple cristià de la nostra regió; tanmateix, l'estructura general que segueix l'edifici és la pròpia del grup: construcció senzilla amb predomini de volta de maó de pla, ja sigui en forma de cúpula o de volta de quatre punts.

Les parts principals de que està composta l'església són:

- Una nau principal, dividida en tres cossos, sobre els quals es van desenvolupant la resta d'espais. El més simbòlic és el del creuer, sobre el qual s'hi situa la cúpula
- El presbiteri¹, situat a continuació de la nau principal i que acaba amb absidiola² en la part final
- La sagristia
- Les naus laterals, situades a banda i banda de la principal
- El cor, que queda a un segon nivell dins el primer cos de la nau principal i al qual s'accedeix per unes escales
- El campanar, al que s'accedeix mitjançant unes escales que s'inicien a un lateral i que alhora donen accés a l'antiga biblioteca del centre parroquial, ubicada a sobre del pont que travessa el carrer Roma. Aquest pont, a més comunica amb el centre parroquial.

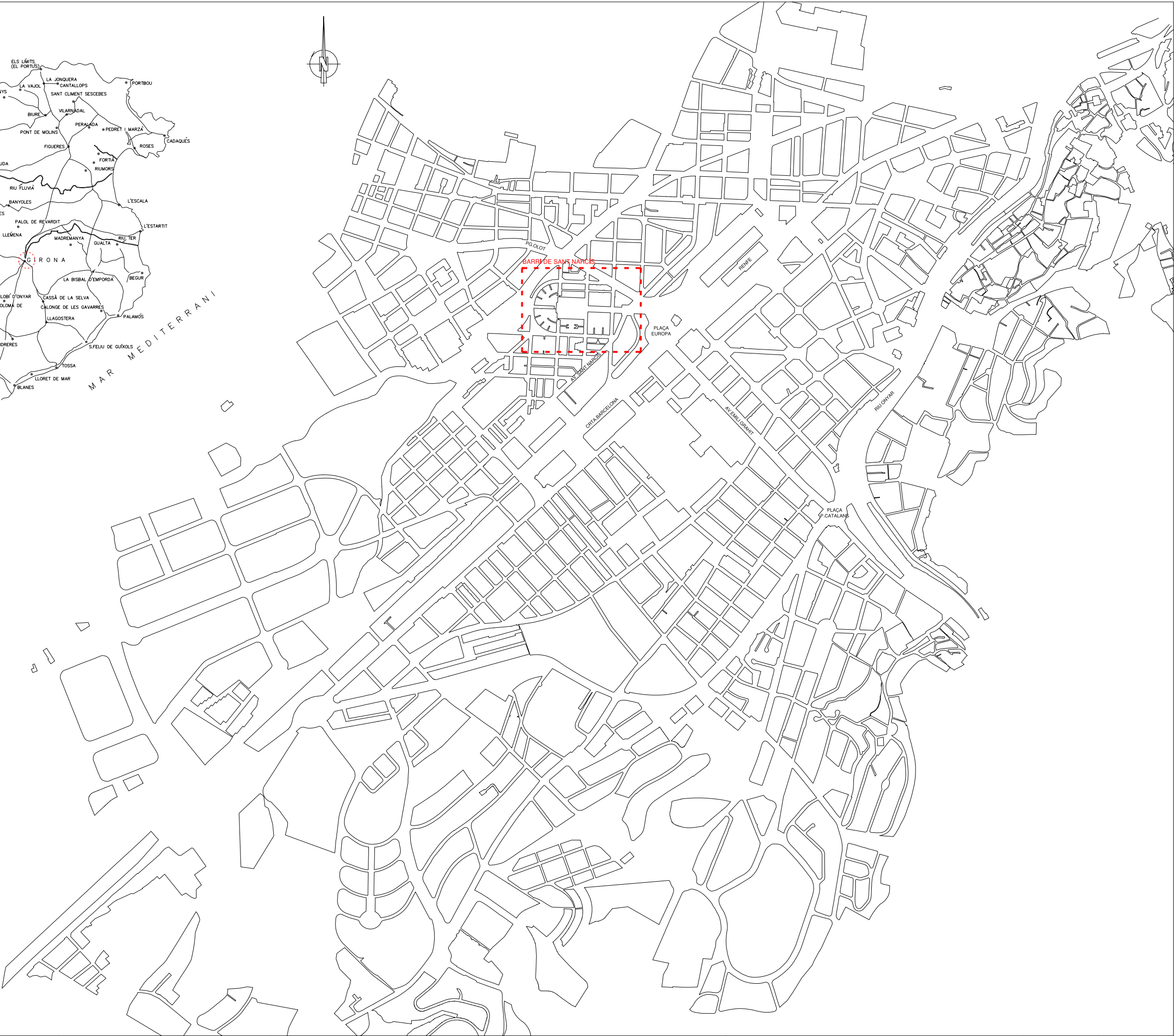
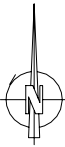
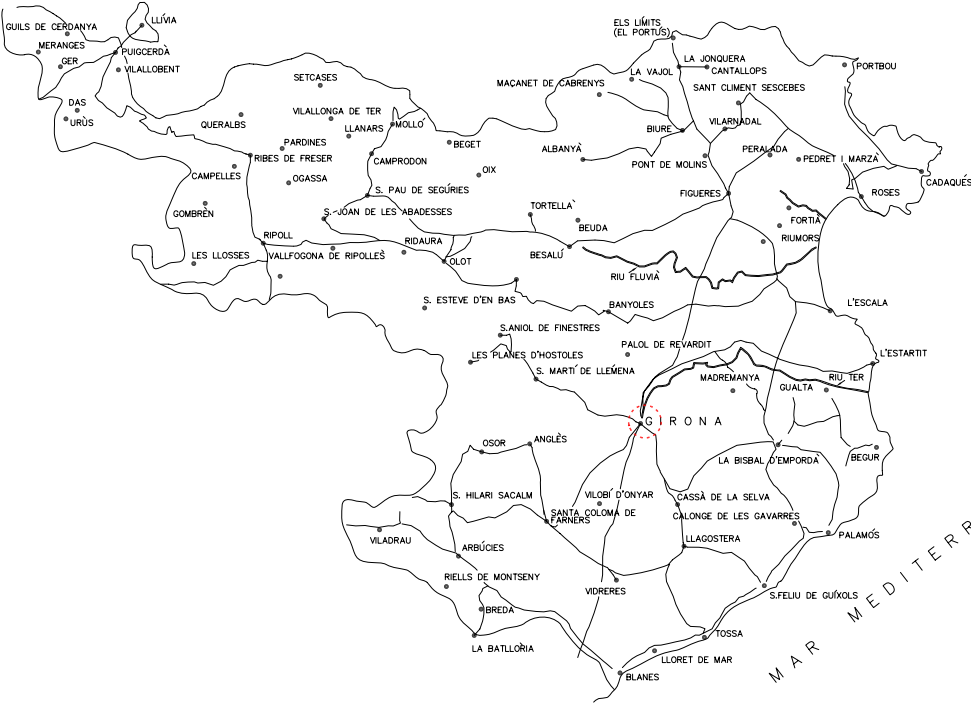
¹ Espai que envolta l'altar, separat de la nau per una grada.

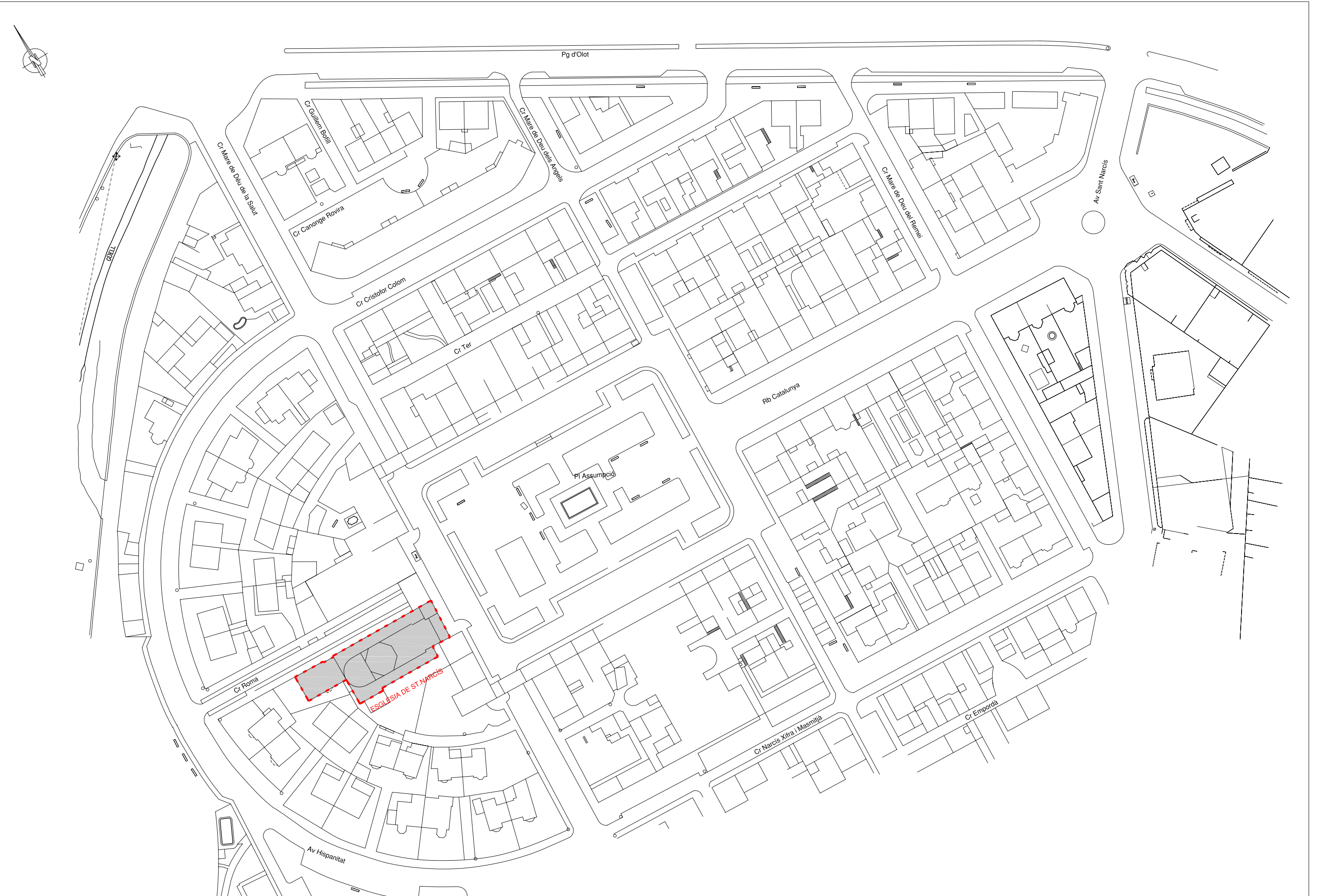
² Petit absis, situat a la capçalera de l'església i que sobresurt per la façana posterior, de planta semicircular i cobert amb una volta de quart d'esfera.



- La rectoria, que es troba annexada al presbiteri de l'església. Aquesta manté les característiques de disseny i forma de les cases del barri. En el tram d'unió de la rectoria amb el presbiteri s'hi situa una petita escalinata que permet el pas a un segon nivell on hi han sales que contenen la caldera i un petit magatzem. Des d'aquest nivell s'inicien unes escales de barrots que permeten l'accés a un passadís semicircular situat sobre l'absidiola. Actualment aquest passadís està en desús, ja que el servei que pot donar no és gaire eficient.

FRANÇA







B. AIXECAMENT

1. METODOLOGIA I PROCÉS

1.1. INTRODUCCIÓ

El procediment d'aixecament d'un edifici és relativament senzill. De tota manera, degut a la gran alçada i dimensions d'aquest, el procés passa a ser llarg i força dificultós, amb el que s'ha cregut oportú ressaltar-ho dedicant-li un petit apartat de metodologia.

1.2. RECERCA

En un primer moment es va iniciar la recerca bibliogràfica en el fons que disposa la biblioteca de la UdG, i es va adoptar com a base de dades dimensionals per aquest treball el projecte titulat "La Plaça de l'Assumpció i l'Església de Sant Narcís", de les alumnes Marina Riera i Gigliola Defranchi (estudiants d'Arquitectura Tècnica). Tot i això, es va fer una comprovació general de les dades per tal de verificar-les.

Un cop arribat a aquest punt, es va poder constatar que les dades proporcionades pel projecte esmentat no s'acabaven d'ajustar al model real de l'església, ja que molts elements estructurals no constaven o no quedaven veritablement reflectits en els plànols.

Degut a la importància que prenen les dimensions i els elements estructurals d'aquest edifici en el projecte, es va creure oportú partir de zero i realitzar un aixecament més complet; on a més dels plànols bidimensionals que queden exposats en aquest capítol, també es mostressin detalls constructius que aportessin major informació dels components i ordre en que es va fer l'edifici, o una generació 3D dels elements més importants, aconseguint així que el lector pugui fer-se una imatge més completa de l'església sense haver de visitar-la.

1.3. DESENVOLUPAMENT

Per fer l'aixecament es va fer ús de les eines més senzilles i rudimentàries, bàsicament un metre per prendre les dimensions en llargada i un escaire per garantir



que els angles que hi ha són rectes. Per a la presa de dimensions en alçada es va fer servir un mesurador làser, amb una precisió del $\pm 1\%$.

Alhora que es prenen les dades es passaven a suport informàtic per tal de comprovar que aquestes “quadressin”. Durant aquest procés es va anar estudiant les diverses patologies que presenta l'església. Les més evidents en un primer moment eren les referents al desgast i falta de manteniment.

Posteriorment es va decidir modelitzar alguns dels elements estructurals més rellevants amb Autocad 3D per tal de crear una imatge més completa de la situació d'aquests dins l'església.

2. FOTOGRAFIES

Per tal de poder associar els plànols presentats amb la realitat de l'edifici, s'inclouen una sèrie de fotografies. En la planta de l'església mostrada a continuació s'assenyala el punt des de on s'han obtingut les imatges.

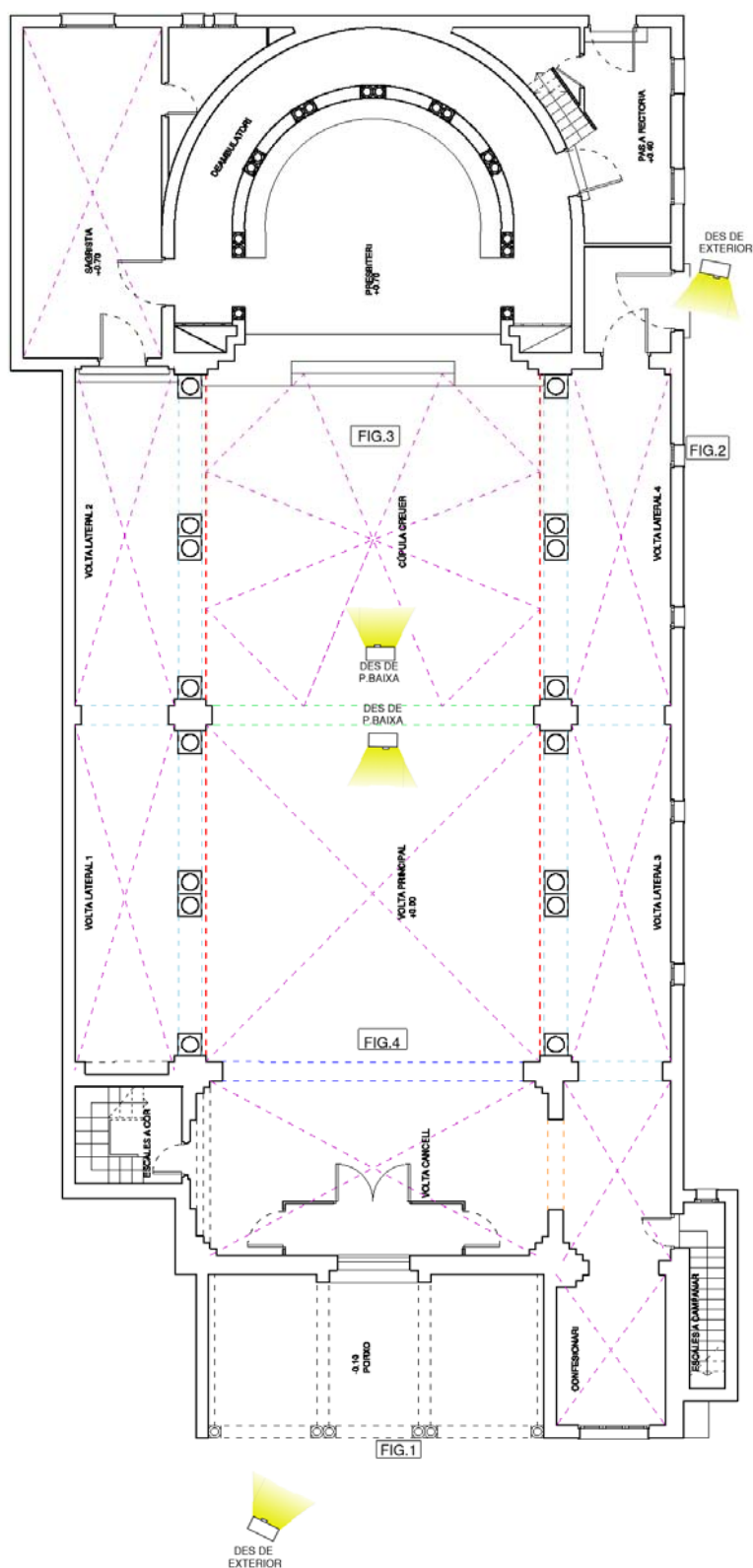




FIG 1: A la fotografia de la dreta es mostra la façana principal de l'edifici, des de la Plaça Assumpció.

Es pot observar que principalment consta d'una paret de tancament amb un rosetó al centre i un porxo a la part baixa d'aquesta, al qual s'hi accedeix a través de tres arcs. A la dreta de la paret s'hi situa el campanar, compost alhora per maó d'obra vista i maó per revestir. A la dreta del campanar hi ha el pont que comunica l'església amb la parròquia per sobre el carrer Roma.

Font: fotografia pròpia.



FIG 2: En la fotografia de baix es mostra la façana lateral de l'església des del carrer Roma i en direcció est, cap el centre de la plaça Assumpció.

S'hi poden observar els diferents nivells de coberta, en primer terme s'hi situa la suportada per la cúpula, de base octogonal, posteriorment els dos nivells de coberta corresponents a la part central de l'edifici, i finalment al fons de la imatge, el campanar.

Font: fotografia pròpia.





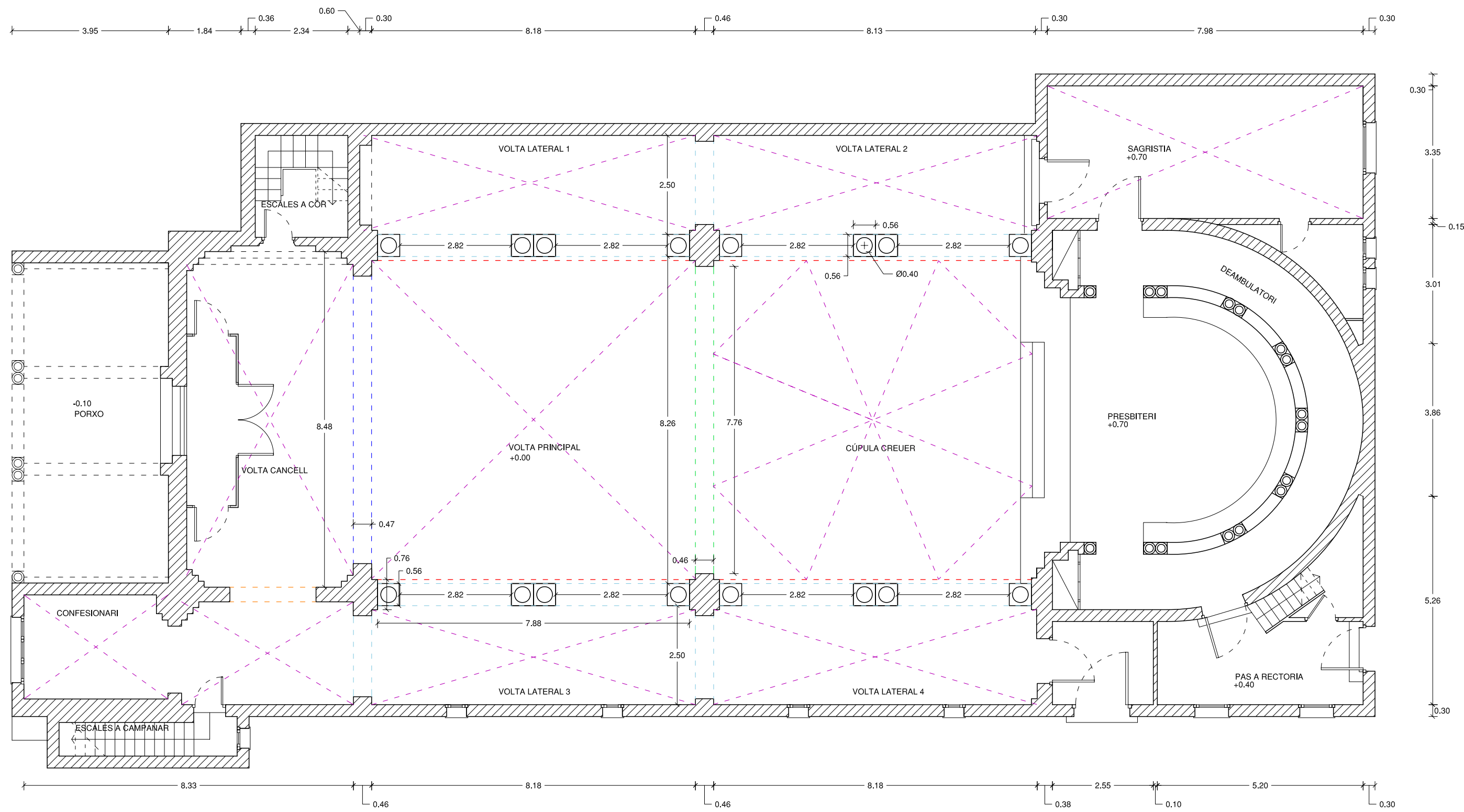
FIG 3: La fotografia de dalt mostra l'església vista des de sota la nau principal cap a l'absis, aquest situat al fons de la imatge. En els laterals s'hi situen els diferents arcs que posteriorment es descriuran, a més dels pilars ceràmics o els de pedra artificial.

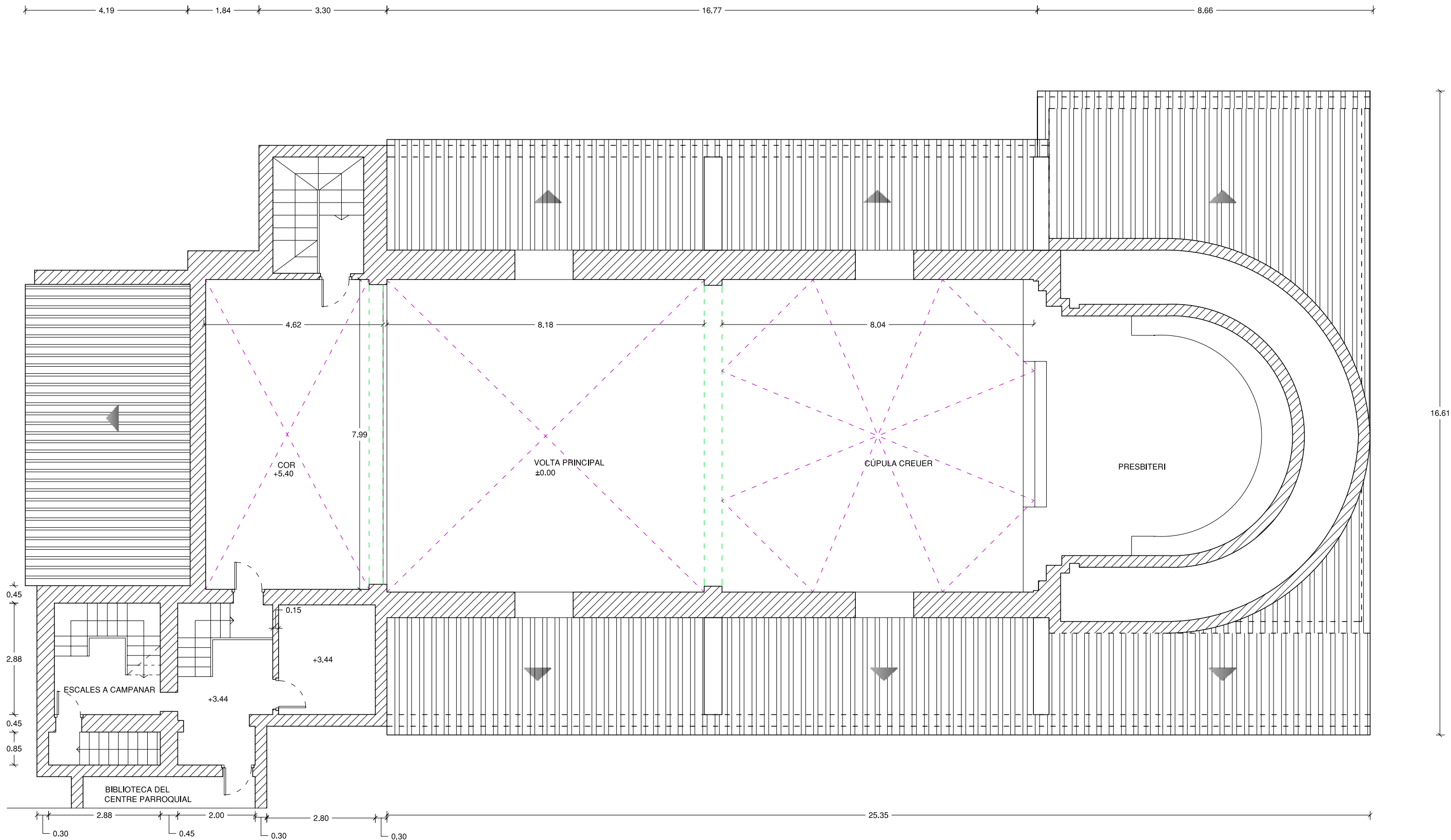
Font: fotografia pròpia.

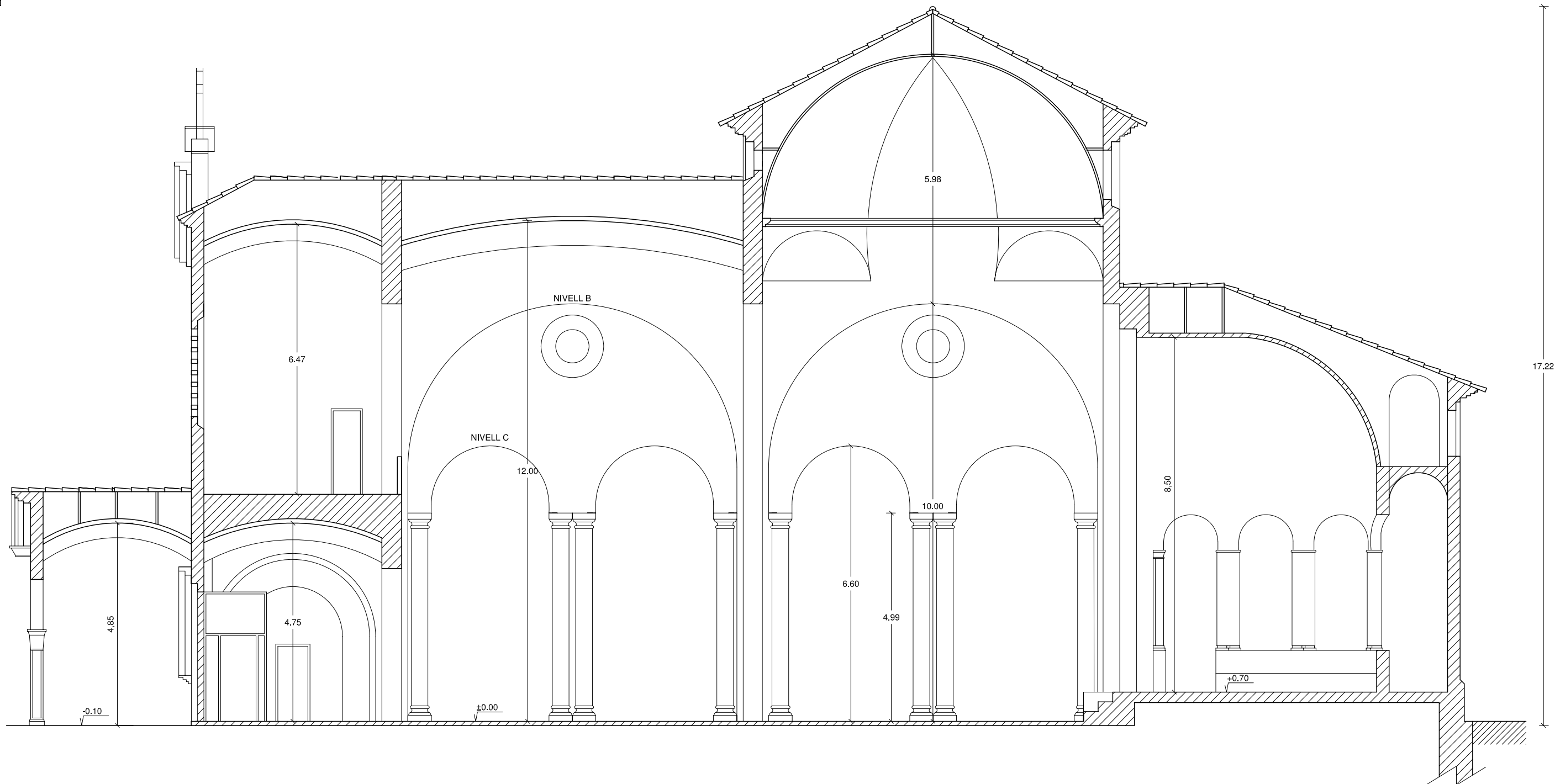
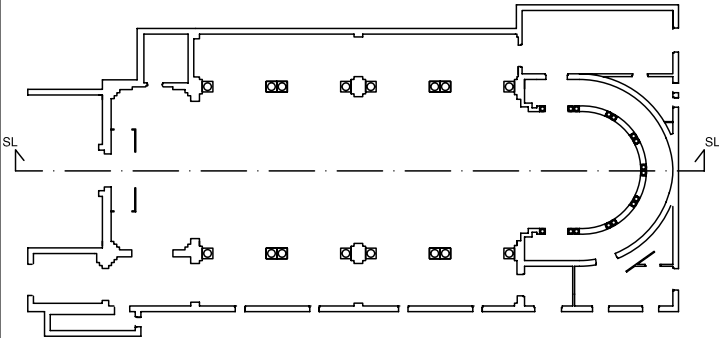
FIG 4: A la fotografia del peu del comentari s'observa l'església des de la mateixa posició que en l'anterior però en sentit contrari, cap a l'entrada principal en el primer nivell i al cor en el segon nivell. Els arcs i els pilars es repeteixen al llarg de l'església.

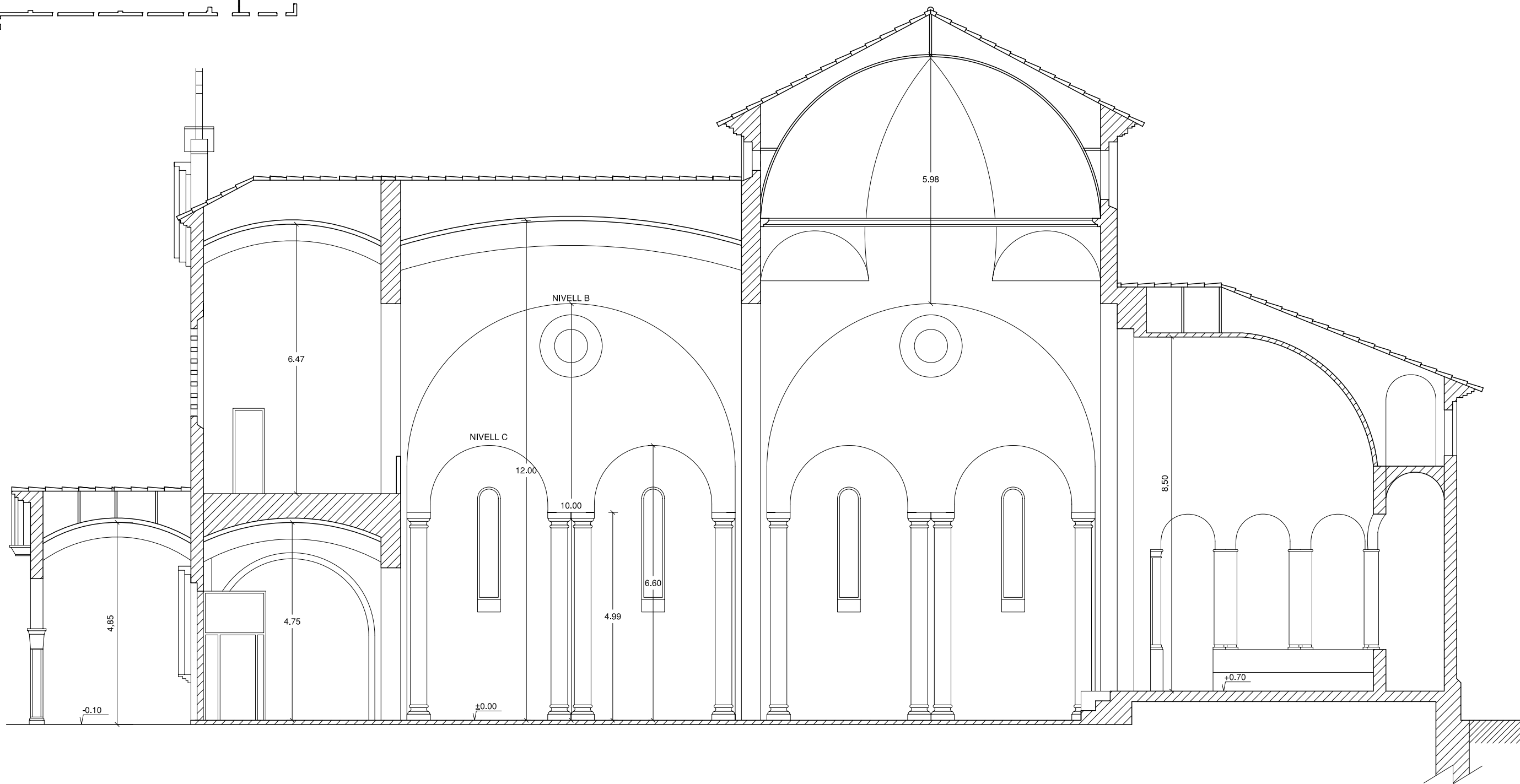
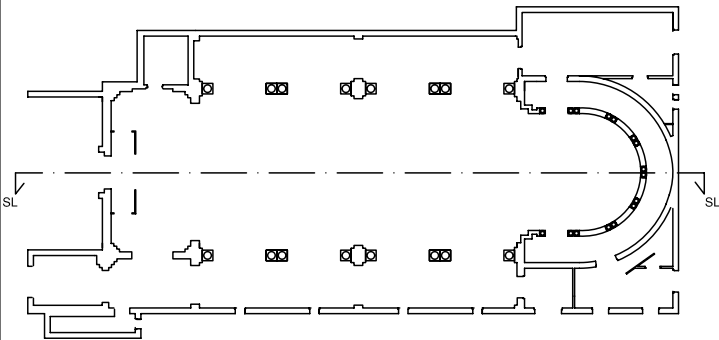
Font: fotografia pròpia.

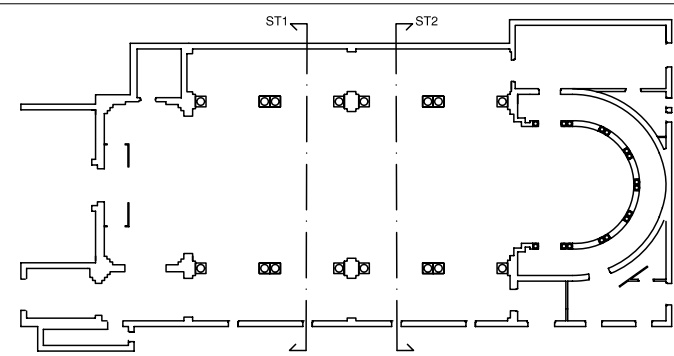




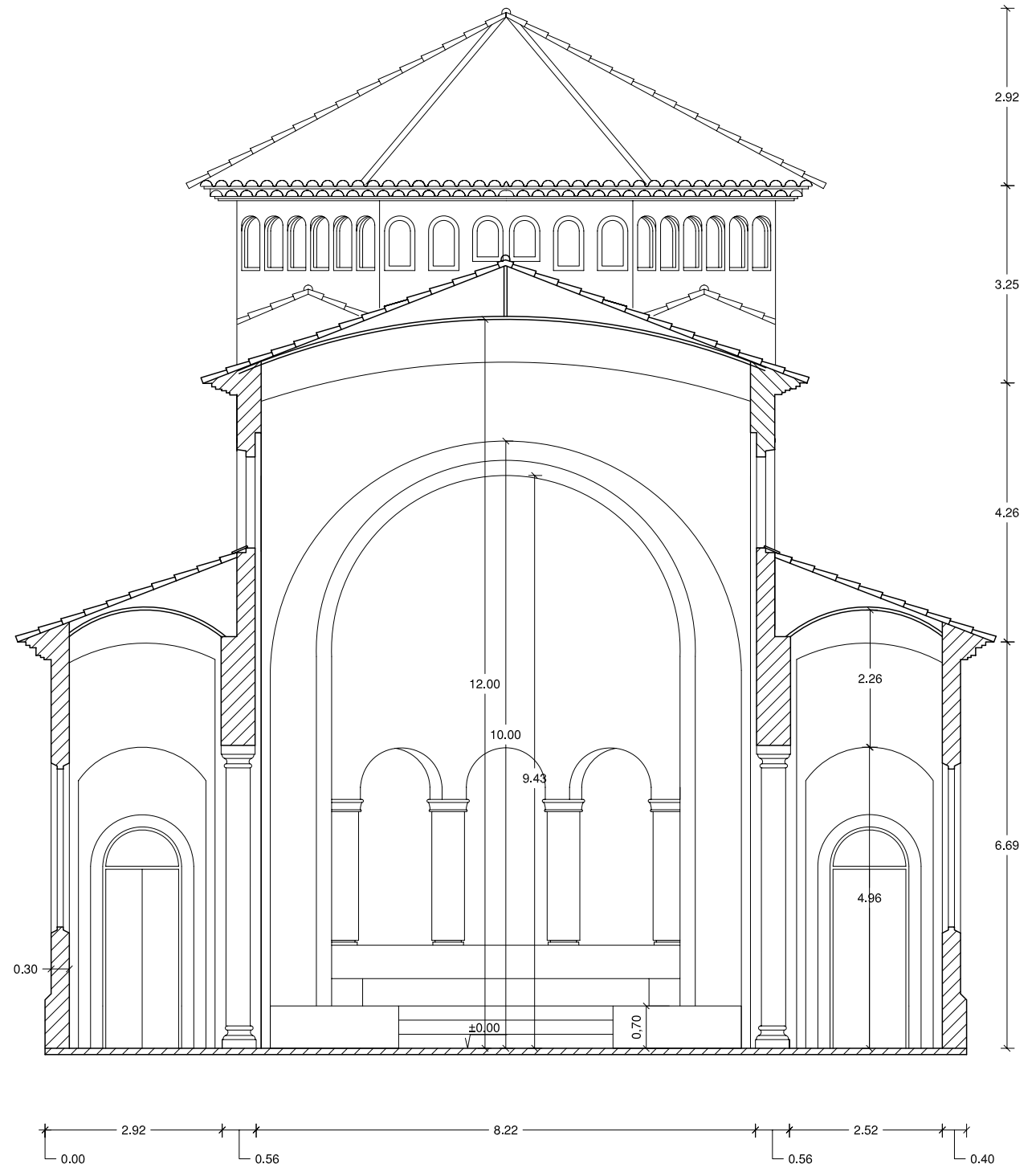




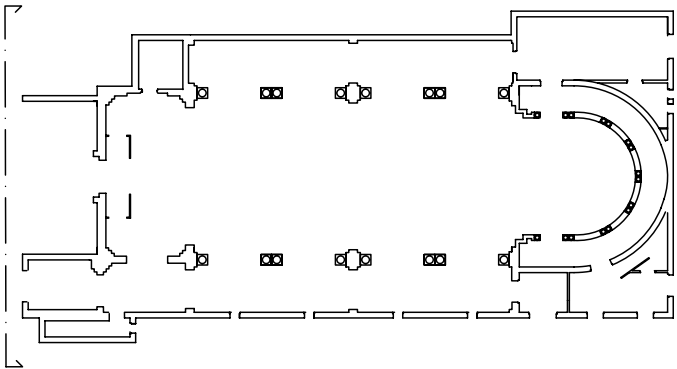


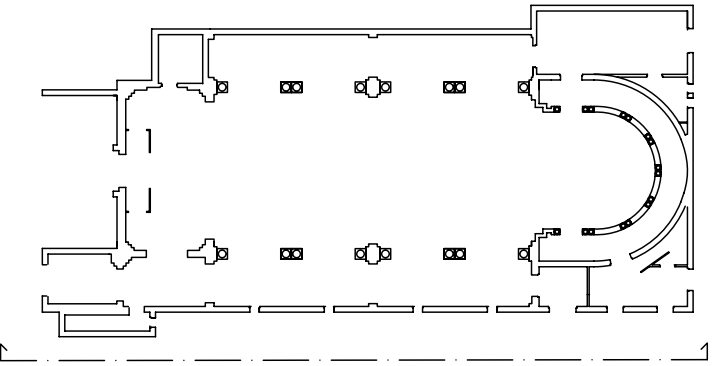


SECCIÓ TRANSVERSAL 1

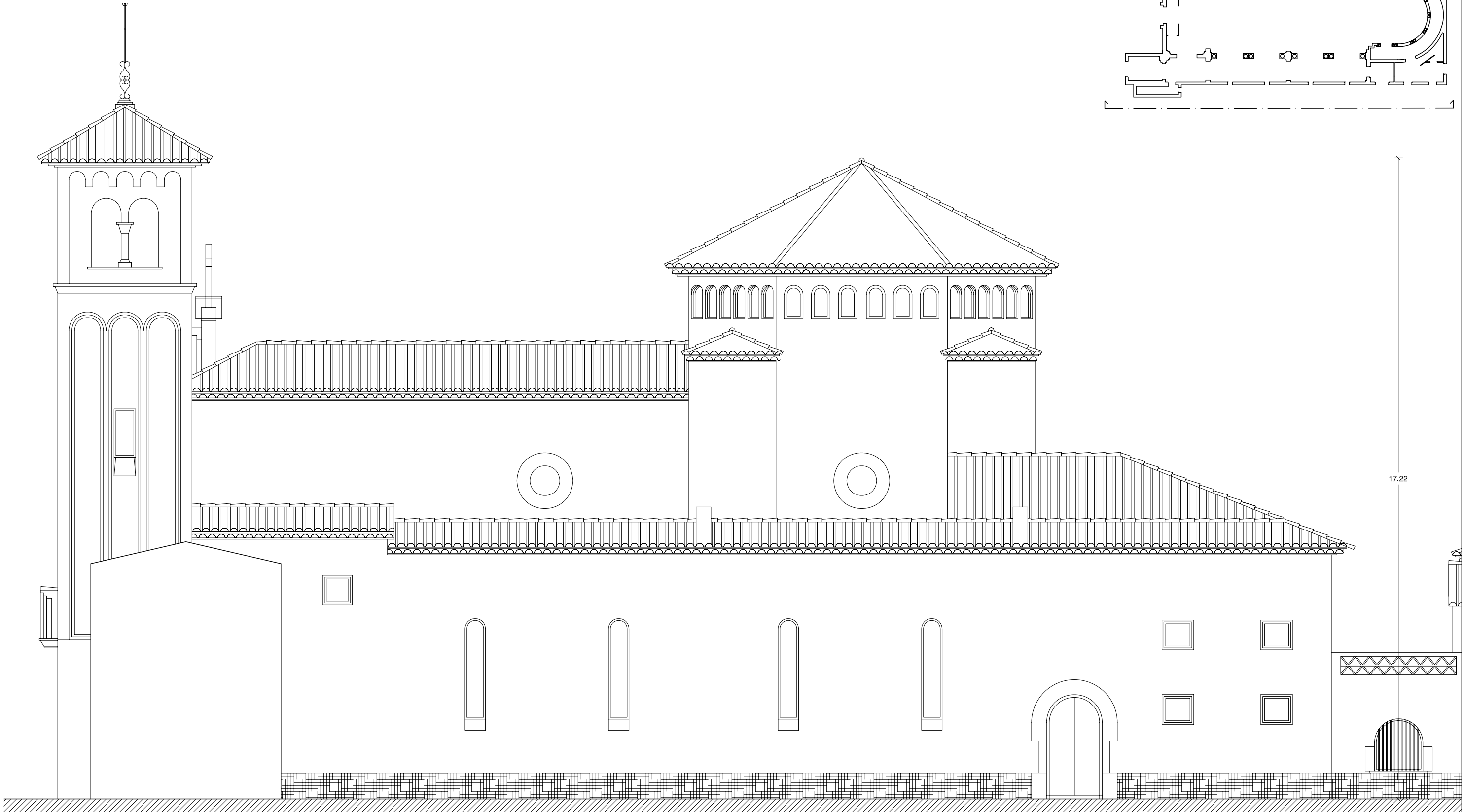


SECCIÓ TRANSVERSAL 2



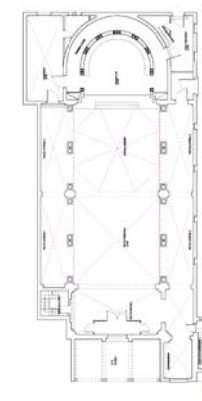
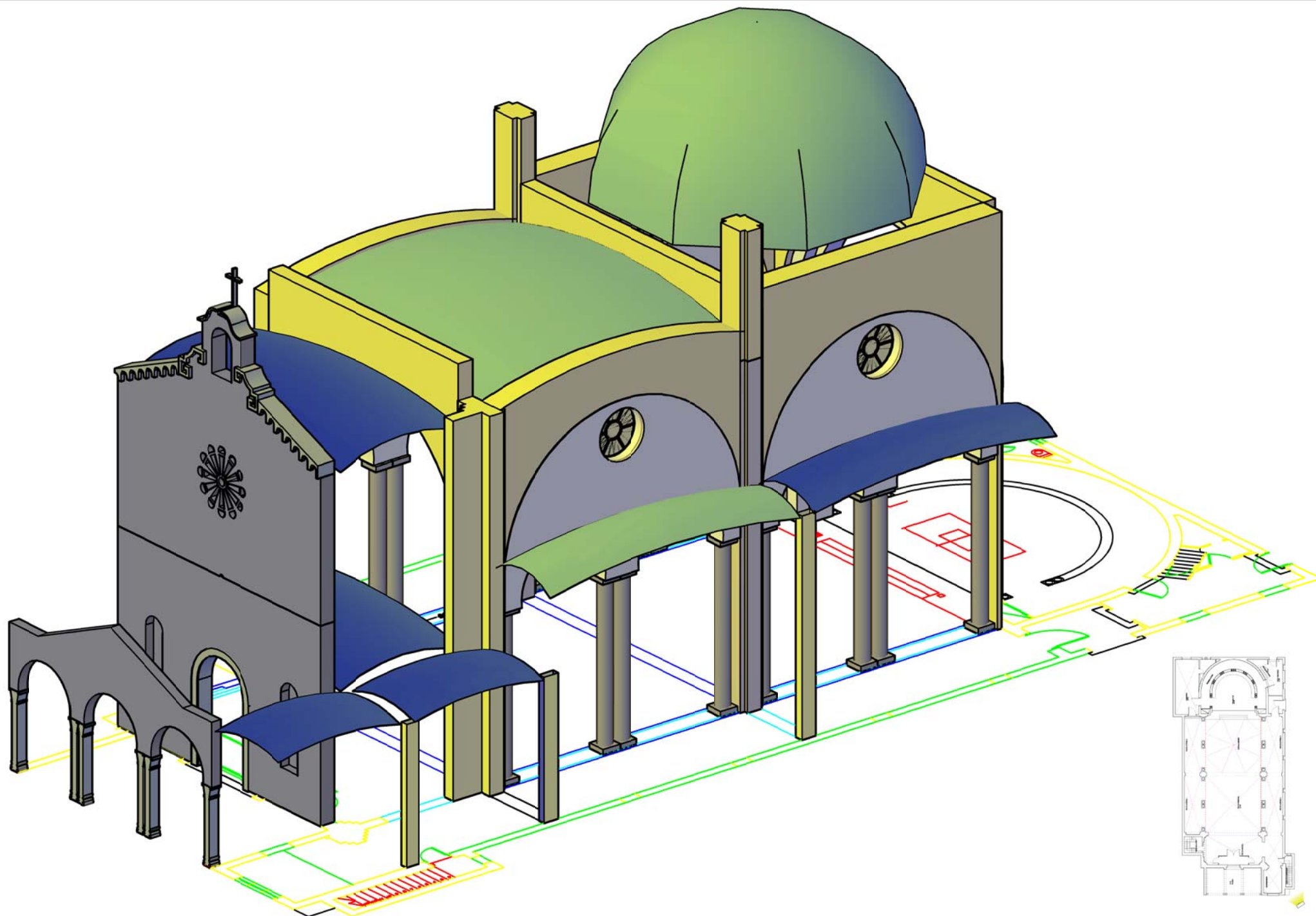


18.63

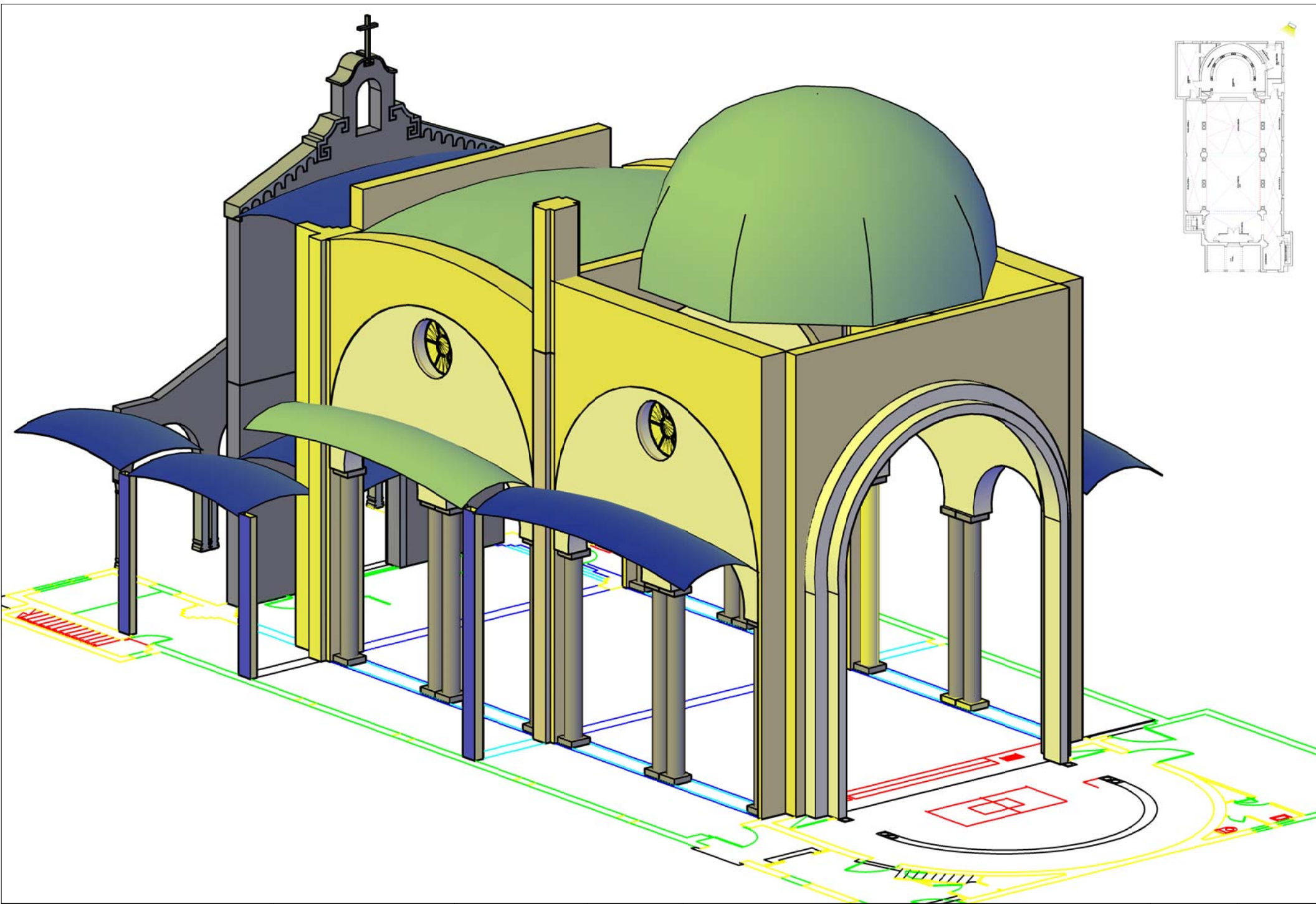


17.22

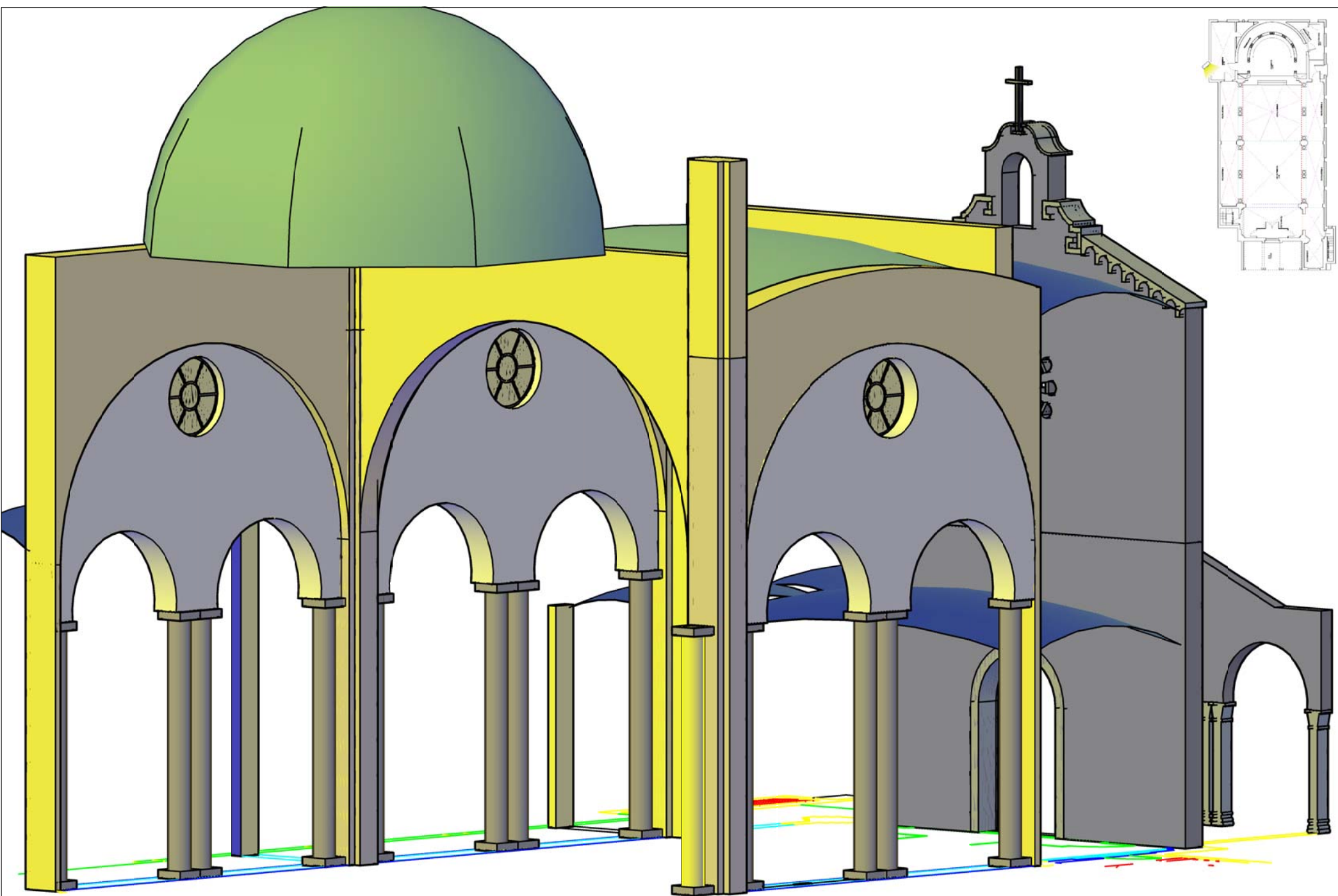
34.17



ESTUDIS:  ARQUITECTURA TÈCNICA	EDIFICI: ESGLÉSIA DE SANT NARCÍS	ALUMNES AUTORES DEL PROJECTE: ALBA ROMAGÓS AIRA AMÈLIA QUINTANA MATAMOROS	ESCALES: S/E ORIGINALS EN A-4	TÍTOL DEL PROJECTE: ANÀLISI ESTRUCTURAL DE VOLTES CERÀMIQUES I PATOLOGIES DE L'ESGLÉSIA DE SANT NARCÍS	NOM DEL PLÀNOL: VISTA ISOMÈTRICA 1	DATA: JUNY 2008	PÀG Núm.: 52
--	-------------------------------------	---	-------------------------------------	--	---------------------------------------	--------------------	-----------------



ESTUDIS:  Universitat de Girona	EDIFICI: ESGLÉSIA DE SANT NARCÍS	ALUMNES AUTORS DEL PROJECTE: ALBA ROMAGÓS AIRA AMÉLIA QUINTANA MATAMOROS	ESCALES: S/E ORIGINALS EN A-4	TÍTOL DEL PROJECTE: ANÀLISI ESTRUCTURAL DE VOLTES CERÀMIQUES I PATOLOGIES DE L'ESGLÉSIA DE SANT NARCÍS	NOM DEL PLÀNOL: VISTA ISOMÈTRICA 2	DATA: JUNY 2008	PÀG Núm.: 53
---	-------------------------------------	--	-------------------------------------	--	---------------------------------------	--------------------	-----------------



ESTUDIS:  Universitat de Girona	EDIFICI: ESGLÉSIA DE SANT NARCÍS	ALUMNES AUTORES DEL PROJECTE: ALBA ROMAGÓS AIRA AMÈLIA QUINTANA MATAMOROS	ESCALES: S/E ORIGINALS EN A-4	TÍTOL DEL PROJECTE: ANÀLISI ESTRUCTURAL DE VOLTES CERÀMIQUES I PATOLOGIES DE L'ESGLÉSIA DE SANT NARCÍS	NOM DEL PLÀNOL: VISTA ISOMÈTRICA 3	DATA: JUNY 2008	PÀG Núm.: 54
---	-------------------------------------	---	-------------------------------------	--	---------------------------------------	--------------------	-----------------



C. ANÀLISI CONSTRUCTIU

En aquest capítol es pretén estudiar la composició i ordre dels diferents elements constructius que formen l'edifici. Els dos primers apartats recullen les unitats constructives i l'ordre d'execució amb que es van dur a terme.

En el tercer i quart apartat s'exposen una sèrie de fotografies i detalls que ajuden a comprendre la descripció feta.

1. UNITATS CONSTRUCTIVES

Per tal d'entendre i conèixer l'edifici, és molt important analitzar quines parts el formen, les característiques d'aquestes i l'ordenació amb què es componen.

1.1. MOVIMENTS DE TERRES I FONAMENTACIÓ¹

Les excavacions de les rases s'hagueren de fer manualment degut a la deficiència de mitjans mecànics, fet que convertia aquest procés en una activitat lenta i difícil, sobretot si es volien aconseguir grans profunditats. Tanmateix, en la construcció de l'església això no fou un problema rellevant, ja que en estar edificada sobre terra argilosa de bona qualitat les fonamentacions projectades eren senzilles.

Cal remarcar que durant aquests treballs no es van extreure del terreny les rebasses dels arbres fruiters; això provocà posteriorment el creixement de nius de tèrmits en molts dels habitatges del grup.

Pel que fa a la fonamentació, és difícil descriure la tipologia i forma d'aquesta ja que els plànols originals de l'edifici no s'hi concreten, a més, l'església va ser força modificada durant la seva execució. Així que s'ha fet una hipòtesi en base al fons documental recollit. De la fonamentació es pot dir que el més probable és que estigui formada per sabates corregudes que no superen els 60 cm de gruix ni de fondària (el

¹ Veure apartat detalls constructius

nivell freàtic no permetia arribar a profunditats superiors a 1,5 m), formades per formigó ciclopi².

1.2. BASE DE FORMIGÓ EN PAVIMENTS

Per anivellar el terreny que ocupà l'església i fer una base uniforme per als paviments de plantes baixes, s'usà un tipus de formigó format per ciment, sorra, aigua i pedres de riu de la mida d'un puny, d'un gruix de 10 a 15 cm. Sobre aquesta base s'hi col·locà un paviment de mosaics hidràulics a truc de maceta i pres amb morter de ciment lent. El paviment de la zona ocupada pel cor es va fer amb el mateix tipus d'enrajolat, però la base és la solera que cobreix la volta.

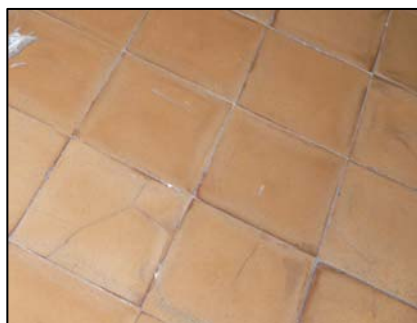


FIG 1: Paviment de mosaic hidràulic col·locat en l'església

La zona d'entrada de l'església ha estat adaptada per facilitar l'accés als minusvàlids, eliminant les escales que existien i donant un cert pendent al paviment, format per pedra calcària de Sant Vicenç.

El paviment del presbiteri és diferent al de la resta de la planta baixa, ja que s'ha canviat per un revestiment de marbre.

1.3. PARETS

Per les fotografies obtingudes es pot observar que, a diferència de les cases del Grup Sant Narcís, l'església es va construir amb totes les parets de 30 cm ja que aquestes havien de ser més massisses i consistentes per aguantar les alçades aconseguides.

Les parets estan formades per un doble envà de maó foradat de 4 x 14 x 29 amb les peces col·locades de cantell, i reomplert amb formigó ciclopi. Els dos envans s'unien amb maons col·locats transversalment cada quatre filades aproximadament, i cada metre en el sentit longitudinal; aquesta composició rep el nom de paret de maó a la caputxina o paret buida.

² Mescla de grans pedres amb formigó en massa per tal de reduir la quantitat de conglomerant utilitzat, en aquest cas elaborat mitjançant formigoneres.

Les parets exteriors del campanar, al ser vistes, tenen una composició diferent; disposen d'una fulla interior de maó foradat de mides 4 x 14 x 29 cm amb les peces col·locades de cantell, una capa intermèdia de formigó ciclopi, i una fulla exterior de maó massís de cara vista de mides 5 x 14 x 29 col·locades de pla.

1.4. ARCS³

En l'edifici es troben diferents tipus d'arcs. Aquest element constructiu hi és molt present amb la finalitat d'obtenir un espai ampli sense divisions, propi d'un temple religiós. Aquests arcs són:

- a) Transversalment a la nau i al transsepte s'hi disposen arcs de mig punt⁴ (nivell A en els plànols i els detalls). Aquests estan formats per 3 filades de maó foradat de 4 x 14 x 29 cm col·locats en pla i seguint la curvatura de l'arc, descansant sobre els mateixos pilars ceràmics que els arcs de nivell B.

Llum: 7,76 m

Fondària: 0,46 m

Fletxa: 3,88 m

Cantell (aprox.): 0,25 m

- b) El nivell B el formen arcs de mig punt. Aquests estan formats per 5 filades de maó foradat de 4 x 14 x 29 col·locats en pla i seguint la curvatura de l'arc. Es troben situats sobre els arcs nivell C i descansen sobre pilars ceràmics.

Llum: 7,88m

Fondària: 0,76 m

Fletxa: 3,94 m

Cantell (aprox.): 0,25 m

- c) Al llarg de la nau i el transsepte hi han disposats uns arcs peraltats⁵ que es recolzen sobre pilars de pedra natural. Es pot veure amb força facilitat la formació i disposició de les peces degut a la mala qualitat del material que conforma el revestiment, d'aquesta manera es pot observar que els arcs estan formats per una primera filada feta amb maó de 4 x 14 x 29 foradat col·locat en

³ Veure apartat detalls constructius

⁴ La característica que defineix un arc de mig punt és que l'altura de la seva fletxa és igual que la meitat de la llum d'aquesta.

⁵ La característica que defineix un arc com a peraltat és que l'altura de la seva fletxa és major que la meitat de la llum d'aquesta.

pla i seguint la curvatura de l'arc, sobre aquesta, 3 filades més (en algun arc s'hi han realitzat 4 filades), formant una paret doble i de 30 cm de gruix amb maons de 4 x 14 x 29 foradats i col·locats de cantell seguint la mateixa curvatura.

Llum: 2,82 m

Fondària: 0,56 m

Fletxa: 1,41 m

Cantell (aprox.): 0,55 m

- d) Situat al cancell de l'edifici hi ha un arc (nivell D) que sustenta la volta que forma la planta sobre el qual hi ha el cor. Aquesta part és un afegit que no consta en el plànol original.

L'arc està situat transversalment al transsepte de l'església i la seva forma el·líptica ve donada per l'amplitud de l'obertura i la baixa alçada de la volta. El componen 3 filades de maó foradat de 4 x 14 x 29 cm col·locats en pla i seguint la curvatura de l'arc, que descansen sobre pilars ceràmics.

Llum: 7,76 m

Fondària: 0,47 m

Fletxa: 1,30m

Cantell (aprox.): 0,15 m

- e) Per últim, hi han els arcs de mig punt situats al cancell i al confessionari. Estan formats per tres filades de maó foradat de 4 x 14 x 29 cm col·locats en pla i seguint la curvatura de l'arc, que descansen sobre pilars ceràmics. La poca importància que tenen en el conjunt de l'edifici no requereix que es faci una descripció de les seves característiques geomètriques.

1.5. PILARS CERÀMICS I DE PEDRA ARTIFICIAL

1.5.1. Ceràmics

L'ús dels pilars ceràmics permet la construcció d'un gran espai diàfan dins l'església. Aquests presenten una característica curiosa: al contrari del que es podria pensar la ceràmica no està col·locada en pla i suportant per si sola els esforços que rep a compressió, sinó que gràcies a les fotografies recollides s'ha observat que les peces, massisses i de dimensions 5 x 14 x 29, estan col·locades de cantell i amb reomplert de

formigó ciclopi per la seva cara interior, seguint la mateixa tipologia d'execució que les parets de càrrega.

Aquest fet constata un dels principis de la construcció de l'arquitecte Ignasi Bosch, que buscà la mínima quantitat de material sense deixar de banda la qualitat de la construcció.

1.5.2. Pedra artificial

Els pilars de pedra artificial tenen una ànima de formigó ciclopi de 33 cm i un revestiment de pedra artificial de 3,5 cm de gruix, cada una de les peces que conforma el revestiment té una alçada de 46 cm.

Els pilars es disposen sobre bases rectangulars fetes del mateix material de 56 x 56 cm. Els capitells d'aquests, també s'han realitzat a partir de bases rectangulars de les mateixes dimensions i material.

Cal remarcar que aquests pilars tenen forces patologies. Presenten una petita deformació cap a l'exterior en la segona i tercera peça des de la base; algunes d'elles fins i tot s'han obert degut als esforços de compressió al que estan sotmeses⁶.



FIG 2: Pilar de pedra artificial

1.6. VOLTES DE MAÓ DE PLA

Aquestes voltes són l'element característic del grup Sant Narcís i l'objecte principal d'aquest PFC. Abans de procedir a descriure-les, és important explicar que si es comparen els plànols originals del projecte amb l'estat real de l'església, es pot comprovar que les voltes laterals de la nau principal són més grans del que s'havien projectat inicialment, cobrint l'espai amb una de sola quan s'havien previst dues; a més, tampoc constava en els plànols originals l'execució del primer tram, on hi ha situat el cor i l'entrada principal de l'edifici.

⁶ L'explicació de l'origen ve determinat en l'apartat de patologies.

Les voltes de l'església i en general les de tot el grup, estan formades per un sol gruix de totxo foradat de 4 x 14 x 29 col·locat de pla i longitudinalment a l'aresta més llarga de l'espai que volten. Habitualment, la primera filada era feta amb pasta de guix o morter de guix, podent treballar sense encavallada, amb l'ajut simple de les cordes que definien les corbes de la volta. Posteriorment s'empastaven les cantonades de la volta amb ciment lent, formant uns peus triangulars de gran resistència. Els punts de recolzament d'aquestes en l'edifici estudiat són els pilars ceràmics.

Els cindris utilitzats per donar forma, tal i com es poden veure en les fotos adjuntades, eren molt simples, seguint la línia de baix cost que es volia aconseguir.

A continuació s'exposa de forma més concreta l'execució de les voltes que hi han a l'església.

a) Formació de la volta cor, confessionari i restants

Les voltes que no estan situades sota coberta i que com a tal formen part de la formació d'un altre planta tenen dos processos d'execució per tal d'arribar a formar el nivell de paviment.

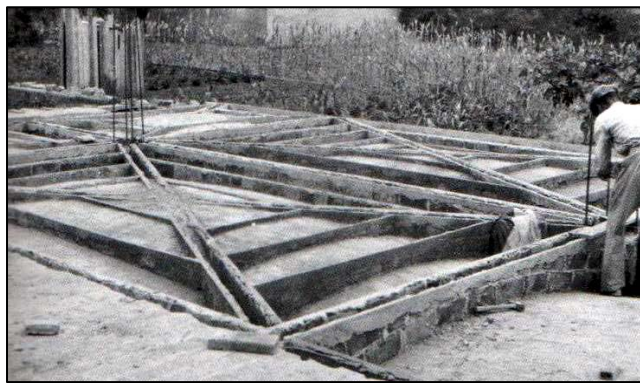


FIG 3: Execució de les diagonals i dels envanets a trencajunts.

Així, doncs, un cop executada la volta es formaven quatre envanets a trencajunts de maó foradat i dimensions 4 x 14 x 29, de forma sensiblement triangular, seguint la direcció de les diagonals. Aquests s'enrasaven amb la volta en el seu punt central (punt on té més alçada la volta), com es pot veure en la fotografia.

Seguidament es construïen uns envanets semblants, entre diagonals i paral·lels als costats de la volta, separats entre ells en una distància de 60 cm. Sobre els quals s'hi disposaven els mateixos maons col·locats en pla, formant la solera. D'aquesta manera s'aconseguia uniformar la base per col·locar-hi el paviment. La càmera entre la solera i el paviment es reomplia amb material lleuger, com per exemple grava volcànica.



FIG 4: Grava volcànica trobada en el campanar de l'església

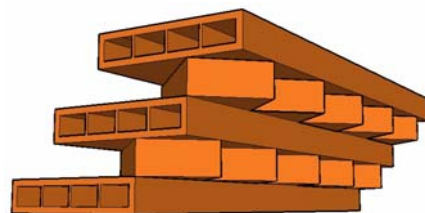
Segons el fons de documentació que s'ha obtingut, aquelles voltes situades sota un forjat i just en el punt on aquesta es recolza sobre l'envà, s'hi col·locava un cable d'ascensor envoltat de formigó ciclopi en tot el perímetre que feia la funció de cèrcol. Un cop finalitzada la volta es tensava cada un dels quatre cables amb la fi de donar-li consistència.

En alguns llocs, com ara el campanar, la capa d'acabat del paviment la conforma la mateixa solera. Segurament es va creure oportú fer-ho així per que és un lloc que els feligresos no freqüenten, tanmateix aquesta deficiència ha conduït a que aquest conjunt de volta i paviment patís un desgast accelerat.

b) Formació voltes sota coberta:

En el cas de les voltes de sota una coberta el procés és diferent. Un cop les voltes havien estat executades, es procedia a la formació dels envanets conillers de maó foradat de 4 o 5 cm, separats uns 80 cm entre ells i col·locats a trencajunts, seguint la pendent de la coberta. Aquests suporten la solera feta del mateix material però disposant els maons en pla, amb la fi de formar la base per a la col·locació de la teula ceràmica. La teula conforma la capa d'acabat de la coberta. És important remarcar que les soleres no queden lligades a les parets perimetrals, amb la fi de permetre la ventilació de les voltes.

Pel que fa als tirants, a les voltes de sota coberta s'hi col·locaven unes barres de ferro tou en llocs dels cables d'ascensor que ja s'havien esmentat. Es feia aquesta elecció perquè es considerava que al estar sotmeses a càrregues uniformes i esforços constants no requerien que es tensessin.



A més, a tot el vol de la coberta s'hi executaven ràfecs formats per la diferent disposició de maons massissos en pla. En l'espai deixat entre el ràfec i l'envà interior normalment s'hi col·locaven les barres de ferro tou envoltades de formigó.

c) Formació volta transsepte

Tal i com es pot apreciar en les fotos exposades en l'apartat de fotografia d'aquest mateix capítol, el procés constructiu de la volta semiesfèrica es va dur a terme un cop s'hagué acabat l'edifici.

El primer pas, previ a l'execució de la cúpula, fou aixecar els contraforts. Posteriorment es passà a realitzar la paret exterior de maó foradat de la cúpula, amb les peces col·locades en pla. Alhora, s'executaren les quatre trompes que formen el pas de la base quadrada del creuer a la octogonal de la cúpula, situades a la part interior de l'edifici.

Un cop fet aquest pas, es passà a formar l'encavallada de fusta, que seria de gran estabilitat per tal de suportar el pes del material mentre la volta no estigués finalitzada. Aquesta encavallada permetia executar la cúpula en vuit costats.

Després es procedí a executar les obertures, també de maó ceràmic i amb dintell d'arc de mig punt. Aquestes tan sols són un element decoratiu visible des de l'exterior, ja que la pròpia volta no permet que siguin visibles des de l'interior de l'edifici. Al mateix temps s'executaren els vuit costats que conformen la cúpula, col·locant el maó en pla.

Un cop acabada la cúpula, es procedí a fer el segon tram de paret exterior fins arribar a l'alçada on s'inicia la coberta.

d) Voltes d'escala

A l'església hi ha varies escales que donen accés a diferents nivells de l'edifici, però aquestes no es conserven en gaire bon estat.

Les escales estan formades per voltes d'uns sola capa de totxo foradat de 4 x 14 x 29, col·locats en pla. Els esglaons es van formar amb el mateix tipus de peça. L'espai confinat entre els esglaons i la volta es va reomple amb grava volcànica; s'utilitzà aquest material per que té una densitat molt baixa i consegüentment s'aconsegueix un reomplert que pesa poc.

e) Voltes absis

Situada a la capçalera de l'edifici, és de forma semiesfèrica i amb una obertura de 180°. La volta de l'absis, també coneguda com absidiola, tanca el temple per darrera i alhora encercla l'altar.

Està formada amb maons foradats de 4 x 14 x 29 col·locats en pla i seguint la curvatura de la volta. Sobre l'absis hi ha un corredor que travessa els envanets de sostre mort que sustenten la coberta. Aquest corredor segueix la forma semiesfèrica i es va construir amb la pretensió de que es pogués fer servir pel manteniment; en l'actualitat ha perdut tota la funcionalitat degut a la poca accessibilitat que hi ha.

Sobre la volta de l'absis hi ha un passadís que travessa els envanets de sostre mort de la coberta que suporta, i que segueix la forma corbada de l'element.

1.7. COBERTA

La coberta de l'església és a dues aigües, exceptuant la part de l'absis, on hi ha una coberta estrellada. Les cobertes de l'església es formen a partir de l'execució dels envanets conillers, situats sobre la volta i amb maons foradats de 4 x 14 x 29 col·locats de cantell. Sobre els envanets s'executà la solera, feta del mateix material. Finalment es col·locà la teula àrab aferrada amb morter.

1.8. ELEMENTS DECORATIUS

L'església és de caràcter auster, propi de la misèria de l'època de quan es construí, amb el que no hi han gaires adorns. Un dels pocs elements decoratius rellevants i disposat en els anys que es construí és la "rosassa" situada a la façana, la forma de la qual la dóna la mateixa paret, a diferència de les grans esglésies on la forma d'aquestes sol venir donada per la composició dels vitralls. Cal dir que actualment la capa d'enguixat i pintat és tan pobre que deixa traspasar les juntes de morter.



1.9. ACABATS

Els paraments interiors estan enguixats amb guix blanc i acabats amb una capa de pintura a la calç o a la cola. Els paraments exteriors estan arrebossats amb acabat esquerdejat o arremolinat amb morter de ciment lent o a la calç i posteriorment encalcinat.

2. PROCÉS CONSTRUCTIU⁷

A continuació s'exposa el procediment constructiu que es va seguir per a la construcció de l'edifici.

- a) Moviments de terres
 - Neteja i desbrossament del terreny.
 - Anivellació del terreny.
 - Execució de rases de fonamentació, amb mitjans manuals i mecànics.
- b) Fonamentació
 - Formigonat de les rases corregudes.
- c) Aixecament de la totalitat del campanar
 - Execució de les parets de totxo massís.
 - Execució de la fulla interior de maó foradat de cantell a mida que s'executen les voltes d'escala, que recolzen sobre aquesta paret interior.
 - Execució de la coberta.
- d) Parets
 - Aixecament de la façana principal.
 - Aixecament de la resta de parets interiors, exteriors i pilars ceràmics. A la hora que es formen els diferents arcs i voltes (verifica't segons documentació fotogràfica). A mesura que es realitzen els arcs, també es formen els pilars metàl·lics.

⁷ Molta part d'aquest procés queda verifica't per la documentació fotogràfica.



e) Voltes

- Execució de les voltes de les distribucions laterals de les naus de l'església.
- Execució de la volta de la capella de diari.
- Execució de la volta de l'absis.
- Execució de la volta de la nau central.
- Execució de la volta de la zona destinada al cor.

f) Coberta i revestiment de la volta del cor

- Formació de les parets en diagonal dels carcanyols de les voltes.
- Formació d'envanets sencers, amb una separació entre ells d'uns 60 cm.
- Execució solera horitzontal sobre el deambulatori i la volta que forma el nivell del cor.
- Formació d'envanets de sostre mort sobre de la solera horitzontal de la zona superior del deambulatori, amb una separació entre ells de 60 cm. Alhora s'executa el passadís que circumval·la aquest tram.
- Formació de ràfec:
 - 1a filada de totxo massís a 45°, volant uns 10 cm de la façana.
 - 2a filada de rajola fina de 2 cm, col·locada a sobre de l'anterior i volant uns cm de l'anterior filada.
 - 3a filada de totxo massís a 45°, volant uns 5 cm de l'anterior.
 - 4a filada de rajola fina de 2 cm, col·locada a sobre de l'anterior i volant uns 5 cm de l'anterior filada.
- Col·locació de la solera inclinada, que servirà de suport per a la teula.
- Col·locació de canal exterior.
- Col·locació de teula àrab.

g) Cúpula

- Un cop s'ha executat la totalitat de la coberta es procedeix a l'execució de la volta semiesfèrica, situada sobre el transsepte de l'església. Acabada la cúpula es realitza la part de coberta situada sobre.



h) Revestiment interior

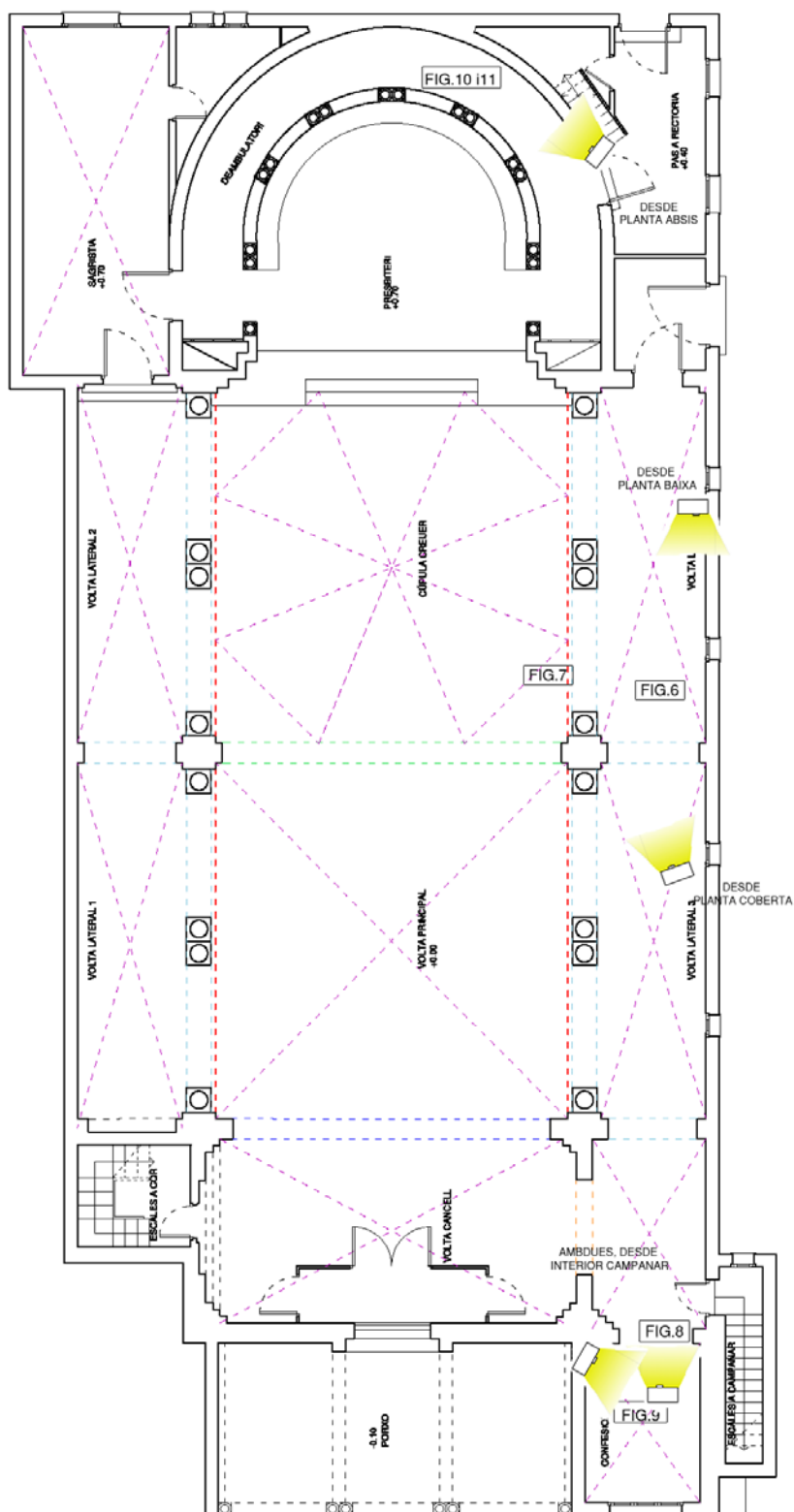
- Enguixat interior.
- Col·locació del paviment d'acabat.
- Pintura a la calç o a la cola.

i) Revestiment exterior

- Arremolinat amb morter de ciment lent o amb morter de ciment a la calç.
- Blanquejat exterior a la calç.

3. FOTOGRAFIES

A continuació es mostren una sèrie de fotografies per tal de completar la informació aportada en els apartats anteriors. Per tal d'identificar la situació des d'on s'han pres, es mostra la següent planta de l'església:



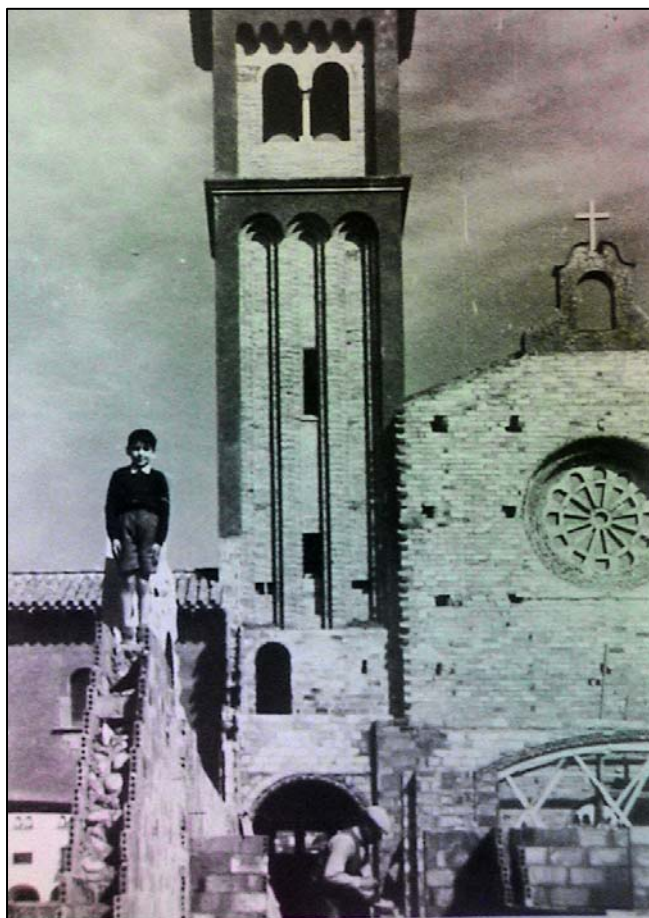


FIG 6: En la foto de la dreta es mostra una l'execució de l'església vista des de dins d'aquesta. Es pot observar en primer terme la paret exterior de doble fulla de maó foradat col·locat de cantell amb peces a través per tal de lligar la paret, i reomplerta de formigó ciclopi. En segon terme hi ha un manobre executant un mur ceràmic, amb les peces també de cantell. Ja més al fons és veu l'ús d'un cindri per a l'execució d'uns dels arcs.

A més, es pot comprovar que l'execució de les voltes, arcs i parets que conformen el cos principal de l'edifici, no s'iniciaren fins un cop finalitzats el campanar i la façana principal.

Font: Les voltes de quatre punts, 2004.

FIG 7: A la foto situada al peu del comentari es veu la construcció de la cúpula de l'església amb l'ús d'una gran encavallada per tal de donar forma a partir d'una base octogonal. Es pot comprovar que a mesura que s'executava la part interior de l'element, s'alçava la paret de tancament exterior; en aquest cas les obertures. També es pot comprovar que es procedí a l'execució de la cúpula un cop ja s'havia finalitzat la coberta.

Font: Les voltes de quatre punts, 2004.

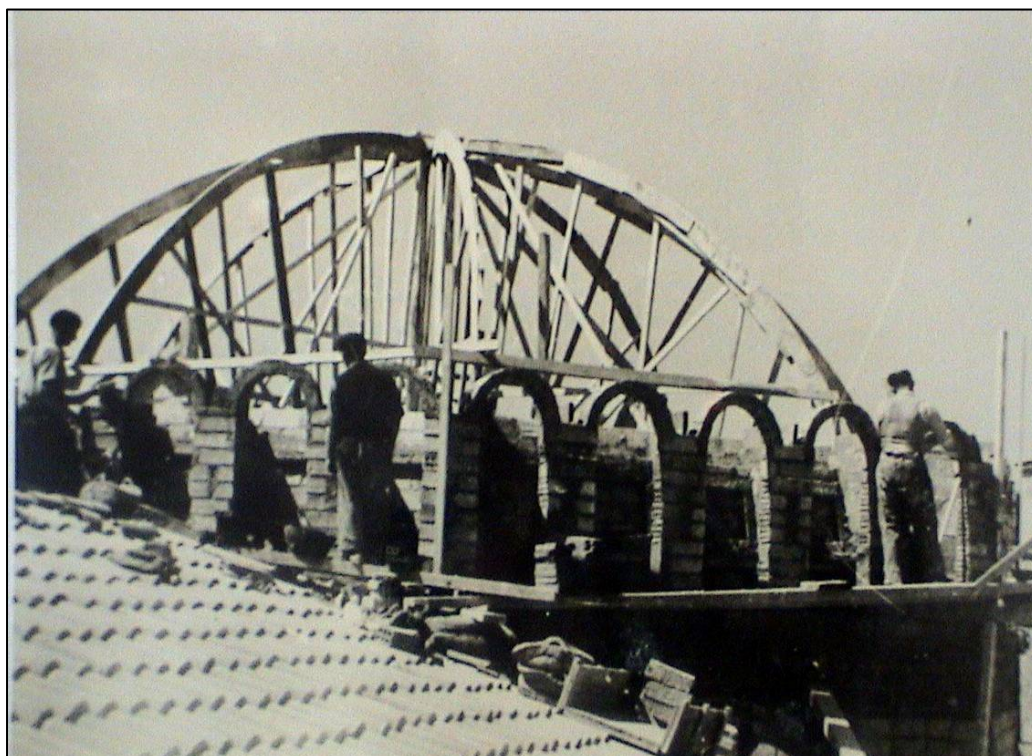




FIG 8: La foto de dalt a la dreta està presa des de l'interior del campanar, en un petit forat que connecta amb la coberta però a la qual no s'hi pot accedir ja que queda "tapiada" pels envanets de sostre mort, que s'aprecien al fons de la foto. Tanmateix, en primer terme es poden veure les diferents fulles que componen el tancament del campanar, que s'han descrit anteriorment. Font: Fotografia pròpia.

FIG 9: A la fotografia de dalt a l'esquerra es mostra l'estat en que es troba la part més alta del campanar; com ja s'ha dit la solera que conforma el nivell d'aquest últim replà ha quedat malmès i la part superior de la volta es troba totalment exposada a l'intempèrie. Tanmateix serveix per comprovar l'execució i material de la solera, i el reomplert interior de la volta. Font: Fotografia pròpia

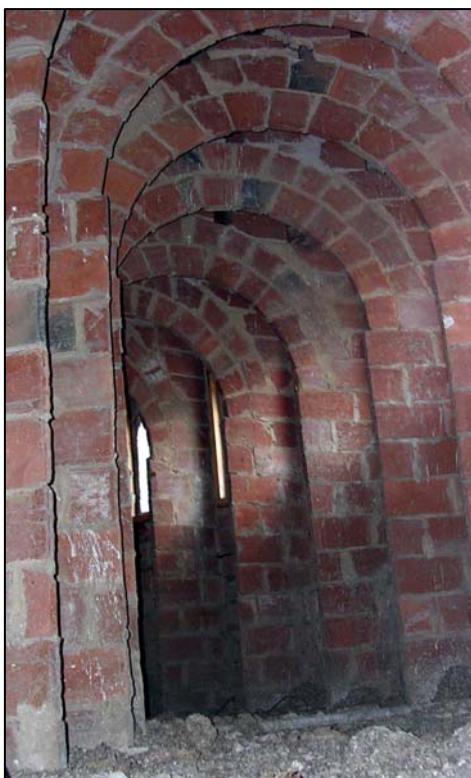
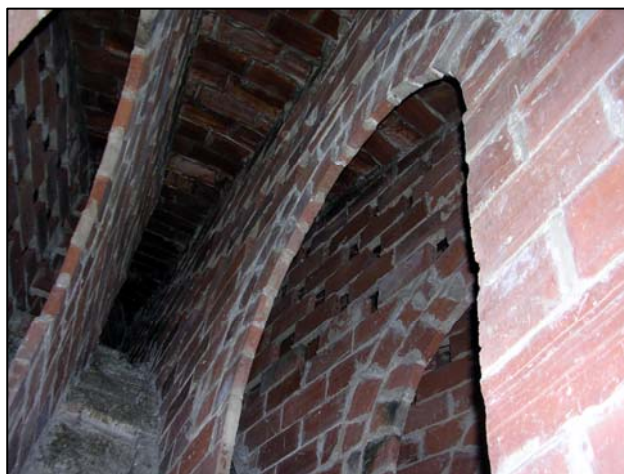


FIG 10: En la fotografia de l'esquerra es pot observar el corredor que circumval·la el nivell superior del deambulatori, i que obre pas a través dels envanets conillers que sustenten la coberta mitjançant obertures en forma d'arc. Font: Fotografia pròpia.

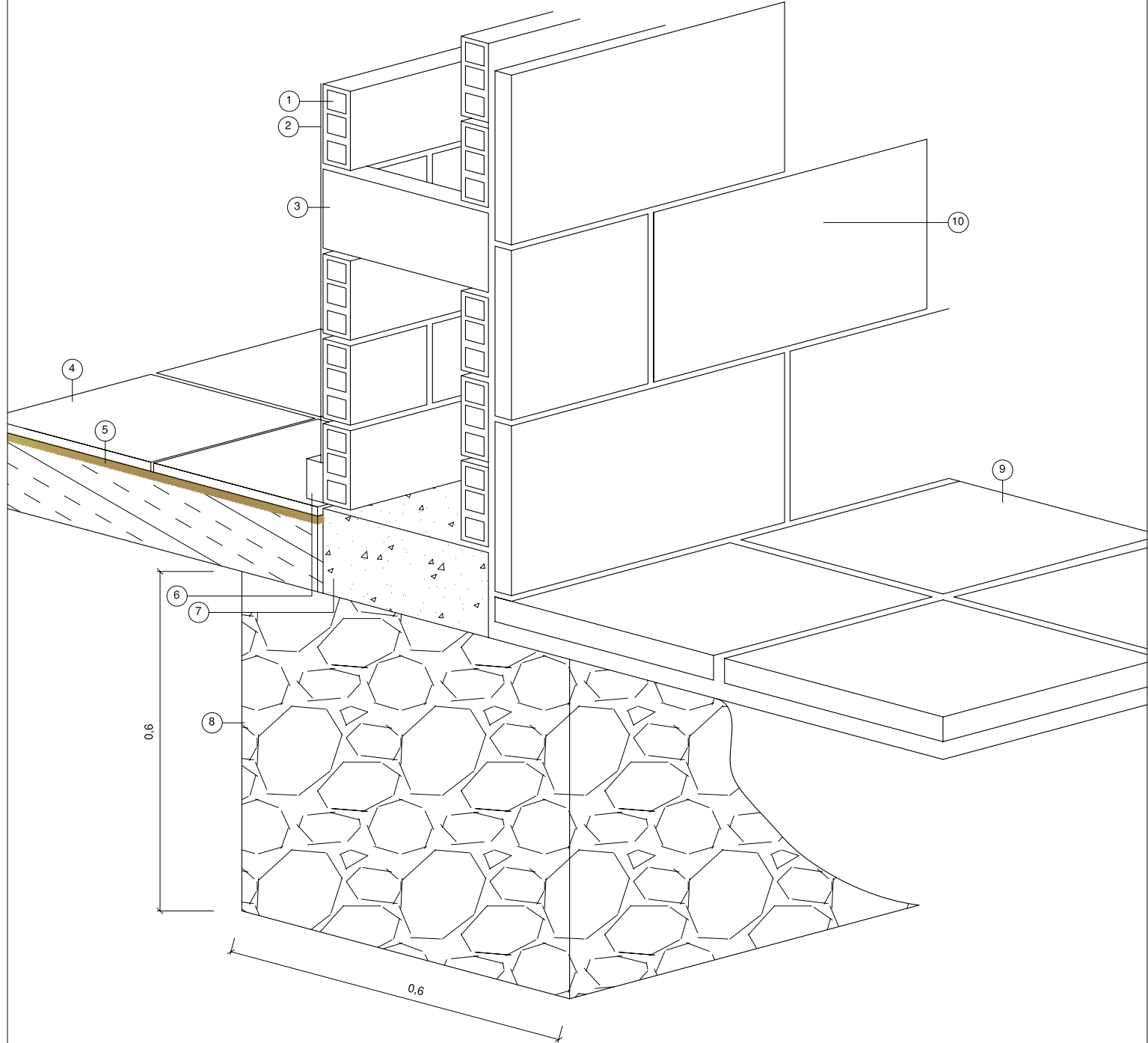
FIG 11: La fotografia situada al peu del comentari, mostra el mateix que s'ha citat en l'anterior però des d'un altre angle, de manera que es pot observar les obertures dels envanets conillers, la solera que sustenten situada sobre d'aquestes, i ja en la part inferior la curvatura del tram final de l'absis. Font: Fotografia pròpia.



4. DETALLS CONSTRUCTIUS

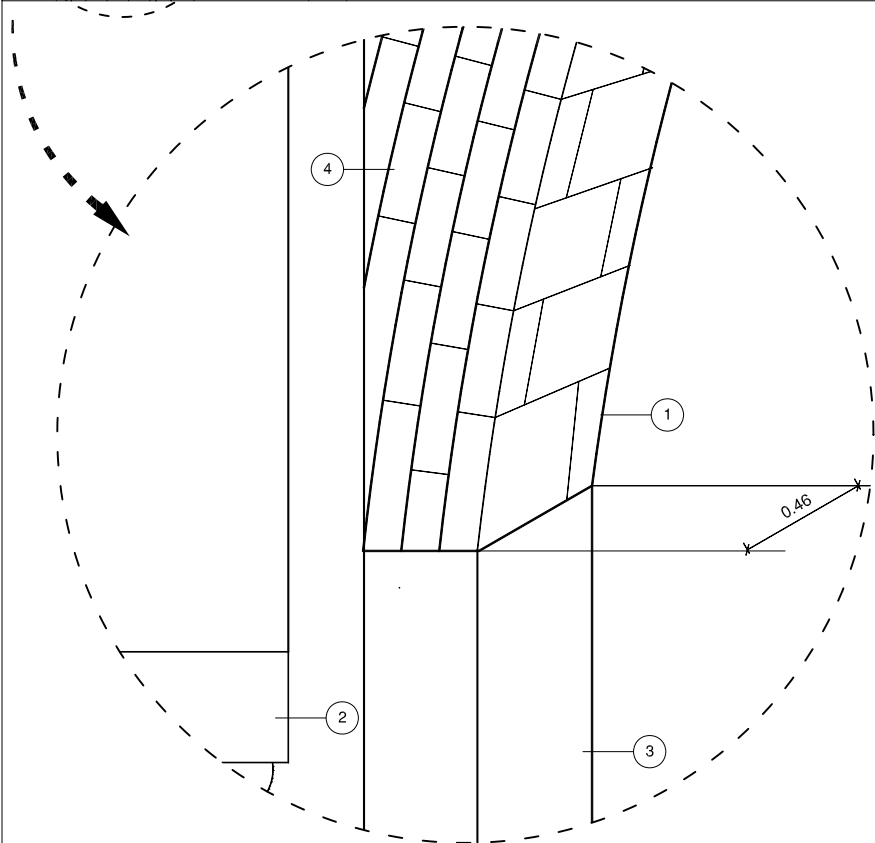
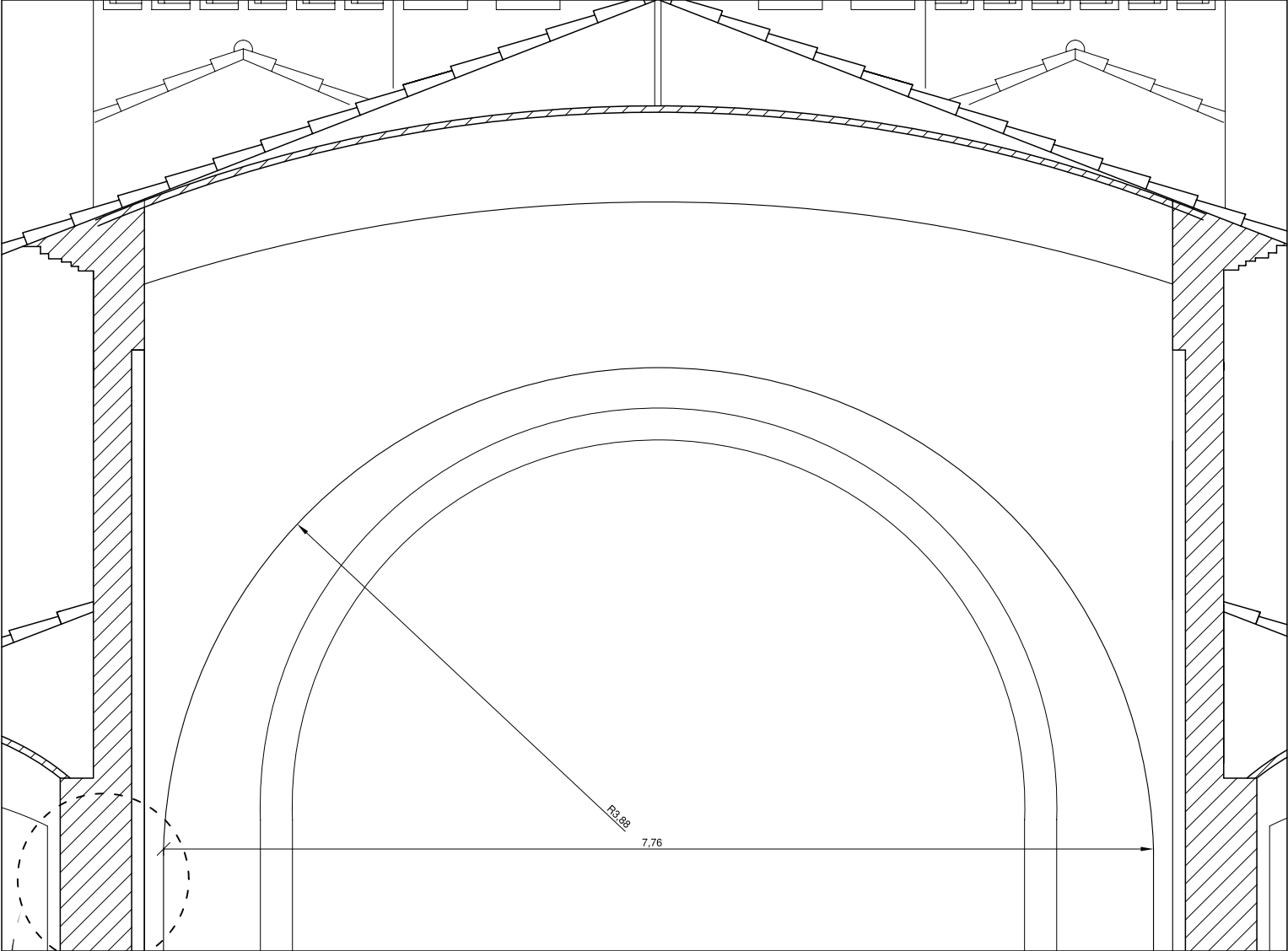
DETALL SISTEMA CONSTRUCTIU DEL FONAMENT I LA PARET DE CÀRREGA DE L'ESGLÉSIA

*E: 1/10



- 1 MAÓ FORADAT CERÀMIC DE 4 x 14 x 29 cm, COL·LOCAT DE CANTELL I AFFERAT AMB MORTER, LA JUNTA ÉS DE 0,5 cm APROXIMADAMENT
- 2 ENGUIXAT INTERIOR, D'1,5 cm
- 3 MAÓ FORADAT CERÀMIC DE 4 x 14 x 29 cm, COL·LOCAT TRANSVERSALMENT A LA PARET CADA QUATRE FILADES, I CADA METRE APROXIMADAMENT
- 4 PAVIMENT DE MOSAIC HIDRÀULIC, COL·LOCAT A TRUC DE MACETA I PRES AMB MORTER DE CIMENT LENT
- 5 BASE D'ANIVELLAMENT, FORMAT PER SORRA, CIMENT, AIGUA I PEDRES DE RIU
- 6 SÒCOL, DEL MATEIX MATERIAL QUE EL PAVIMENT
- 7 BANQUETA DE FORMIGÓ
- 8 FONAMENT FORMAT PER SABATA CORREGUDA, EXECUTADA AMB FORMIGÓ CICLOPI
- 9 PAVIMENT EXTERIOR DE TERRATZO
- 10 APLACAT EXTERIOR DE PEDRA, D'UN METRE D'ALÇADA

DETALL ARC NIVELL A, DE MIG PUNT
*E: 1/50 i 1/10

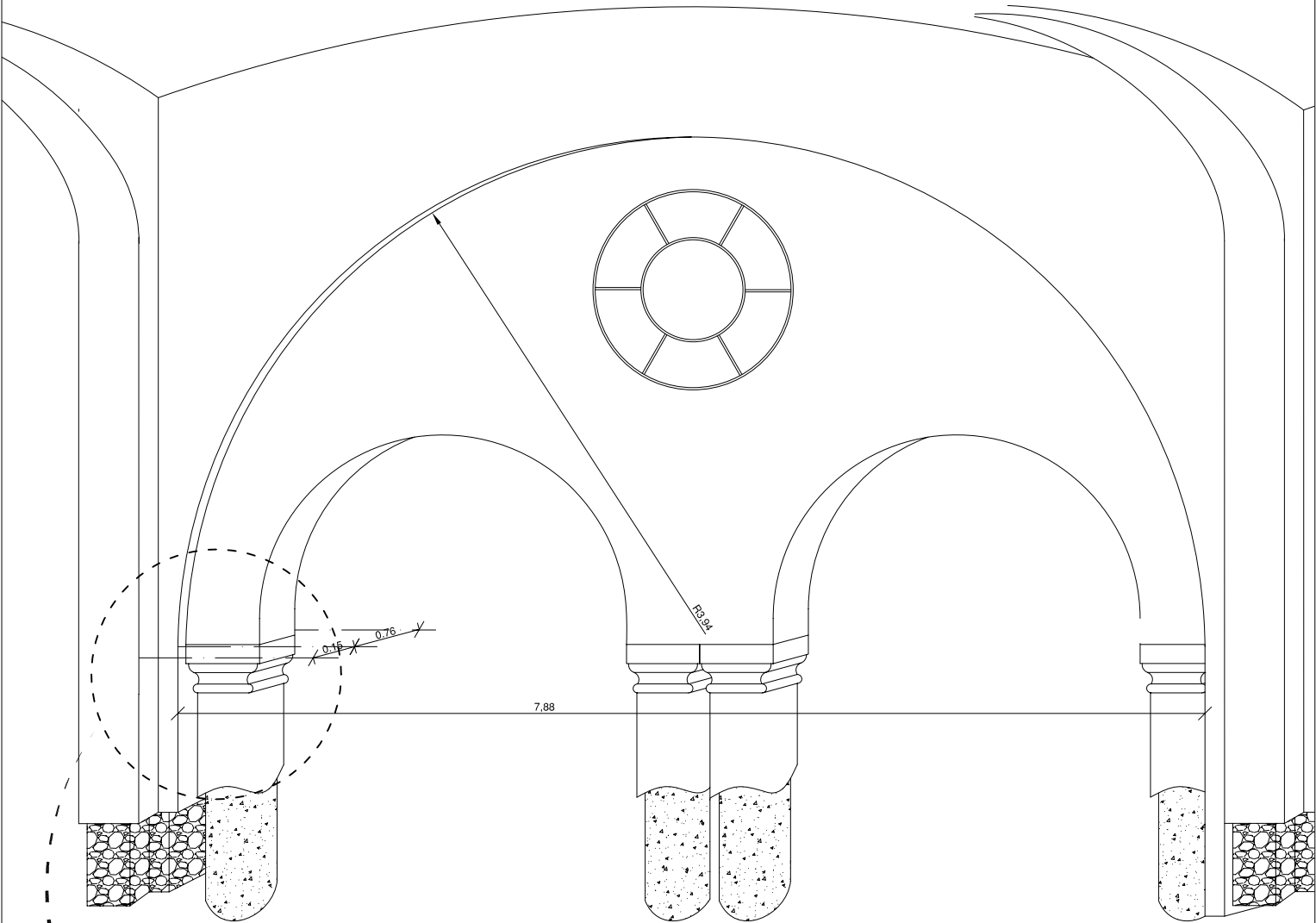


ZONA DETALLADA

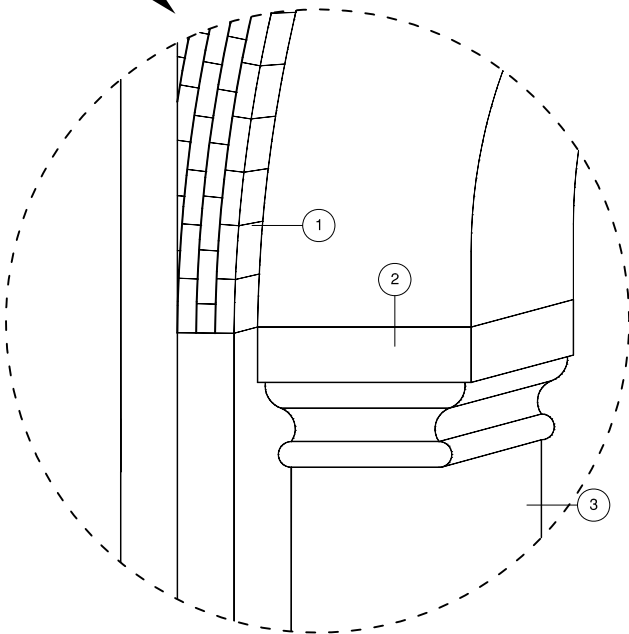
- 1 MAÓ FORADAT CERÀMIC DE 4 x 14 x 29 cm, COL·LOCAT EN PLA I AFFERAT AMB MORTER
- 2 COLLARÍ DEL PILAR METÀL·LIC, DECORAT AMB MOTIUS FLORALS
- 3 PILAR CERÀMIC EXECUTAT AMB ELS MAÓ MASSIS COL·LOCAT DE CANTELL
- 4 ARCS DE 56 cm DE GRUIX, FORMATS PER CINQ FULLES DE MÃO FORADAT CERÀMIC, COL·LOCAT EN PLA, DE 4 x 14 x 29 cm, i REOMPLERT AMB FORMIGÓ CICLOPI

DETALL ARC NIVELL B, MIG PUNT

*E: 1/50 i 1/20



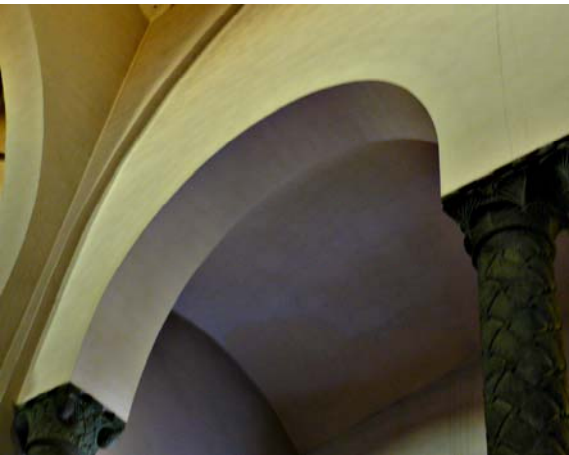
- 1 MAÓ FORADAT CERÀMIC DE 4 x 14 x 29 cm, COL·LOCAT EN PLA I AFFERAT AMB MORTER
- 2 COLLARÍ DEL PILAR, DECORAT AMB MOTIUS FLORALS
- 3 PILAR DE SECCIÓ RODONA DE PEDRA NATURAL DE 3,5 cm DE GRUIX, REOMPLERT AMB FORMIGÓ CÍCLOPI
- 4 ARCS DE 76 cm DE GRUIX, FORMATS PER CINQ FULLES DE MAÓ FORADAT CERÀMIC, COL·LOCADES EN PLAL, DE 4 x 14 x 29 cm, I REOMPLERT AMB FORMIGÓ CÍCLOPI



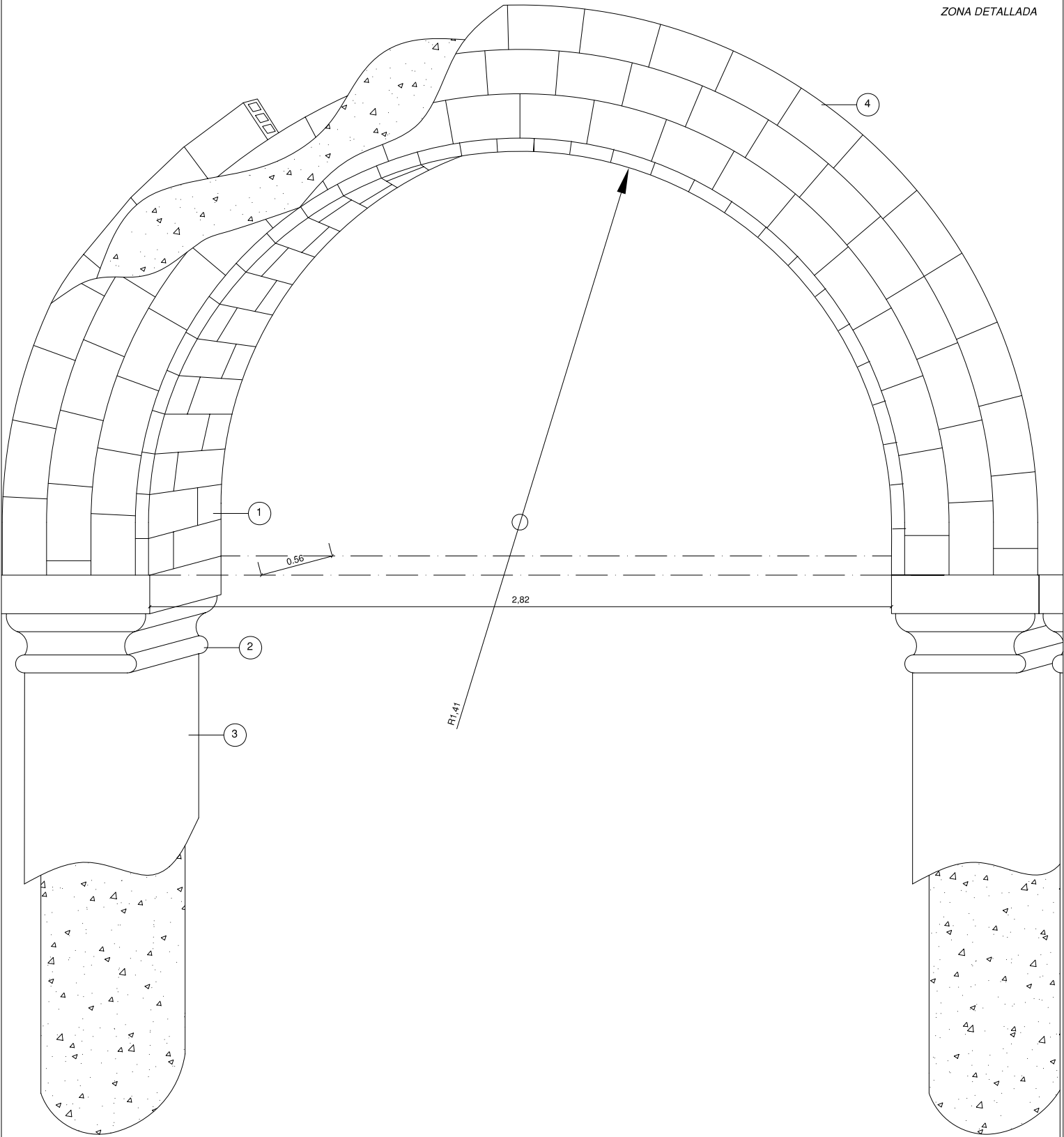
ZONA DETALLADA

DETALL DE L'ARC DE NIVELL C, PERALTAT.
*E: 1/20

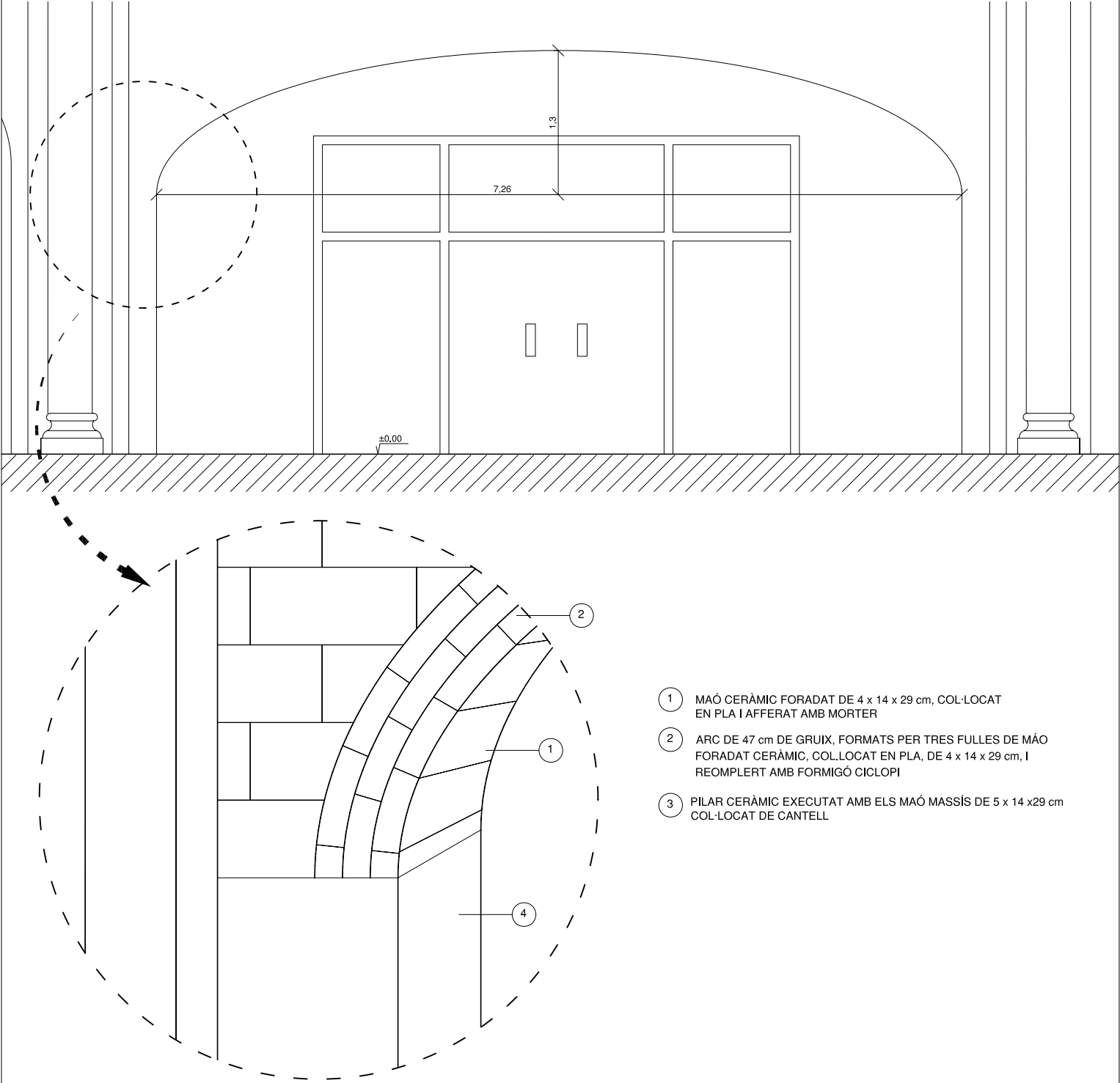
- 1 MAÓ FORADAT CERÀMIC DE 4 x 14 x 29 cm, COL·LOCAT EN PLA I Afferat amb MORTER
- 2 COLLARI DEL PILAR, DECORAT amb MOTIUS FLORALS
- 3 PILAR DE PEDRA NATURAL DE 3,5 cm DE GRUIX, REOMPLERT amb FORMIGÓ CICLOPI
- 4 ARC DE 30 cm DE GRUIX, FORMATS PER DUES FULLES DE MAÓ FORADAT CERÀMIC, COL·LOCAT DE CANTELL, DE 4 x 14 x 29 cm, I REOMPLERT amb FORMIGÓ CICLOPI



ZONA DETALLADA



DETALL ARC NIVELL D, EL·LÍPTIC.
*E: 1/50 i 1/10



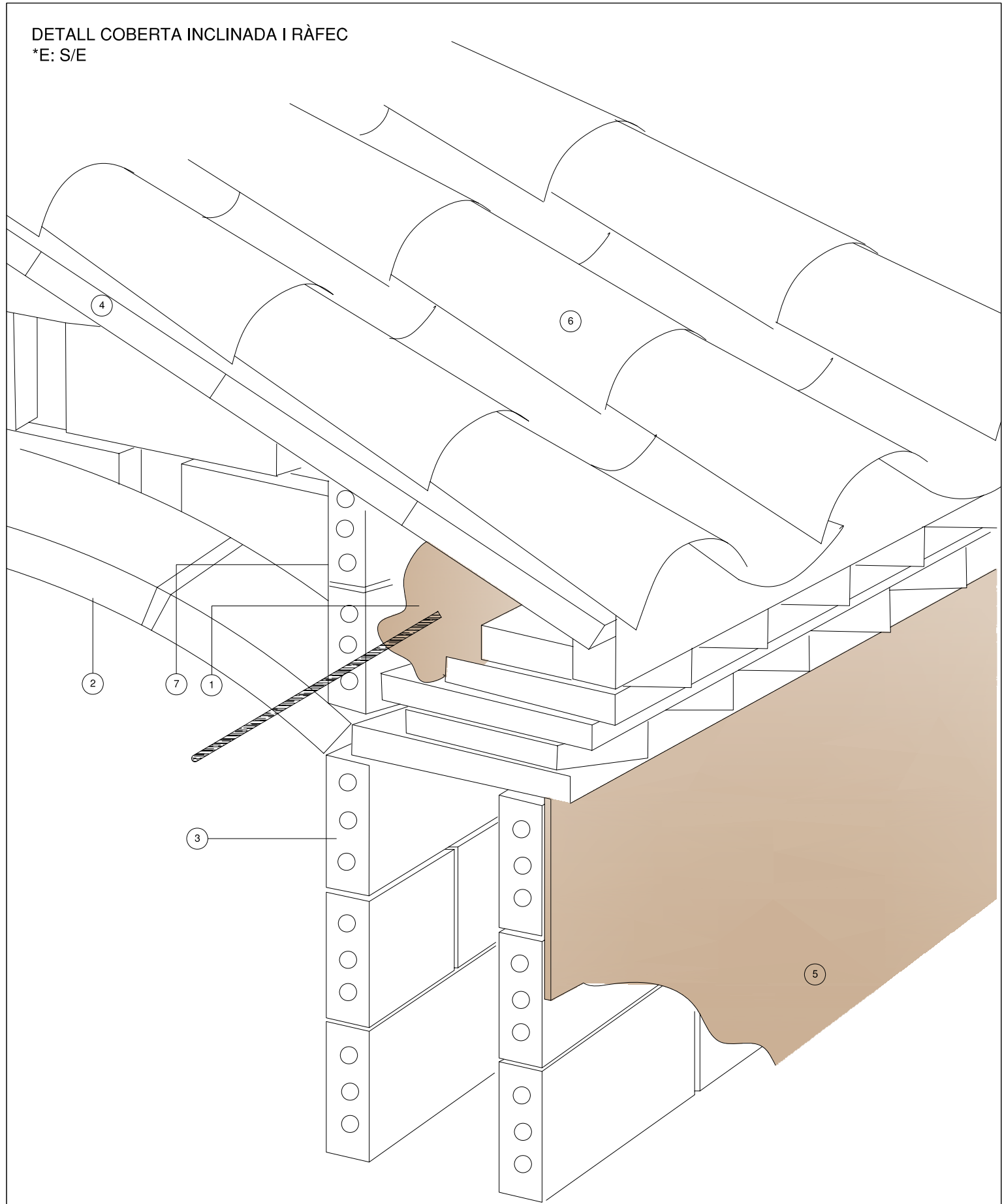
- 1 MAÓ CERÀMIC FORADAT DE 4 x 14 x 29 cm, COL·LOCAT EN PLA I Afferat amb MORTER
- 2 ARC DE 47 cm DE GRUIX, FORMATS PER TRES FULLES DE MÃO FORADAT CERÀMIC, COL·LOCAT EN PLA, DE 4 x 14 x 29 cm, I REOMPLERT AMB FORMIGÓ CICLOPI
- 3 PILAR CERÀMIC EXECUTAT AMB ELS MAÓ MASSÍS DE 5 x 14 x 29 cm COL·LOCAT DE CANTELL
- 4



ZONA DETALLADA

DETALL COBERTA INCLINADA I RÀFEC

*E: S/E



- | | |
|---|---|
| 1 CÈRCOL DE CORONACIÓ FORMAT PER FORMIGÓ CICLOPI I TIRANT D'ACER | 5 REMOLINAT |
| 2 VOLTA CERÀMICA DE MAÓ CALAT COL·LOCAT EN PLA | 6 COBERTA DE TEULA ÀRAB |
| 3 PARET DE 30 FORMADA PER DOBLE ENVÀ DE MAÓ FORADAT DE 4 X 14 X 29 COL·LOCAT DE CANTELL | 7 ENVANET CERÀMIC FORMAT PER MAÓ FORADAT COL·LOCAT DE CANTELL |
| 4 SOLERA | |

D. ESTUDI PATOLÒGIC

1. INTRODUCCIÓ

Tot i que en un primer moment es podria pensar que Ignasi Bosch s'exposava a un cert risc al decidir-se per una construcció aparentment tan fràgil, cal remarcar que en general l'edifici es troba en bon estat i que no és propens a sofrir cap risc estructural.

Pel que fa a la resta de patologies del tipus no estructural que s'exposen, es pot dir que són degudes a una falta de manteniment sumada a la baixa qualitat d'alguns dels materials d'acabat usats en la construcció de l'època o ve a una deficient execució. Tanmateix, aquest fet no passa més enllà de ser un mal estètic.

A continuació s'exposaran una sèrie de danys reconeguts en les zones on s'ha tingut accés. Aquests, estan agrupats per tipus de patologia, segons l'origen i causa que els determinen.

2. PATOLOGIA "1"

2.1. FOTOGRAFIES



FIG 1: Localització 4 en el plànol

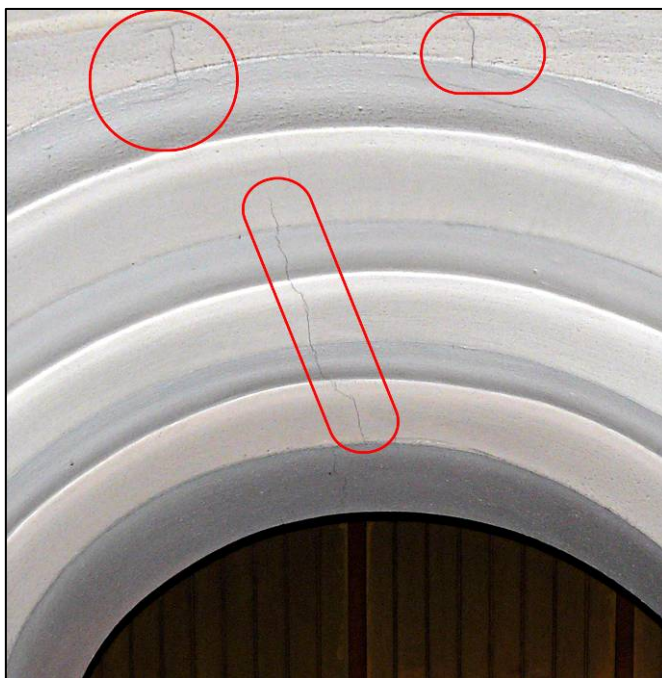


FIG 2: Localització 8 en el plànol



FIG 3: Localització 1 en el plànol

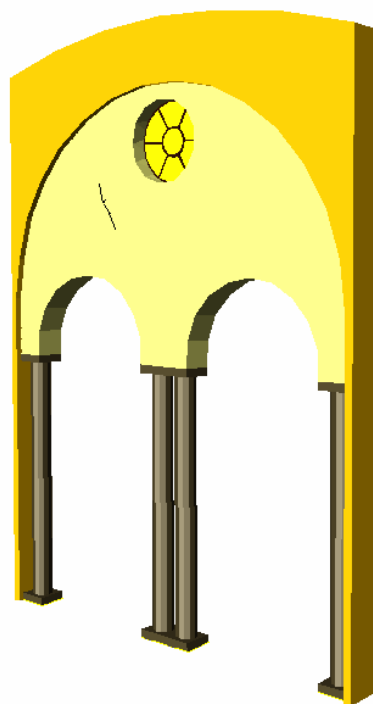


FIG 4: Representació de l'esquerda en la localització 14

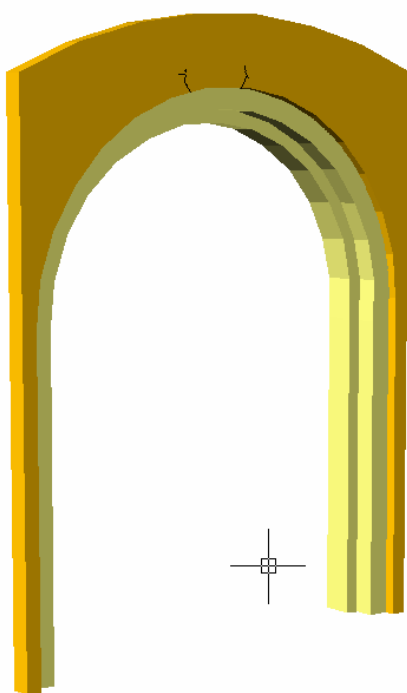


FIG 5: Representació de l'esquerda en la localització 1

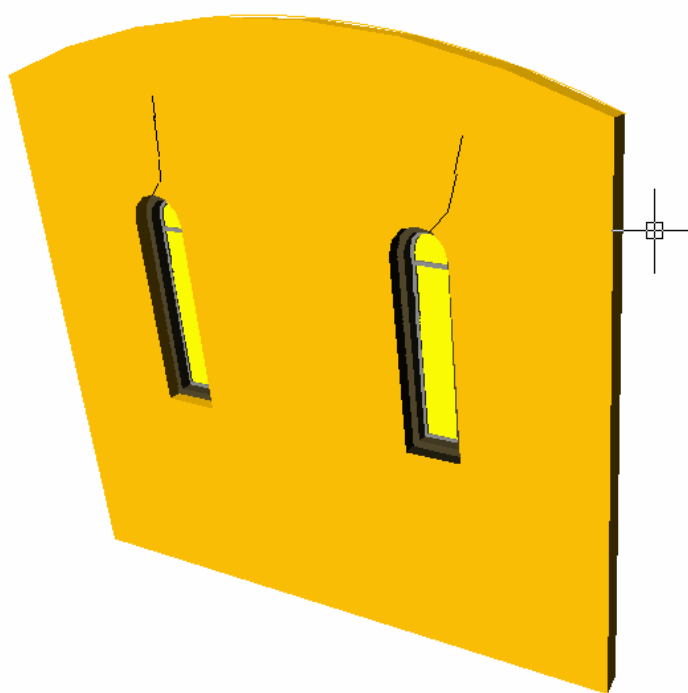


FIG 6: Representació de l'esquerda en la localització 2 i 4

2.2. DESCRIPCIÓ I LOCALITZACIÓ

Els danys mostrats en les fotografies i imatges corresponen a la patologia número 1. La seva situació i forma queden grafiats en els plànols.

Aquests danys són fissures situades a l'interior de l'esglèsia, tan en les parets de tancament com al punt mig dels arc i dintells de les finestres.

Es caracteritzen per ser de llargades diferents i de recorregut vertical. La designada amb el nº 15 recorre tota la paret, mentre que d'altres queden situades al mig de la paret (nº 7 i 14) amb una llargada aproximada de 50 centímetres. Les situades als dintells de la finestra arriben fins a les arestes de les voltes (2, 4, 6), mentre que les dels arcs, atravessen tota l'amplada de l'element i recorren uns 50 centímetres en vertical.

Totes les fissures tenen el mateix gruix i profunditat en tota la llargada, els seus extrems es troben inscrits en el mateix pla, són contínues i estables.

2.3. CAUSES

Els factors que les provoquen són accions reològiques, retracció i fluència del material. Degut a que no es van preveure juntes de dilatació, l'edifici es dilata i consegüentment fissura en aquells punts més dèbils, com per exemple la fissuració al mig dels arcs.

Tot i que en un primer moment degut a les característiques i punts on s'originen aquestes patologies podrien semblar greus, el seu estudi determina que són de caràcter estructural lleu i no afecten a l'estabilitat de l'edifici, sinó que tan sols causen un mal estètic.

2.4. INTERVENCIÓ A REALITZAR

Les intervencions a realitzar són les habituals per aquestg tipus de simptomatologia. Per tant es seguirà el següent procediment:

- Neteja de la zona afectada

- Col·locació d'una malla de reforç i arrebossat en uns 50 centímetres entorn de la fissura
- Pintat de la zona amb pintura elàstica.

3. PATOLOGIA “2”

3.1. FOTOGRAFIES

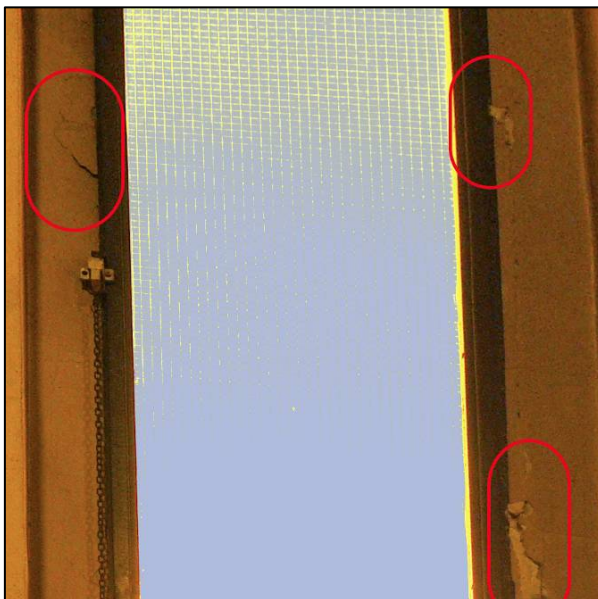


FIG 7: Localització 5 en el plànol

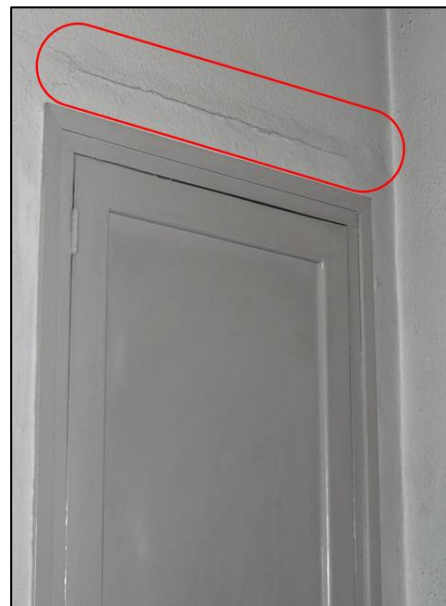


FIG 8: Localització 9 en el plànol



FIG 9: Localització 11 en el plànol

3.2. DESCRIPCIÓ I LOCALITZACIÓ

Els danys mostrats en les fotografies corresponen a la patologia número 2. La seva situació i forma queden grafiats en els plànols.

Són esquerdes que apareixen al voltant de diferents elements de fusteria: finestra (5) i portes (9,11). Són de caràcter estable, de gruix i fondària continua en tot el recorregut i no presenten desplaçament entre superfícies. En la fotografia número 9 es pot observar un despreniment del material de revestiment.

3.3. CAUSES

Les causes són una mala posta en obra i una manca de manteniment. La mala execució en la unió de materials de diferent composició ha conduït a que aquests es deterioressin amb excés.

3.4. INTERVENCIONS A REALITZAR

Les intervencions a realitzar consisteixen en retirar la fusteria malmesa i tota aquella altra que sigui susceptible de patir el mateix dany; es restaurarà el voltant de la zona afectada, es repicarà el tram necessari, i s'enguixarà. Posteriorment es podrà col·locar la nova fusteria i finalment es pintarà el tram de paret sanejat.

Cal remarcar que no són patologies importants i que tan sols afecten a l'estètica de l'edifici.

4. PATOLOGIA “3”

4.1. FOTOGRAFIES



FIG 10: Localització 13 en el plànol

4.2. DESCRIPCIÓ I LOCALITZACIÓ

La fotografia mostrada correspon a la patologia número 3 i queda grafiada en els plànols.

Aquesta tipologia té origen en una de les arestes de la volta de la nau principal, situada sota coberta. Es pot observar una escamació de forma irregular en l'última capa de pintura, que segueix el recorregut de la pendent de la volta. No presenta floridures.

4.3. CAUSA

L'escamació de la pintura és deguda a una filtració de l'aigua de pluja per la coberta, que té com a conseqüència l'aparició d'humitat en aquesta zona. Al assecar-se, la pintura es trenca en la forma que es mostra en la fotografia.

La filtració ha estat reparada, tot i que no s'observa cap taca d'humitat; tot i així, manca sanejar la zona afectada.

4.4. INTERVENCIIONS A REALITZAR

Tal i com ja s'ha dit, l'origen de la patologia ha estat erradicada, per tant, tan sols caldrà rascar la zona afectada i pintar-la de nou.

5. PATOLOGIA “4”

5.1. FOTOGRAFIES



FIG 11: Paviment, Localització 17 i 18 en els plànols

5.2. DESCRIPCIÓ I LOCALITZACIÓ

La fotografia mostrada correspon a la patologia número 4.

Aquesta té origen en el paviment hidràulic de color marró clar, on s'observen petites fissures i desnivells.

5.3. CAUSES

La causa principal és que el paviment interior de la sala pateix la manca de manteniment, afegit a un excés de pressió pel qual no estan preparats quan es troben sotmesos a les càrregues dels bancs.

5.4. INTERVENCIIONS A REALITZAR

Per tal de subsanar el problema caldrà col·locar un nou paviment en tota la sala. Aquest, haurà de ser suficientment resistent per tal de suportar en bones condicions el desgast del trànsit de persones i la pressió exercida pels bancs. No és una reparació difícil en si, però degut a que l'edifici disposa de molta extensió en planta el cost del material és molt alt.

6. PATOLOGIA “5”

6.1. FOTOGRAFIES



FIG 12: A dalt, trencament de peces ceràmiques que conformen la paret de tancament del campanar. La ruptura es situa al voltant de les instal·lacions.



FIG 13: A l'esquerra, trencament de peces que conformen la fulla interior de la paret de tancament del campanar.



FIG 14: Trencament del paviment que conforma la capa d'acabat de l'últim nivell del campanar.

6.2. DESCRIPCIÓ I LOCALITZACIÓ

Les fotografies mostrades corresponen a la patologia número 5 i queden grafiades en els plànols.

Aquests danys tenen origen en el campanar. Aquesta part de l'església no consta de revestiment d'acabat en la part interior de les parets que conformen el tancament. A tota la seva alçada s'hi troben diferents patologies, com forats on s'hi aprecia el pas de les instal·lacions, o bé la falta de peces en l'últim forjat.

Pel que fa al paviment, es pot apreciar en la fotografia que les peces d'acabat es recolzen directament als envanets de la volta, per tant, el mateix paviment treballa com a solera.

6.3. CAUSES

La causa principal és una manca de manteniment en general i una deficiència en l'execució. S'hauria d'haver previst una capa de revestiment de les parets que les protegís de la intempèrie (el campanar queda sotmes a les accions climàtiques ja que

queda obert en molts punts); a més, en l'últim nivell s'hauria d'haver executat una solera per tal de repartir millor les possibles càrregues en que es trobi sotmes el paviment.

6.4. INTERVENCIONS A REALITZAR

Per tal de subsanar aquests dèficits les intervencions recomanades són:

- Una neteja general d'aquesta part de l'edifici.
- La reparació de les peces trencades o caigudes.
- L'execució d'un arrebossat en el tancament interior del campanar.
- La col·locació d'un nou paviment.
- El pintat final del parament amb una pintura impermeabilitzant.
- La col·locació d'una fusteria adequada a les condicions de l'ambient.

7. PATOLOGIA “6”

7.1. FOTOGRAFIES



FIG 15: Esquerdes en el marc que limita l'obertura. Localització 21 en els plànols

FIG 16: A dalt, trencament de les peces que conformen el replanell de l'obertura. Localització 22 en els plànols.



*FIG 17: Danys en porta d'entrada del carrer Roma.
Localització 24 en els plànols.*

7.2. DESCRIPCIÓ I LOCALITZACIÓ

Les fotografies mostrades corresponen a la patologia número 6 i queda grafiada en els plànols.

Els danys mostrats tenen origen en les diferents façanes de l'edifici. Es caracteritzen per un trencat de les peces que conformen el revestiment dels àmpits de les finestres i un entumiment de l'ànima de fusta de la porta d'entrada perl carrer Roma sumat a un trencament de la xapa metàl·lica de revestiment.

7.3. CAUSES

Les causes principals són l'actuació dels agents atmosfèrics (pluja, vent, gelades, canvis de temperatura, etc.) i la manca de manteniment. El resultat és la fissuració i trencament de les peces ceràmiques que conformen el replanell i conseqüentment queda a la vista el morter utilitzat en l'aferratge. Pel que fa a la porta la conseqüència més evident és un podriment del material que conforma l'ànima i un desgast de la xapa metàl·lica de protecció.

7.4. INTERVENCIIONS A REALITZAR

Per tal de subsanar el problema les intervencions a realitzar seran:

- Una substitució dels elements trencats o malmesos per uns semblants.
- Una neteja de la fusteria i dels racons que contribueixen a l'acumulació de brutícia.

8. PATOLOGIA “7”

8.1. FOTOGRAFIES



FIG 18: A dalt a l'esquerra, escamació del revestiment del pilar. Localització 16 en el plànol.



FIG 19: A dalt a la dreta, obertura i trencament de la peça que conforma el revestiment del pilar. Localització 16 en el plànol. .



FIG 20: A l'esquerra es mostra el pilar abans de ser reparat



FIG 21: A la dreta, es mostra el pilar un cop ja s'ha procedit a la reparació.

8.2. DESCRIPCIÓ I LOCALITZACIÓ

Les fotografies mostrades corresponen a la patologia número 7 i queda recollida en els plànols.

Aquesta patologia és la que crida més l'atenció, degut a que es repeteix en nombroses ocasions. Té origen en diversos pilars de pedra artificial disposats en el cos central de l'edifici. La figura 22 mostra la situació del pilar més afectat.

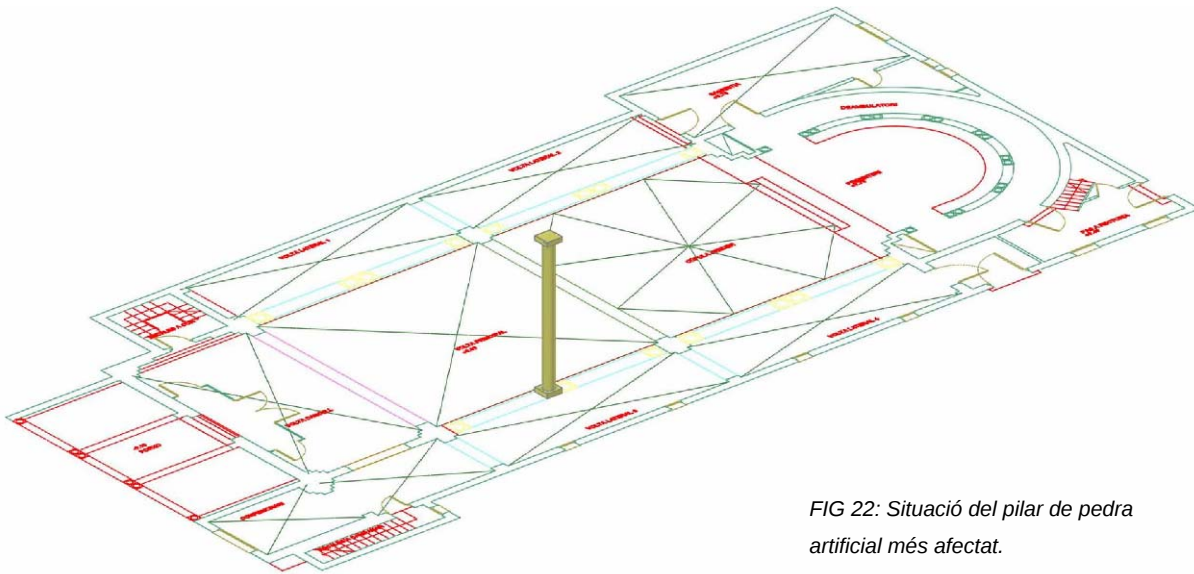


FIG 22: Situació del pilar de pedra artificial més afectat.

La patologia es caracteritza per una sèrie de símptomes:

- a) El primer d'ells és el més rellevant. És una fissura vertical a uns 2 m d'alçada i amb una longitud d'uns 60 cm. En la majoria de pilars apareix de forma molt fina en tot el seu recorregut, amb el que segurament passaria desapercebuda si no s'estigués atent. Tanmateix, en algun altre pilar, aquesta fissura adquireix un gruix considerable i fins i tot s'hi pot introduir una agulla de cap. Al voltant d'aquesta primera gran fissura s'aprecien d'altres de menor longitud, molt properes entre sí i en la mateixa direcció.

A més, part del material de recobriment d'aquesta zona presenta una erosió per capes, sobretot en els punts d'unió entre les peces de recobriment.



FIG 23: A l'esquerra es mostren les fissures verticals.



FIG 24: A la dreta es mostra l'erosió per capes.

b) El segon símptoma a recalcar és la ruptura produïda en el capitell del pilar, que apareix en la cara contrària respecte la primera fissura que s'ha descrit. Aquesta ruptura és per compressió, degut a que el moment produït causa que el pilar pressioni el capitell, quan no ha estat dissenyat per treballar així; amb el que acaba cedint la part que es troba sotmesa a majors esforços de compressió.

c) La tercera fissura es troba en la base del pilar, i en la mateixa cara on apareixia la ruptura descrita en l'anterior punt. Les causes també són les mateixes.



FIG 25: A l'esquerra es mostra la fisura al peu del pilar.



FIG 26: A la dreta es mostra el capitell esquerdat.

Per tal d'entendre el que s'ha exposat, es mostra la següent imatge on es grafien els punts d'aparició de les fissures.

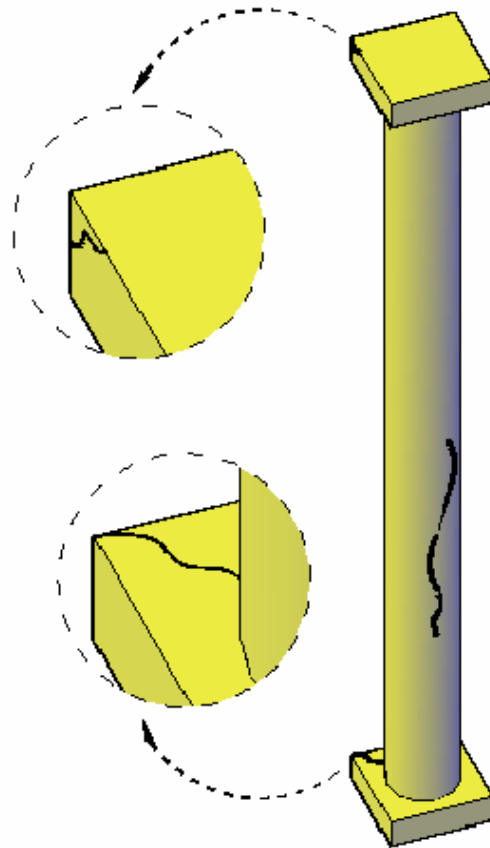


FIG 27: Fissures produïdes en el pilar

8.3. CAUSES

Així es pot dir que el pilar, degut a que les càrregues que rep no estan aplicades a l'eix longitudinal d'aquest, sofreix un moment addicional pel qual no està preparat. La capa superficial del pilar, en aquest cas el recobriment de pedra artificial, és la primera en mostrar els símptomes de la patologia, i es trenca en capes per aixafament en una de les cares degut als esforços de compressió, i es fissa en la cara contrària degut a l'estirament per esforços a tracció.

A més, en la base i el capitell es produeix una ruptura a compressió degut a l'aplastament que sofreixen aquests elements contra d'altres que els impedeixen el gir.

8.4. INTERVENCIONS A REALITZAR

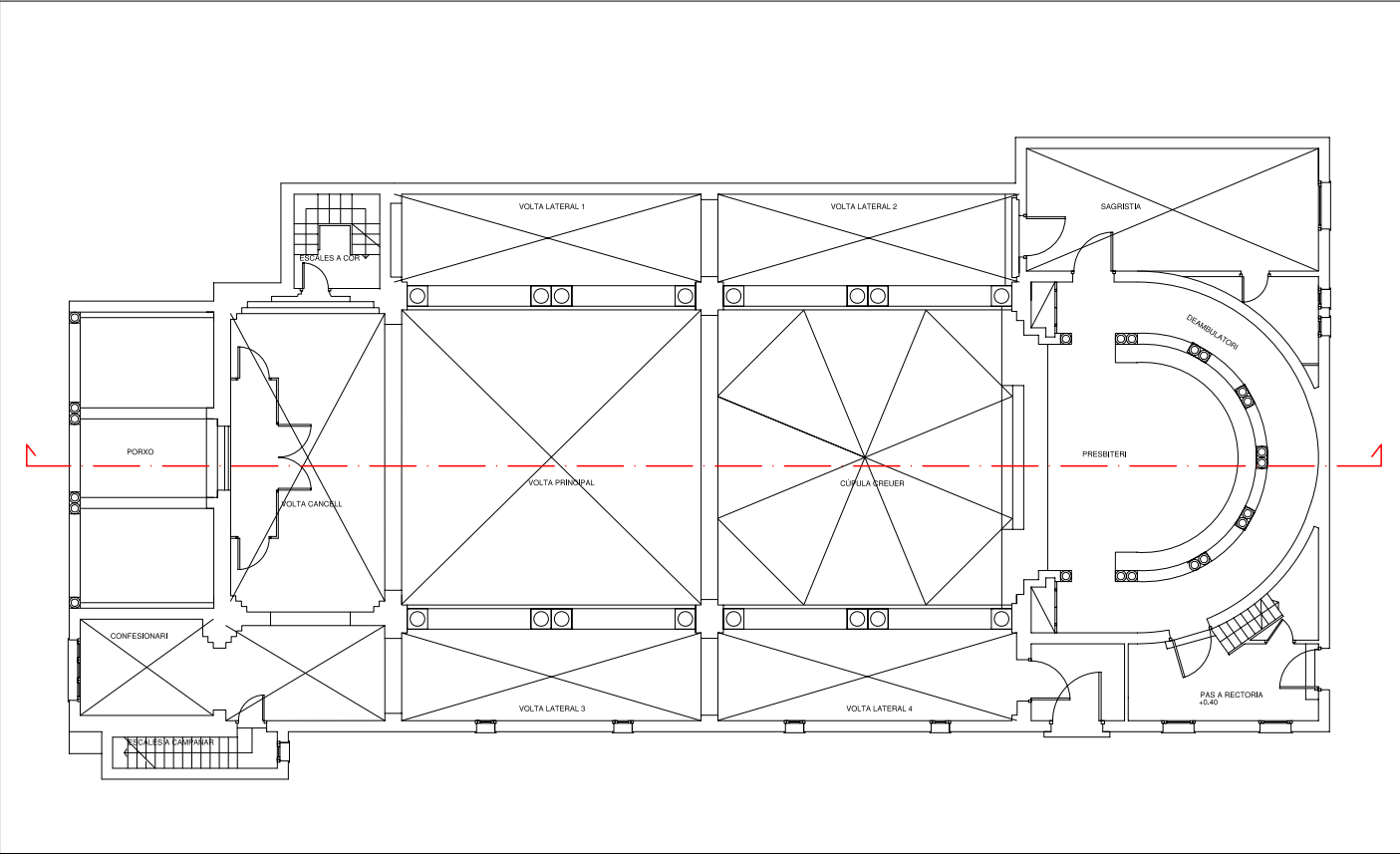
Per tal de subsanar el problema les intervencions a realitzar seran una neteja de l'esquerda i un posterior reomplert d'aquesta amb morter de reparació. Si és necessari es col·locarà una malla per la unió dels diferents materials. Si es conservessin peçes d'iguals característiques, seria ideal substituir aquestes per les malmeses.

Tot i així, aquesta afectació ve originada per una deficiència estructural que s'ha decidit no erradicar-la degut a la poca gravetat i el gran cost econòmic que suposa la reparació, amb el que el problema podria tornar a sorgir d'aquí un temps.

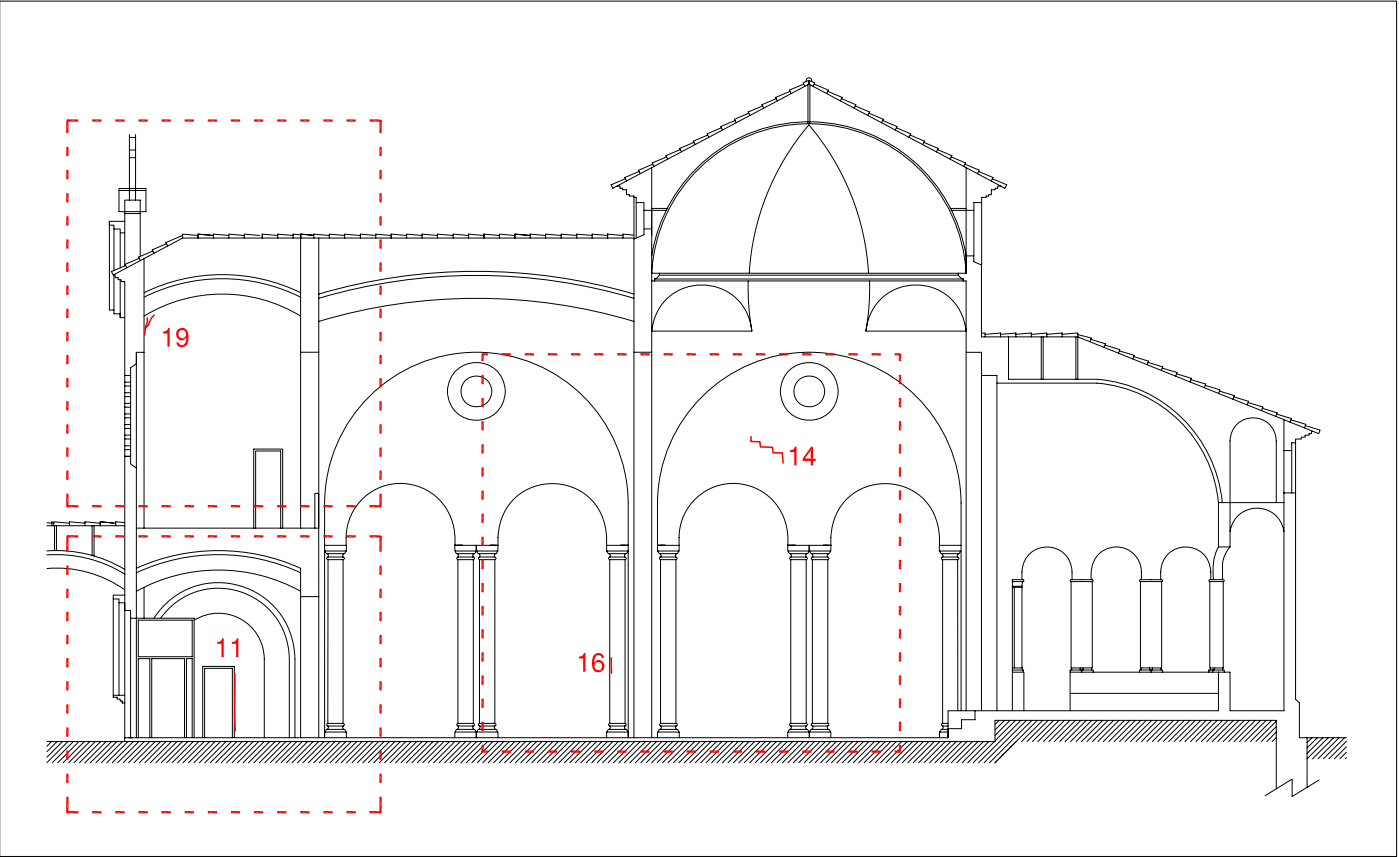
9. PRESSUPOST REPARACIÓ APROXIMAT

Medició	UT.	Descripció	CD ut	CD Total	CI total	PEM TOT.	DGE	TOT.COST	BI	P.O.
IMPLANTACIÓ										
4	dia	Amortització diària de plataforma elevadora telescòpica articulada, autopropulsada amb motor de gasoil, de 20 m d'alçada màxima de treball i 9,8 m en horitzontal, de 227 kg de càrrega útil, de dimensions 700x245x245 cm en repòs i 10886 kg de pes, buida, amb cistella de dimensions 150x75 cm	300,00 €	1.200,00 €	180,00 €	1.380,00 €	183,54 €	1.563,54 €	281,44 €	1.835,40 €
PALETERIA										
10	m²	Preparació de paraments per a pintar.	3,08 €	30,80 €	4,62 €	35,42 €	4,71 €	40,13 €	7,22 €	47,11 €
1000	PA	Elements i mà d'obra auxiliar	1,00 €	1.000,00 €	150,00 €	1.150,00 €	152,95 €	1.302,95 €	234,53 €	1.529,50 €
REVESTIMENTS										
1,5	m	Escopidor de 29 cm d'amplària, amb rajola ceràmica fina, de color vermell, amb trencaigües, col·locada amb morter mixt 1:2:10, elaborat a l'obra amb formigonera de 165 l	21,75 €	32,63 €	4,89 €	37,52 €	4,99 €	42,51 €	7,65 €	49,90 €
582	m²	Paviment de mosaic hidràulic, de color llis, de 20x20 cm, col·locat a truc de maceta amb morter de ciment 1:6, elaborat a l'obra amb formigonera de 165 l, sobre capa de sorra de 2 cm de gruix	78,99 €	45.972,18 €	6.895,83 €	52.868,01 €	7.031,44 €	59.899,45 €	10.781,90 €	70.314,45 €
370	m²	Arrebossat a bona vista sobre parament vertical exterior, a més de 3,00 m d'alçada, amb morter de ciment 1:4, elaborat a l'obra amb formigonera de 165 l, remolinat i lliscat amb ciment pòrtland amb filler calcari 32,5 R	33,36 €	12.343,20 €	1.851,48 €	14.194,68 €	1.887,89 €	16.082,57 €	2.894,86 €	18.878,92 €
35	m²	Pintat de parament vertical interior de ciment, amb pintura elàstica amb acabat llis, amb una capa de fons diluïda, i dues d'acabat	4,34 €	151,90 €	22,79 €	174,69 €	23,23 €	197,92 €	35,63 €	232,33 €
360	m²	Pintat de parament vertical exterior de ciment, a la calç, amb dues capes	2,81 €	1.011,60 €	151,74 €	1.163,34 €	154,72 €	1.318,06 €	237,25 €	1.547,24 €
FUSTERIA										
6	u	Desmuntatge i muntatge de bastiment i fulles d'obertura de fusta i col·locació amb reblert dels forats, reajustat i aplomat	136,95 €	821,70 €	123,26 €	944,96 €	125,68 €	1.070,63 €	192,71 €	1.256,79 €
2	u	Fulla batent per a porta interior, de fusta per a pintar, de 40 mm de gruix, rebaixada amb plafons i estructura interior de fusta, de 80 cm d'amplària i de 210 cm d'alçada	105,16 €	210,32 €	31,55 €	241,87 €	32,17 €	274,04 €	49,33 €	321,68 €
4	m²	Vidre lluna incolora de 5 mm de gruix, col·locat amb llistó de vidre sobre fusta, acer o alumini	26,72 €	106,88 €	16,03 €	122,91 €	16,35 €	139,26 €	25,07 €	163,47 €
Total			714,16 €	62.881,21 €	9.432,18 €	72.313,39 €	9.617,68 €	81.931,07 €	14.747,59 €	96.176,80 €

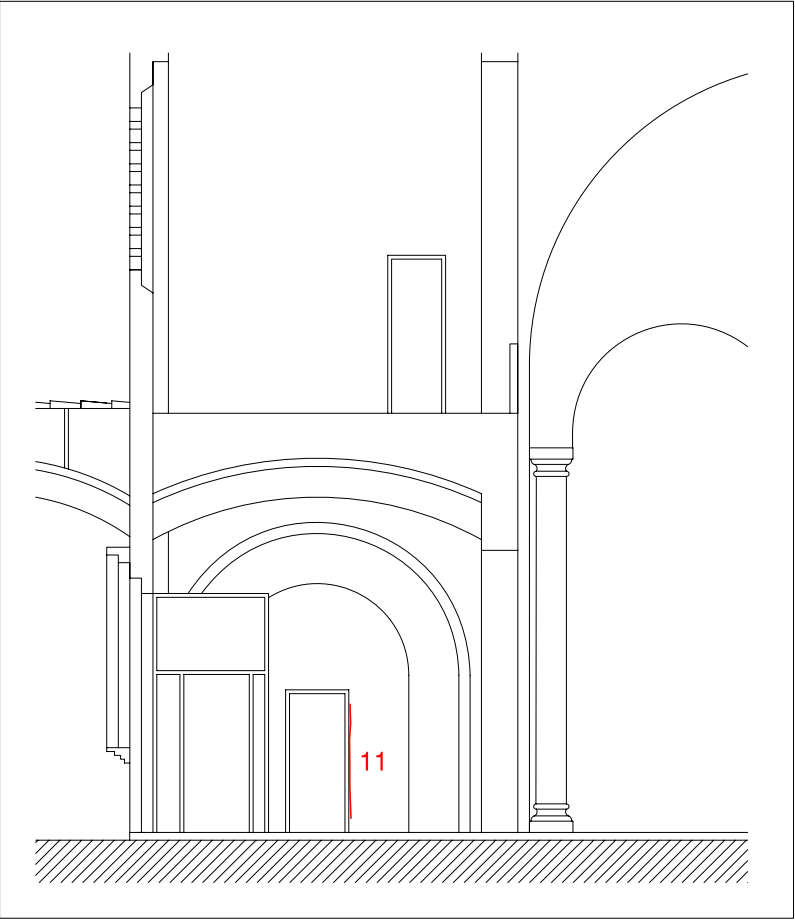
SECCIÓ, E=1/200:



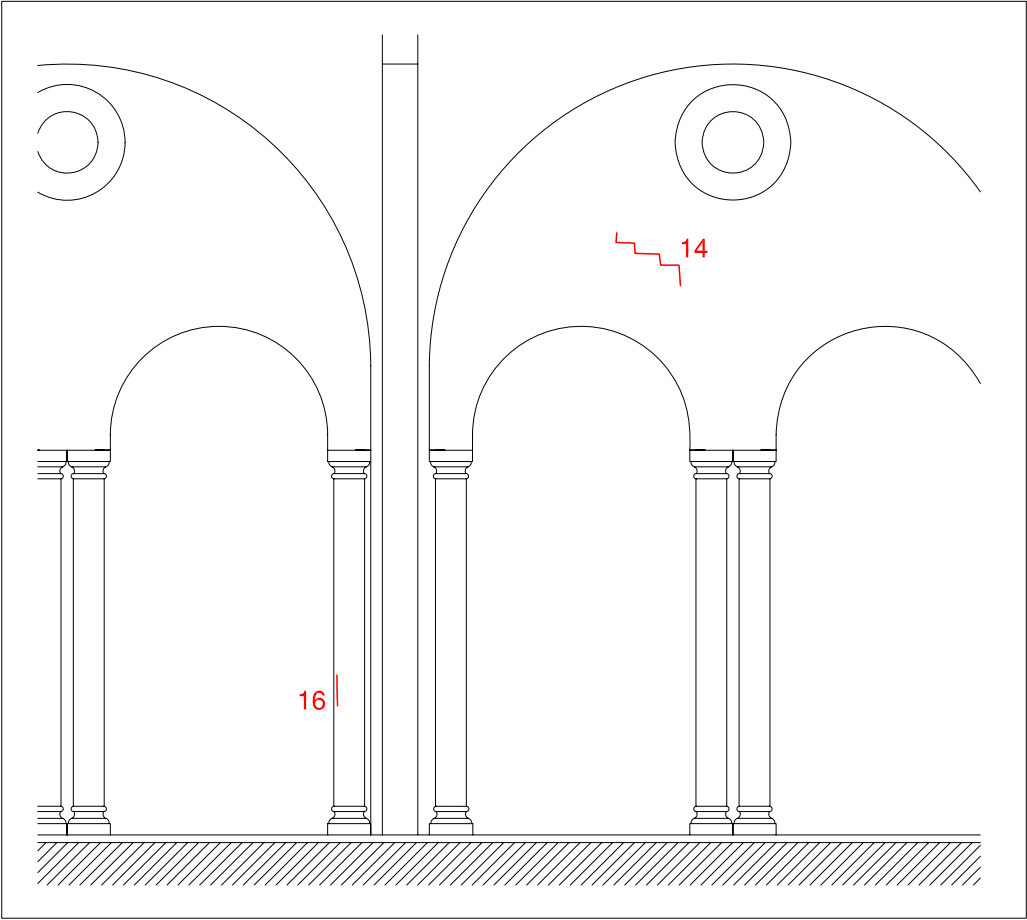
SITUACIÓ EN ALÇAT E=1/200:



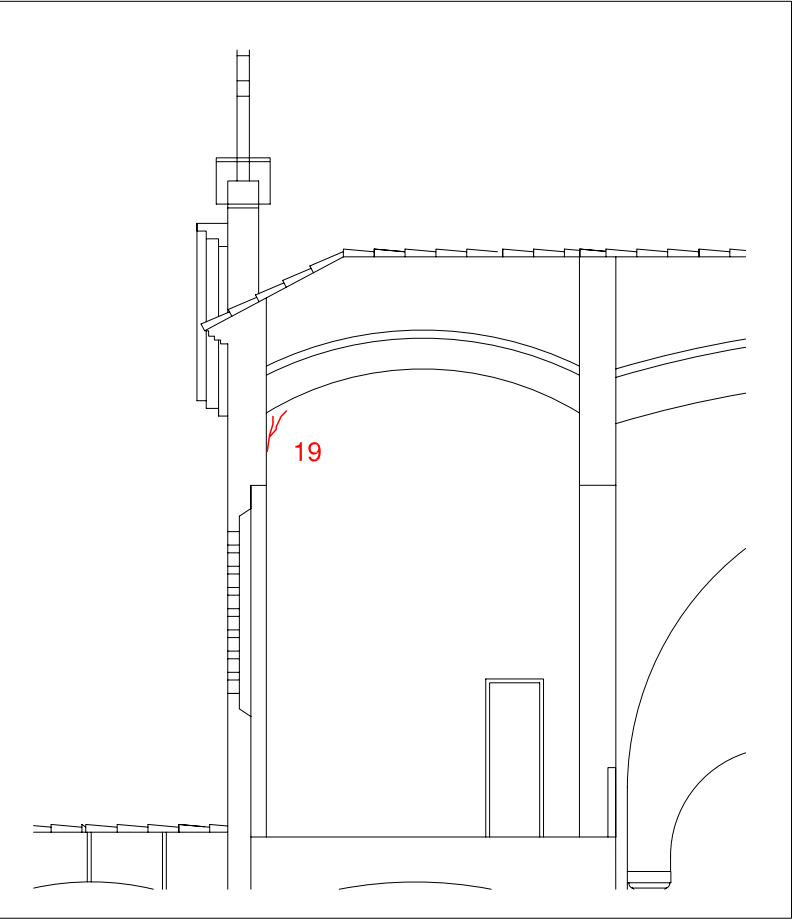
DETALL PATOLOGIA 11, E=1/100:



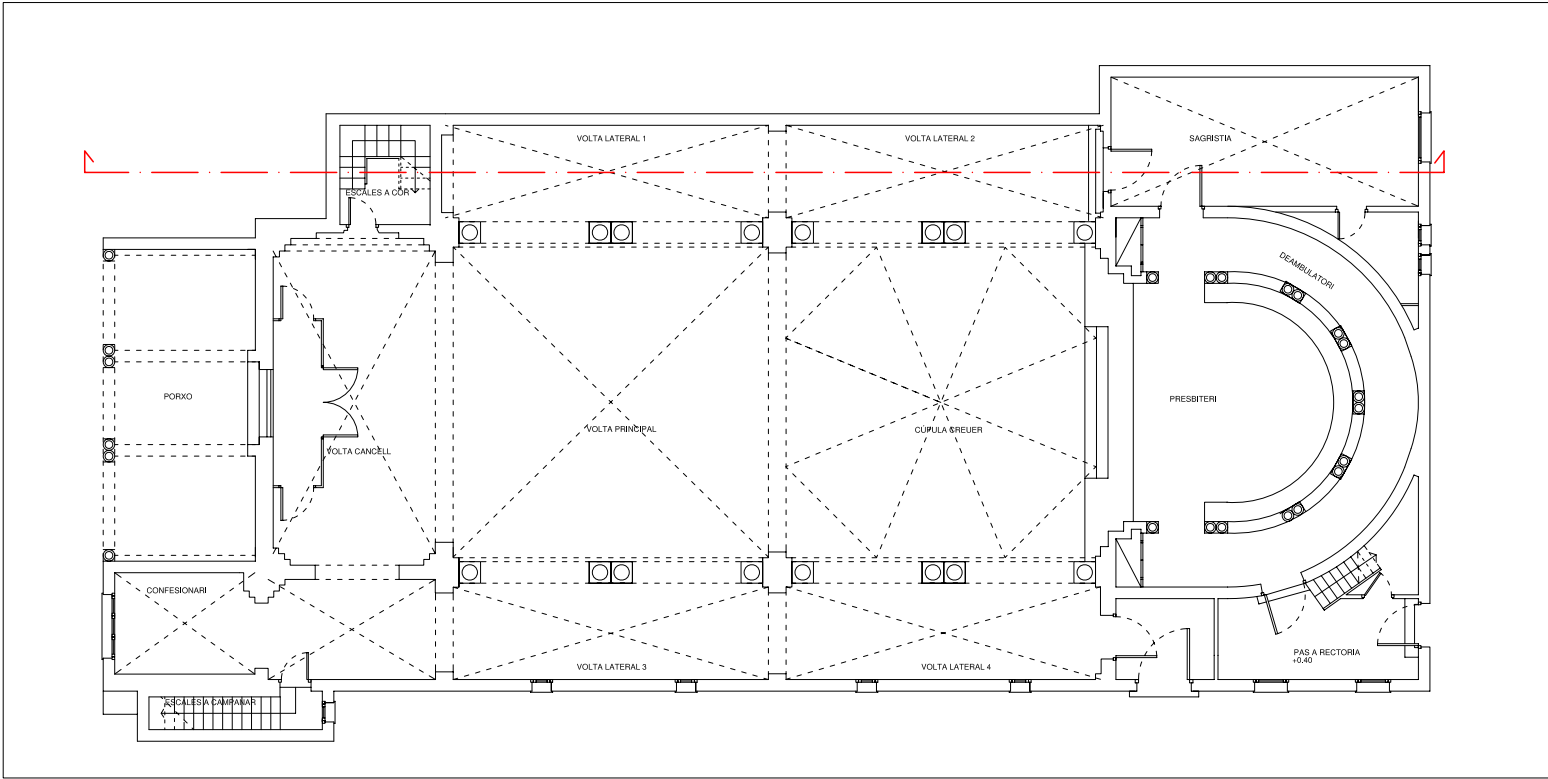
DETALL PATOLOGIA 14 I 16, E=1/100:



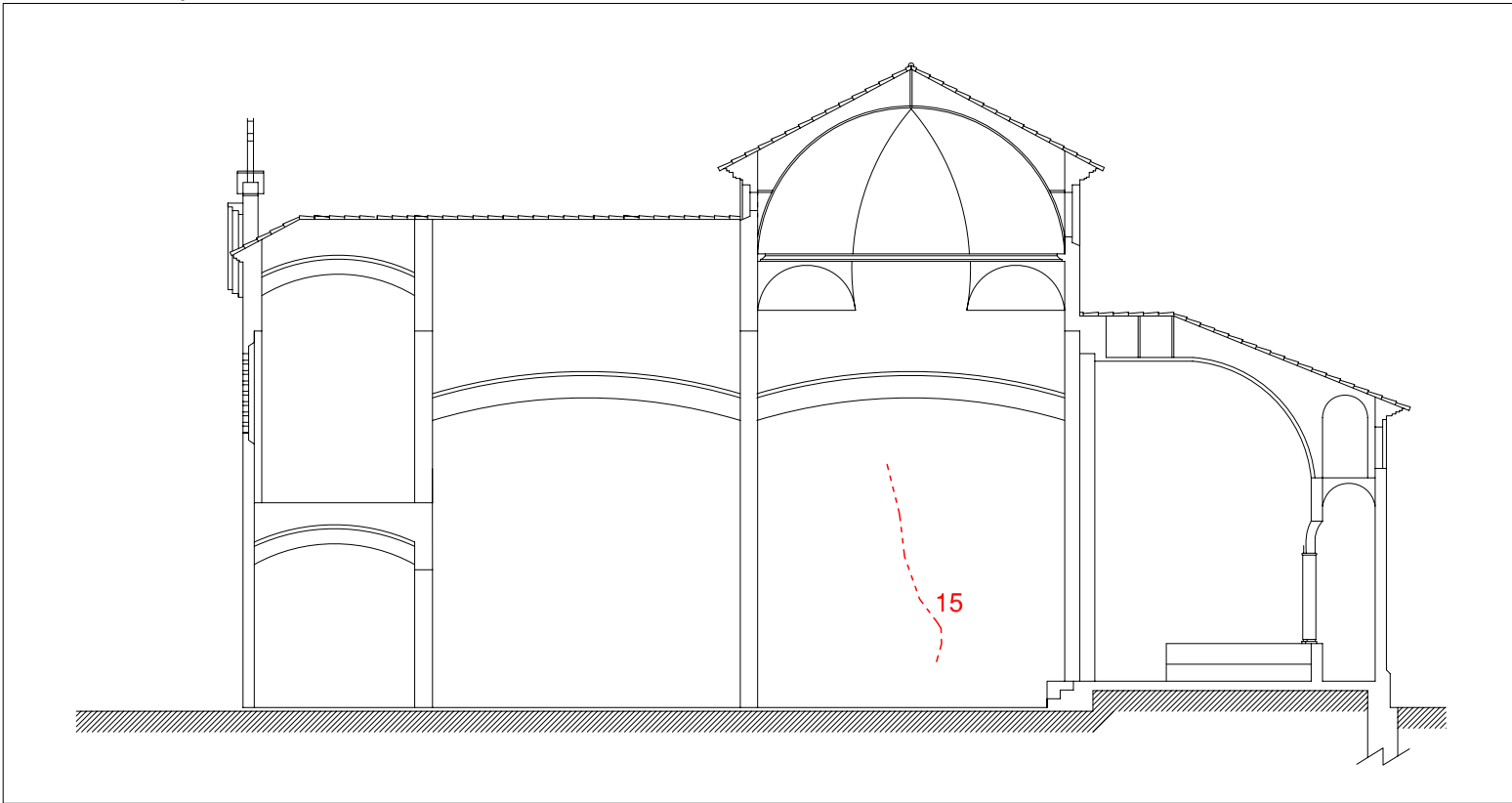
DETALL PATOLOGIA 19, E=1/100:



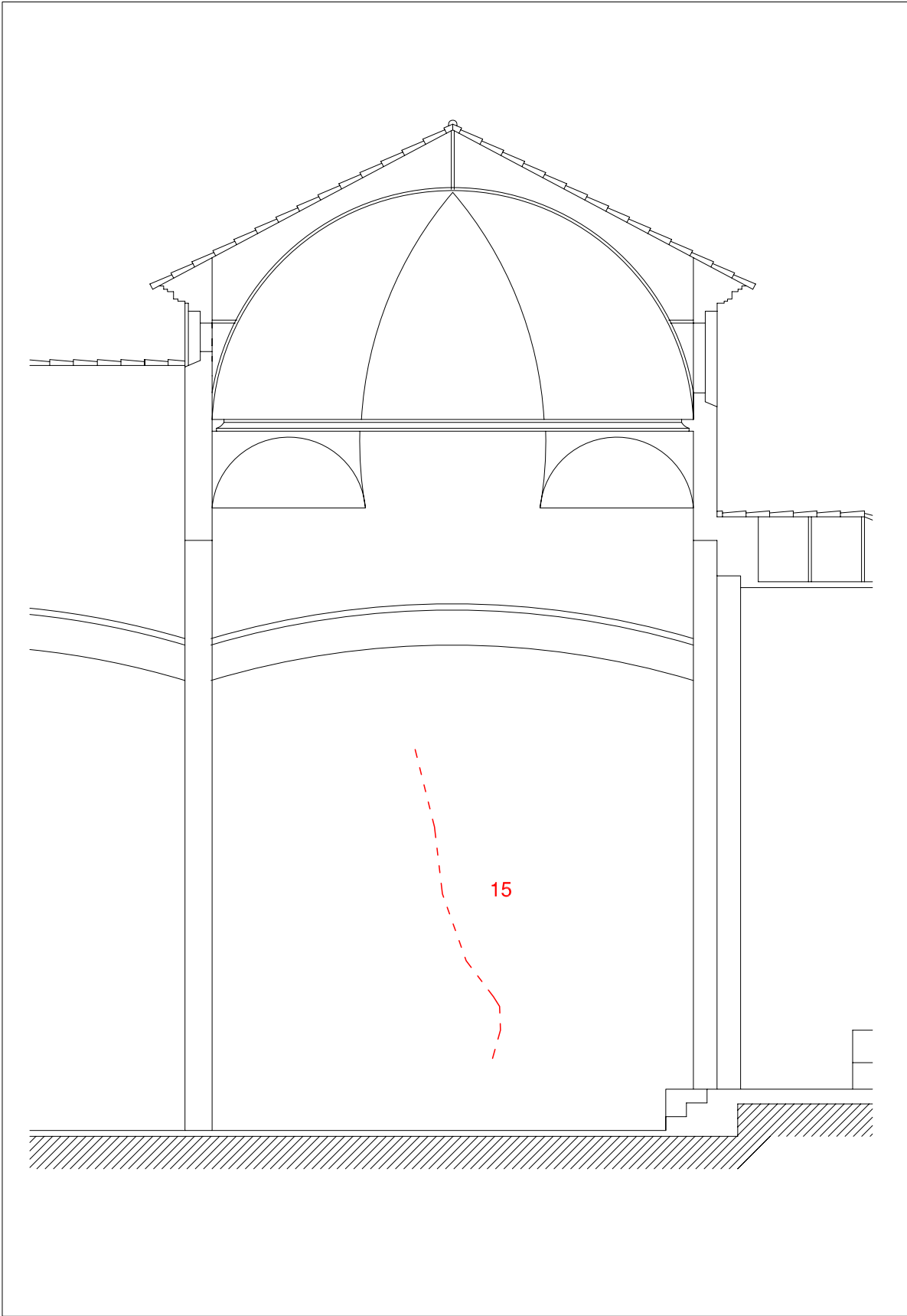
SECCIÓ, E=1/200:



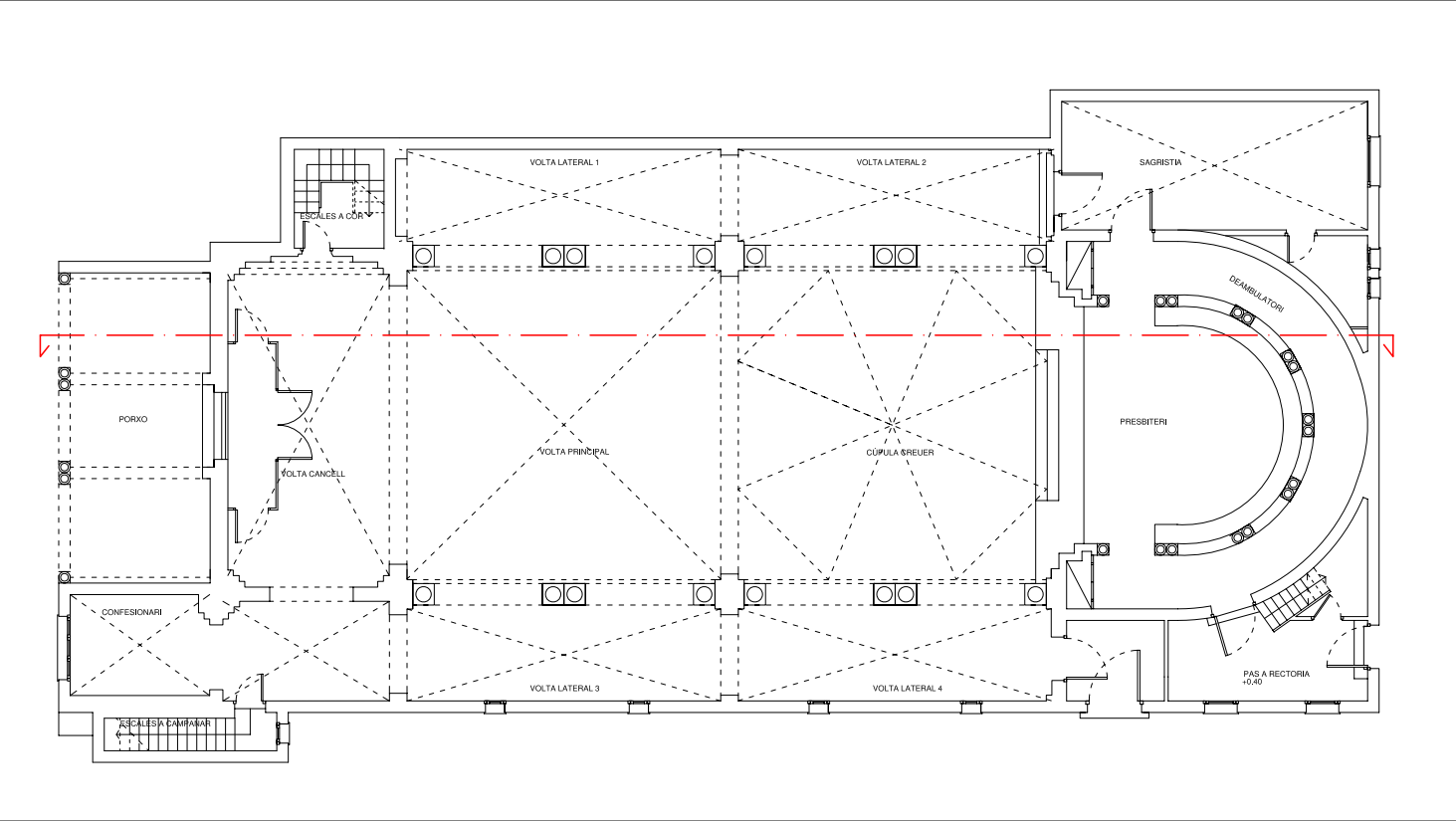
SITUACIÓ EN ALÇAT, E=1/200:



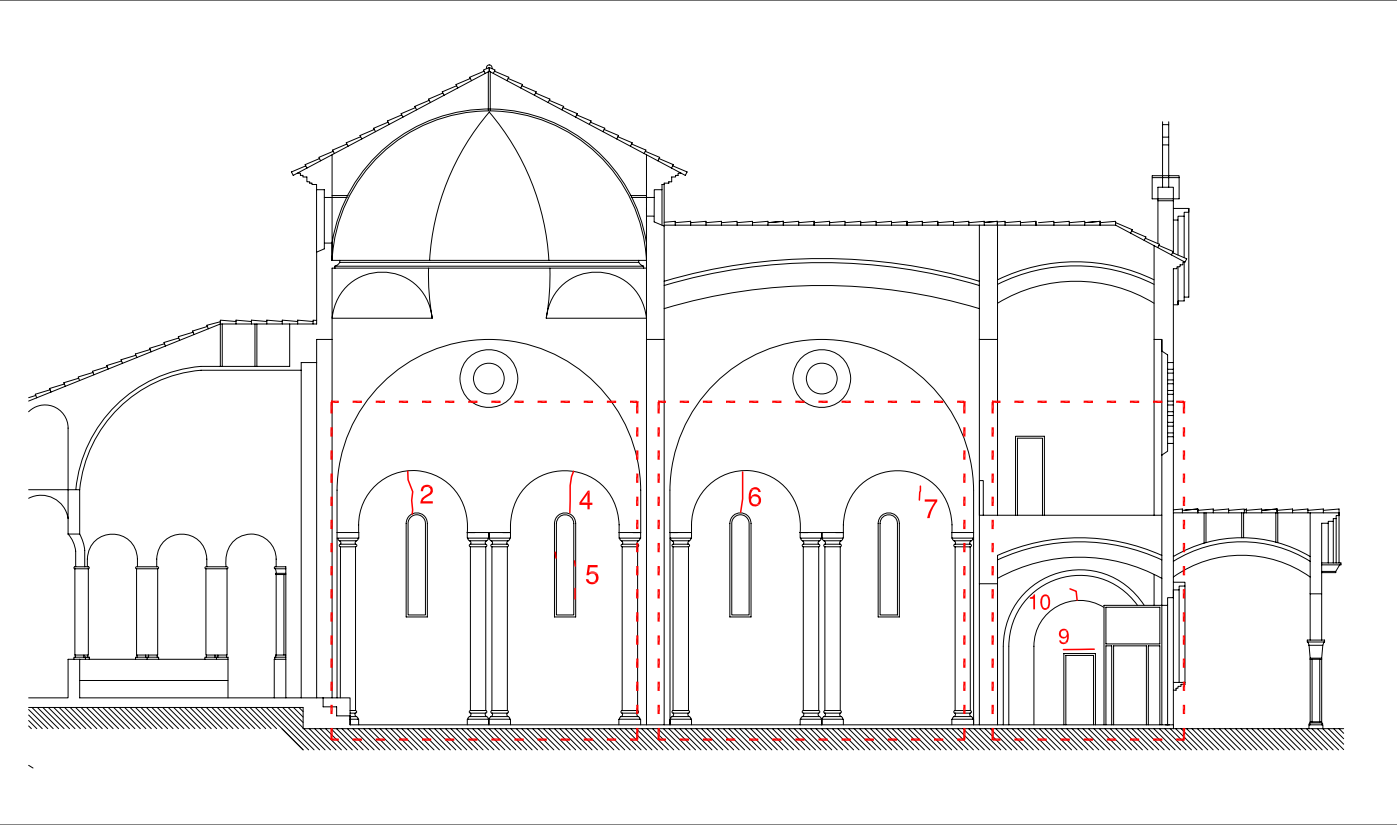
DETALL PATOLOGIA 15, E=1/100:



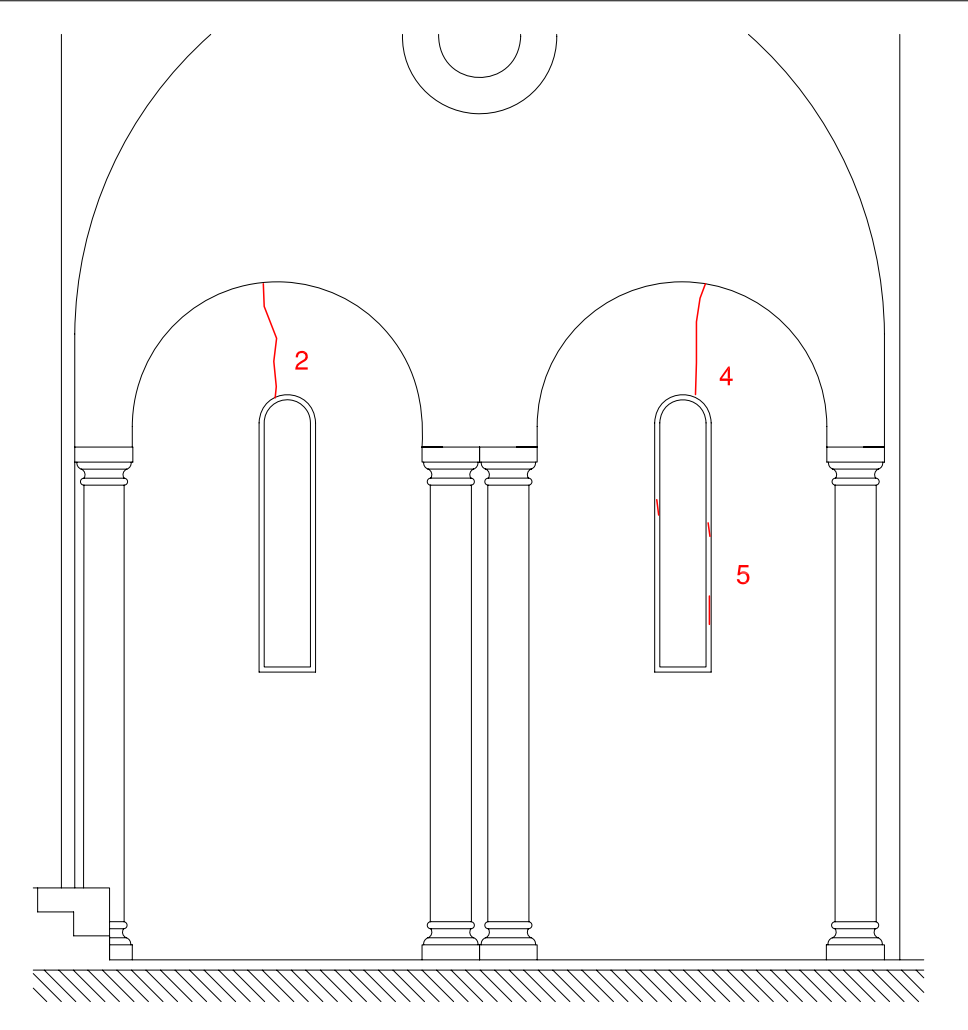
SECCIÓ, E=1/200:



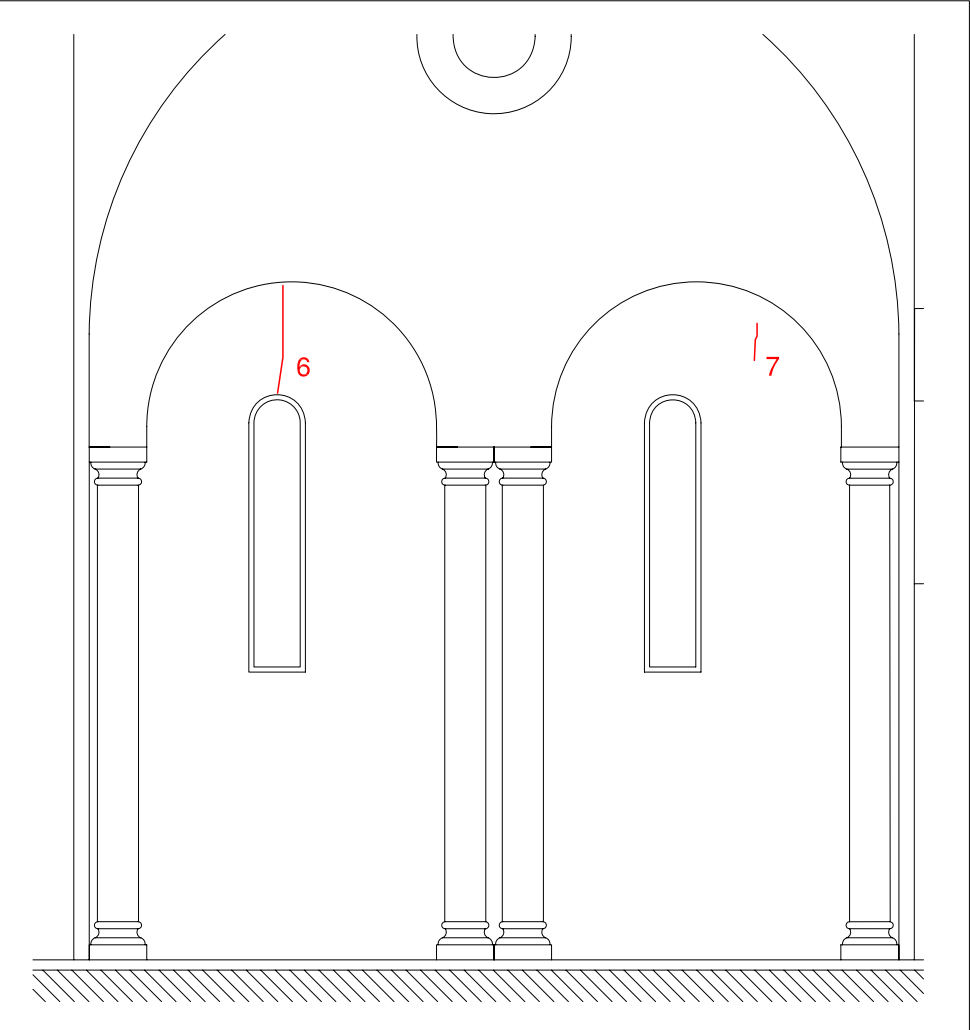
SECCIÓ EN ALÇAT, E=1/200:



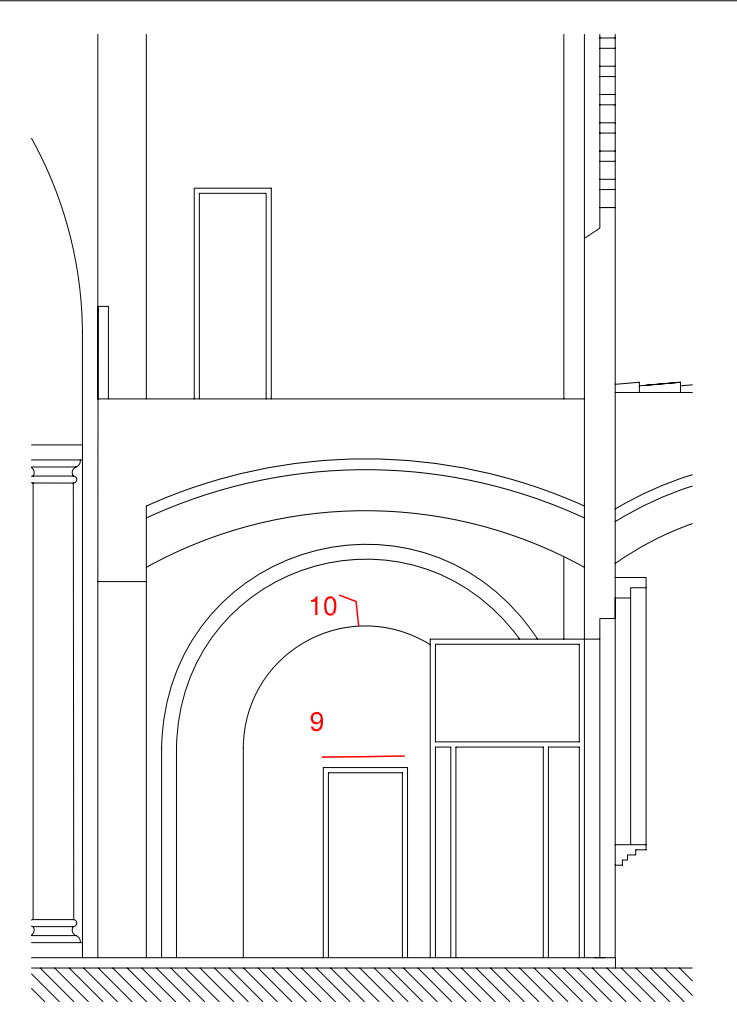
DETALL PATOLOGIA, E=1/75:



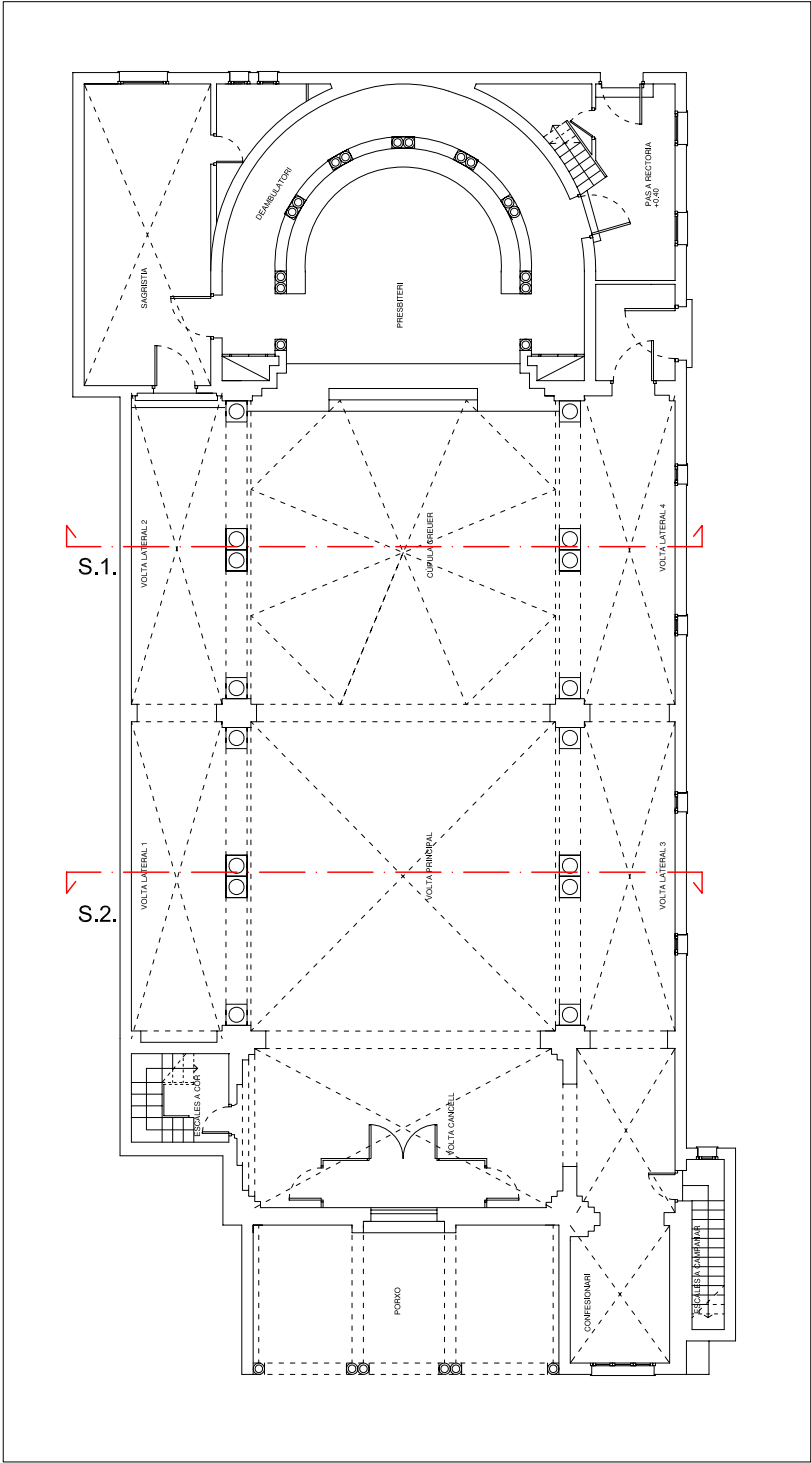
DETALL PATOLOGIA, E=1/75:



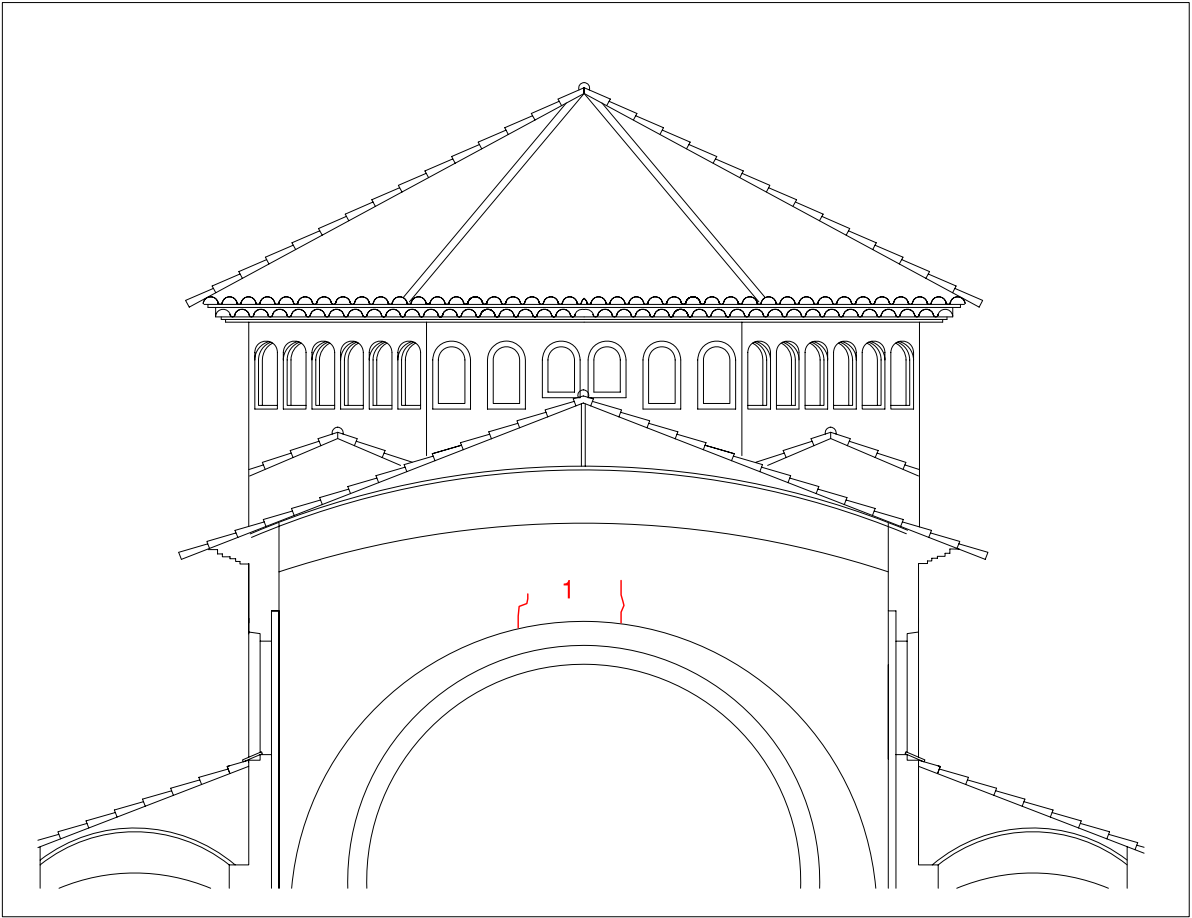
DETALL PATOLOGIA, E=1/75:



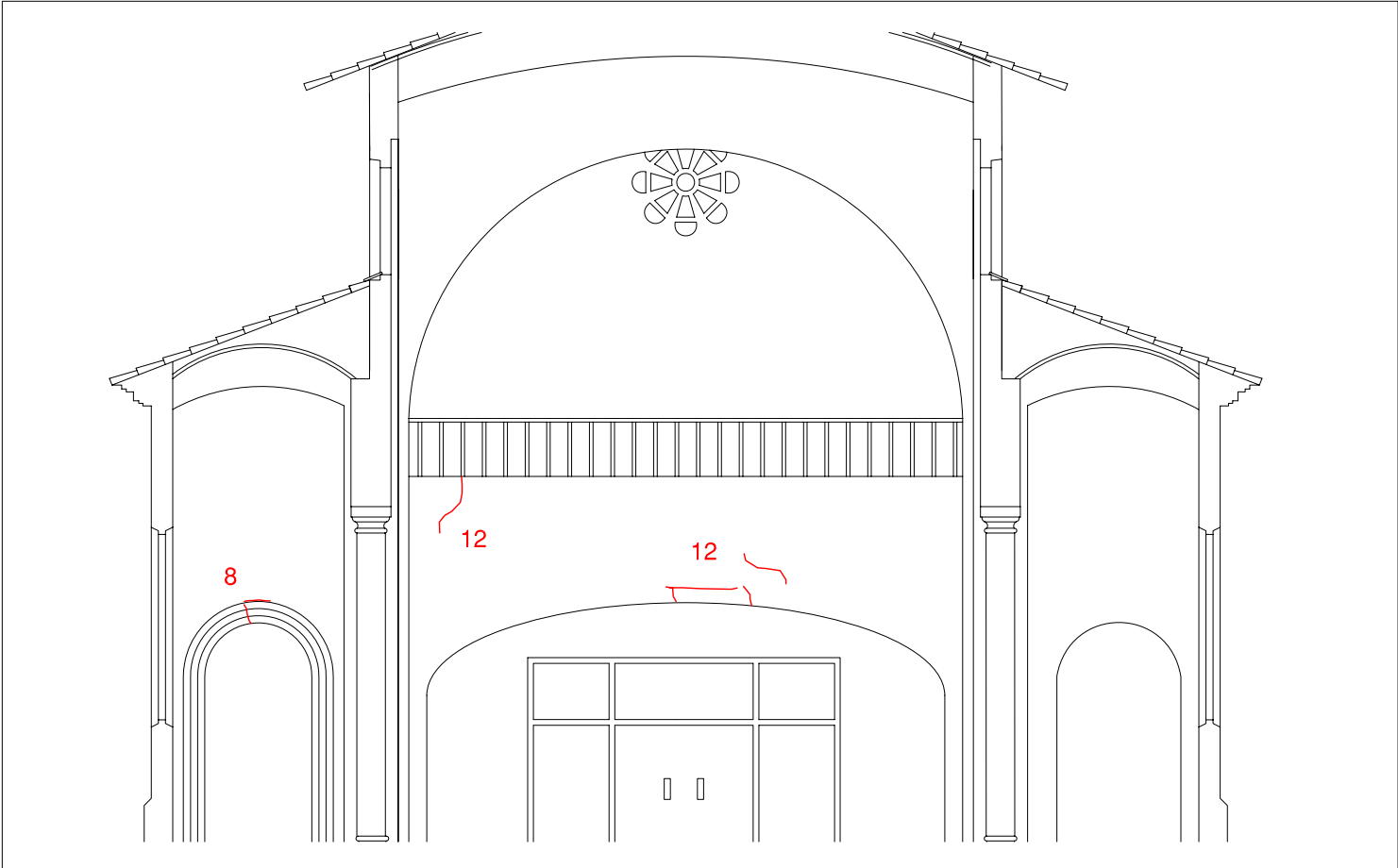
SECCIÓ, E=1/200:

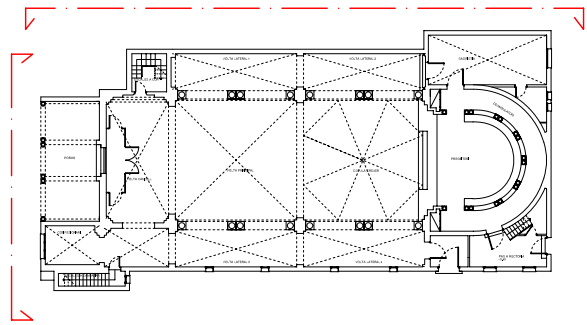


DETALL SECCIÓ 1, E=1/100:

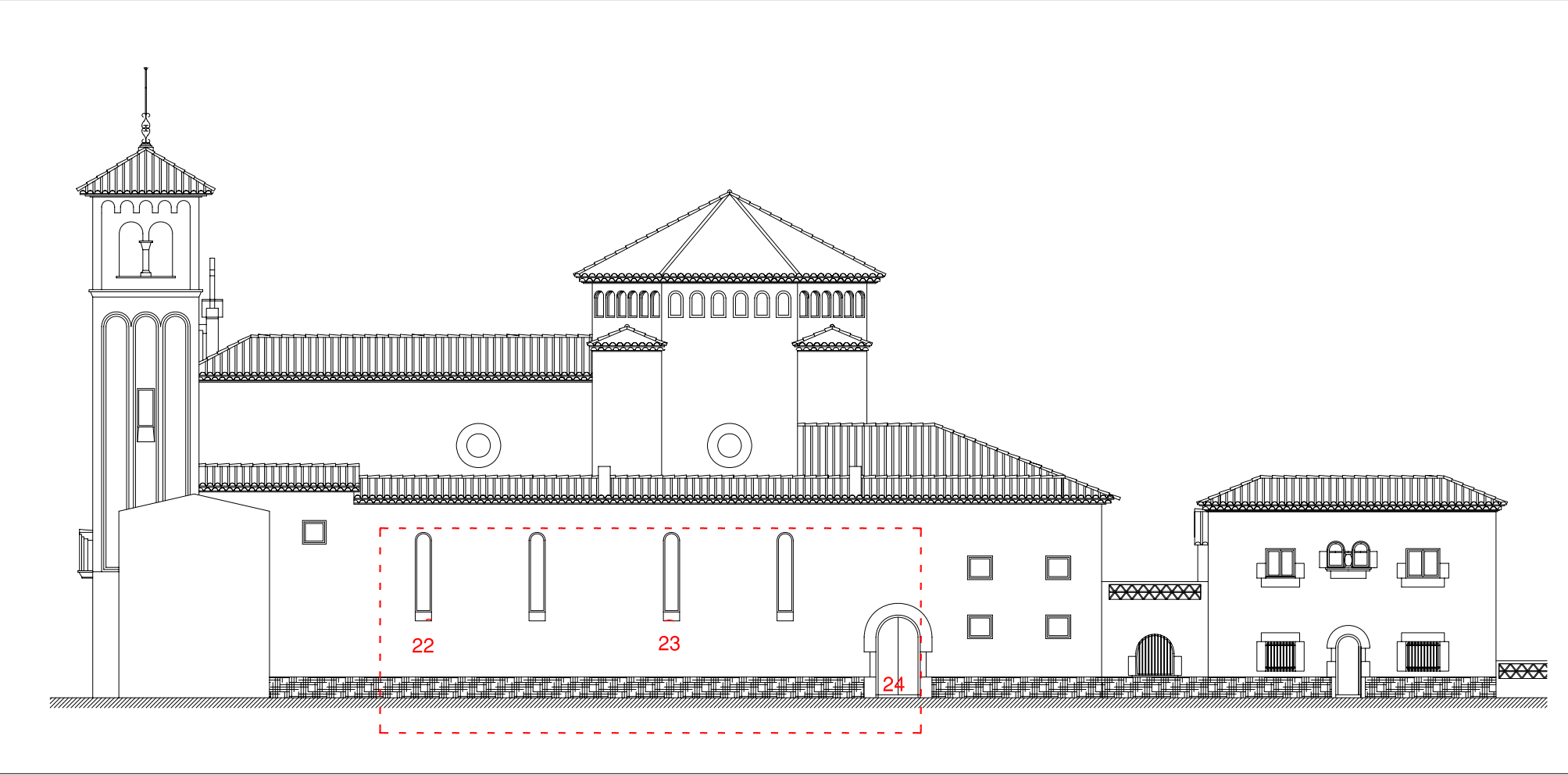


DETALL SECCIÓ 2, E=1/100:

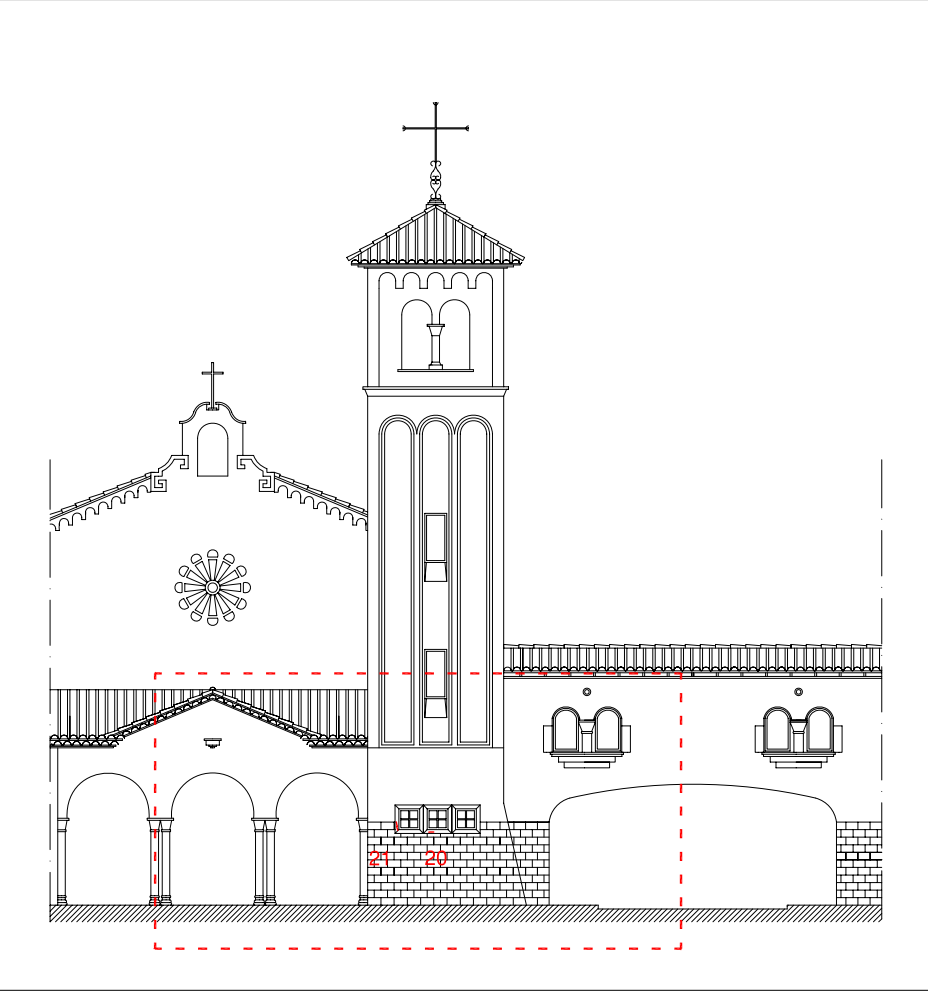




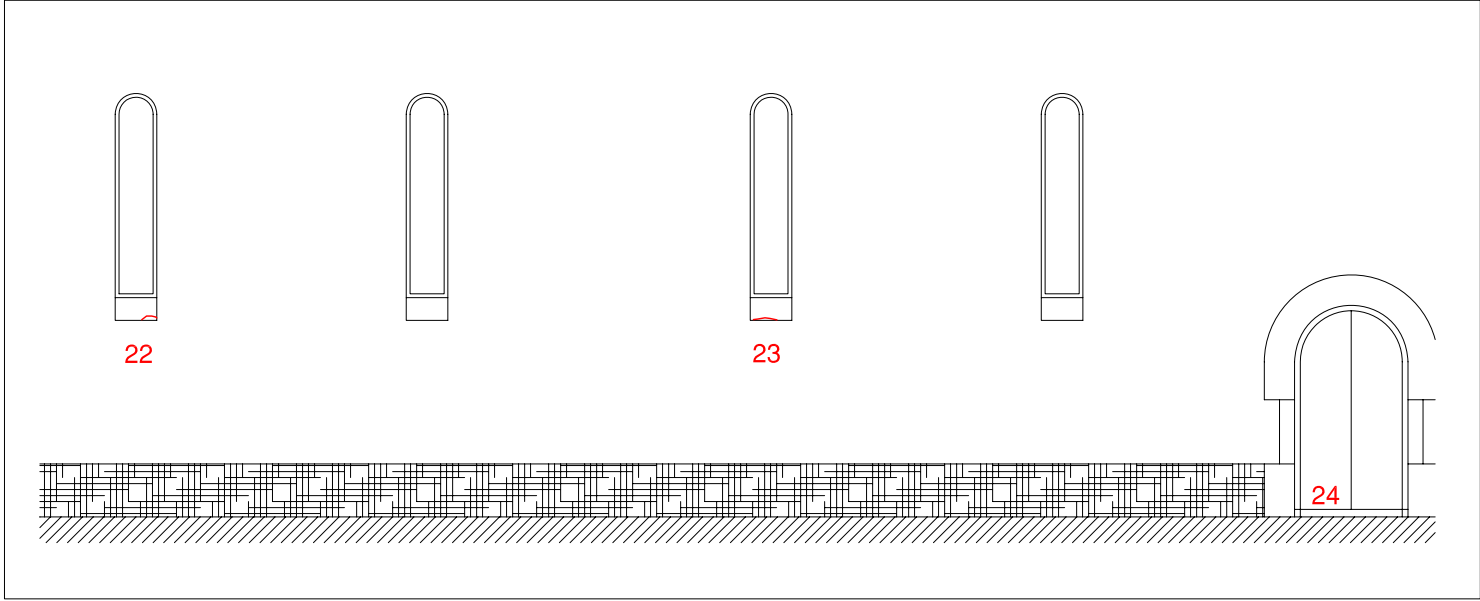
SITUACIÓ EN ALÇAT FAÇANA C/ROMA, E=1/200:



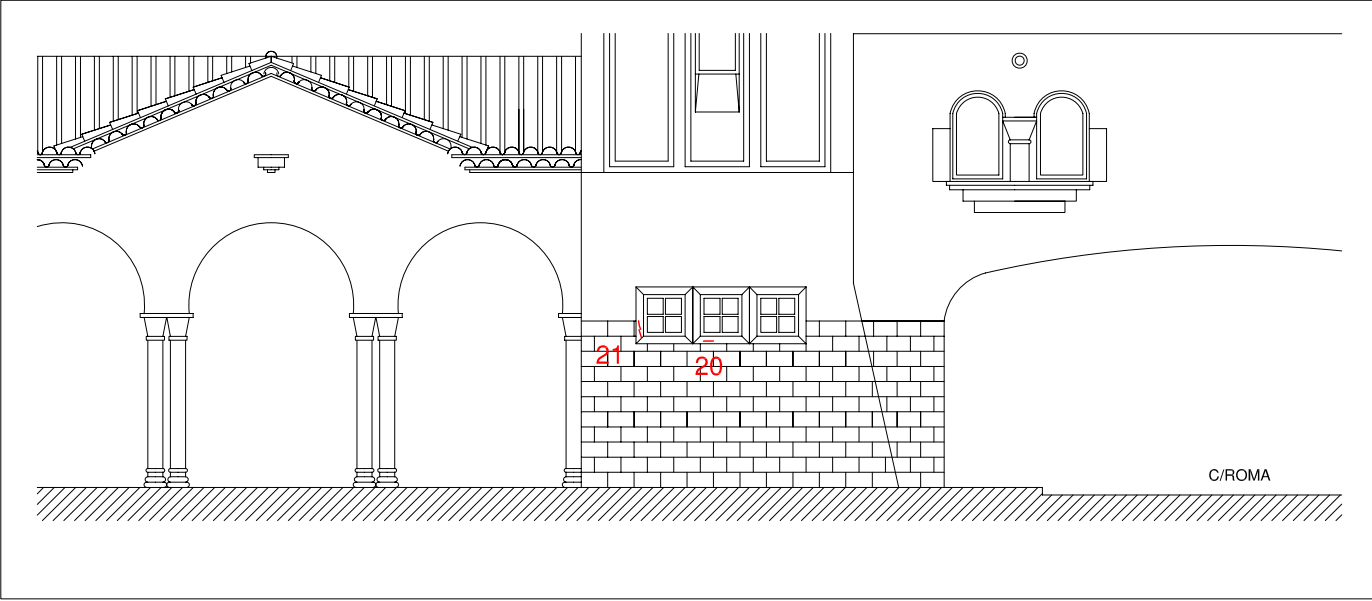
SITUACIÓ EN ALÇAT FAÇANA PL.ASSUMPCIÓ, E=1/200:



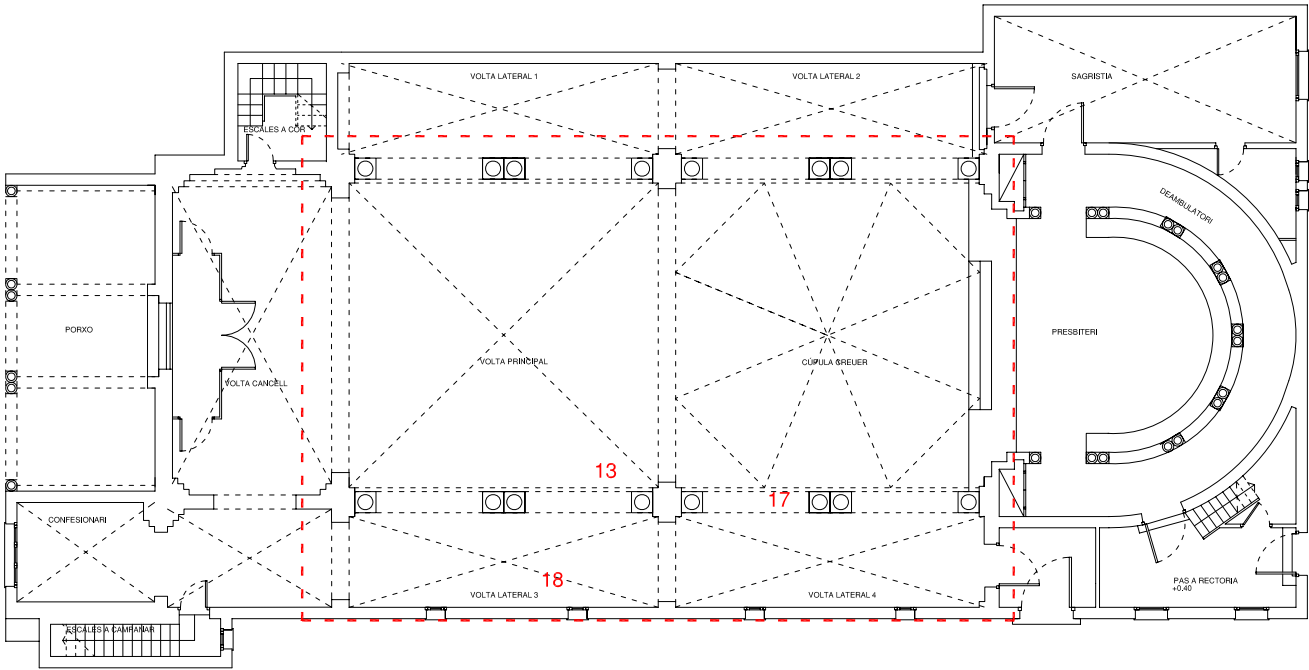
DETALL PATOLOGIA, E=1/100:



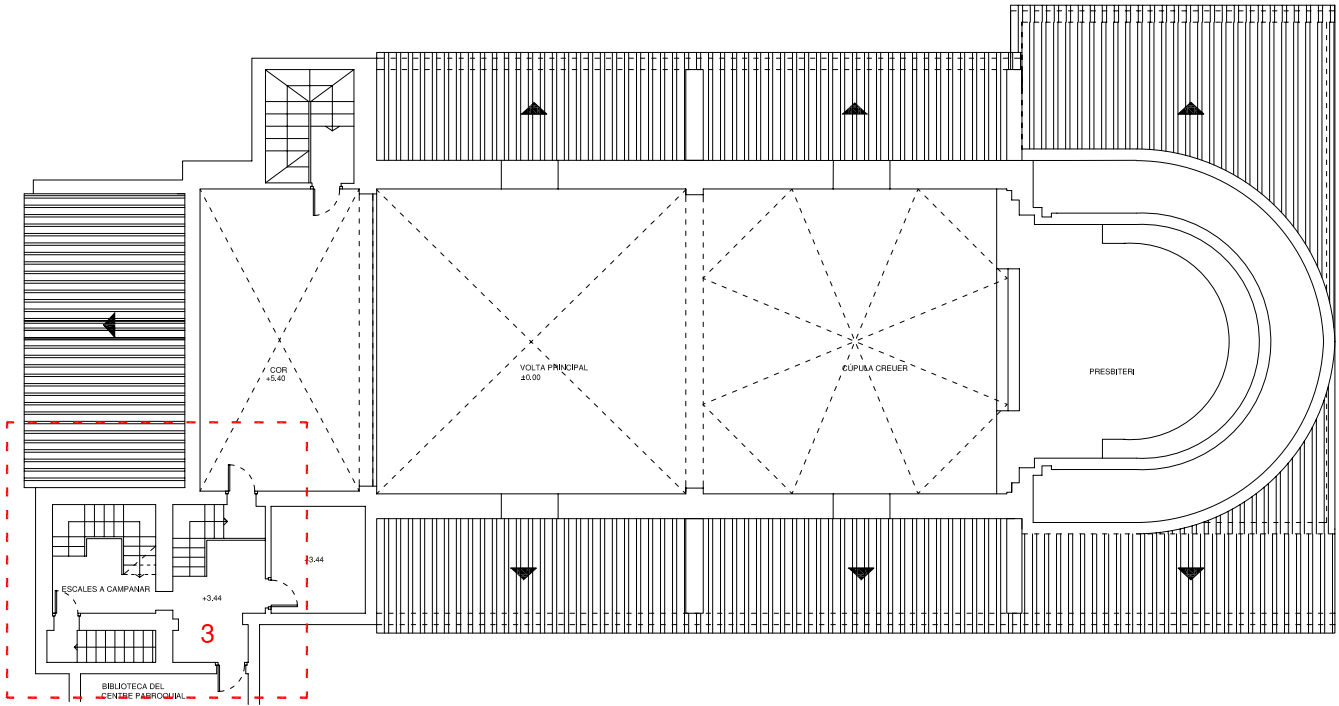
DETALL PATOLOGIA, E=1/100:



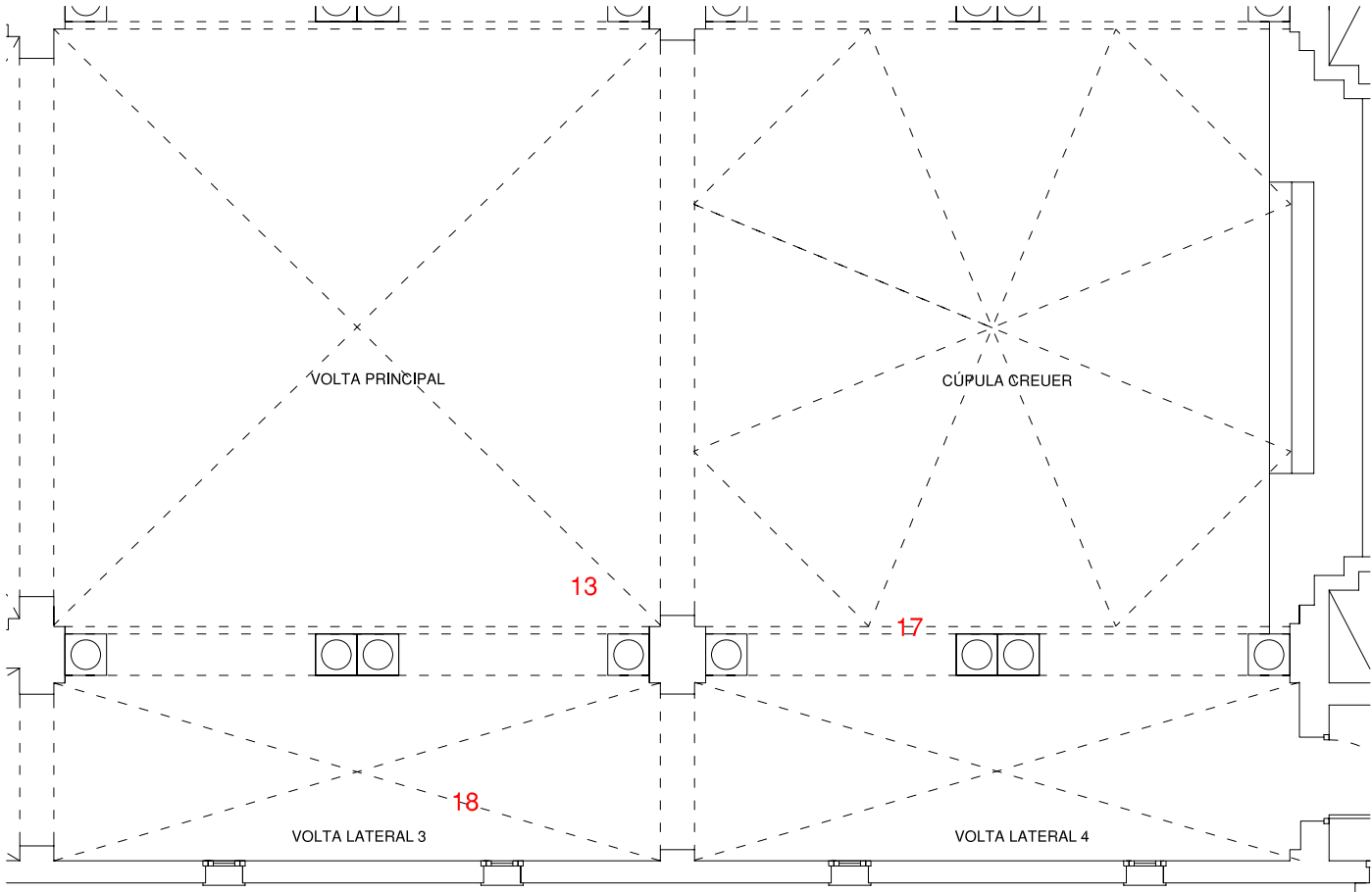
SITUACIÓ EN PLANTA, E=1/200:



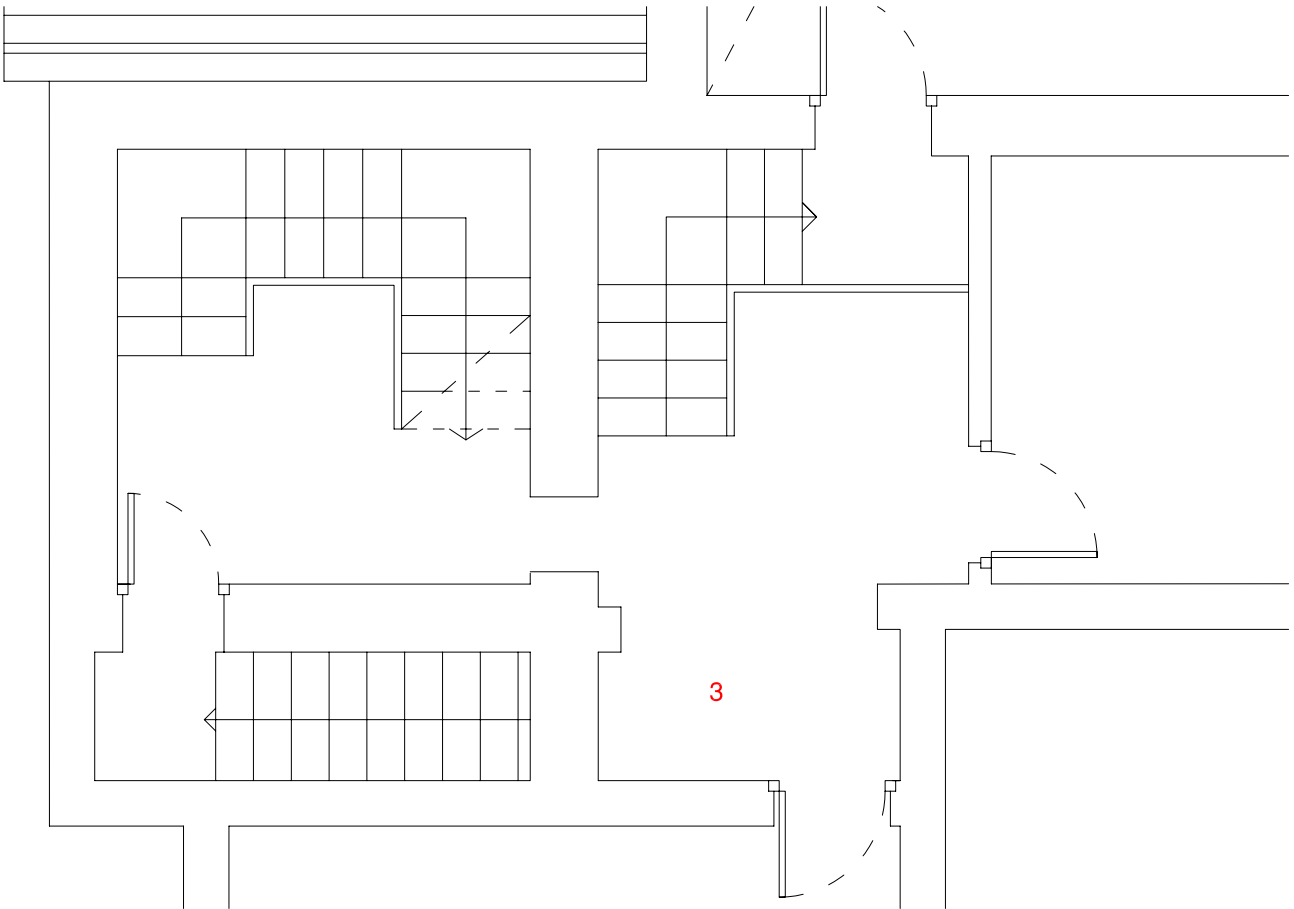
SITUACIÓ EN PLANTA, E=1/200:



DETALL SITUACIÓ, E=1/100:



DETALL SITUACIÓ, E=1/50:





4. ANÀLISI ESTRUCTURAL

A. ESTAT DE CÀRREGUES – MÈTODE DE CÀLCUL	pàg.101
1. Dades de la volta	pàg.101
2. Hipòtesis de càrrega	pàg.102
2.1. Accions permanents	pàg.102
2.2. Accions variables	pàg.104
3. Desenvolupament del càlcul simplificat	pàg.105
3.1. Valor d'empenta	pàg.105
3.2. Càlcul de la secció de ferro utilitzada	pàg.106
 B. CONSTANTS DE CÀLCUL	pàg.107
1. Materials utilitzats en la contrucció	pàg.107
1.1. Maó massís – 5 x 14 x 29 cm	pàg.107
1.2. Maó foradat – 4 x 14 x 29 cm	pàg.107
1.4. Teula àrab	pàg.108
1.5. Morter de ciment lent	pàg.108
1.6. Morter de guix	pàg.109
1.7. Formigó	pàg.109
1.8. Acer dolç	pàg.109
1.9. Fusteria	pàg.109
2. Comportament de la fàbrica de ceràmica	pàg.109
2.1. El mòdul d'elasticitat	pàg.110
2.2. El coeficient de Poisson	pàg.111
2.3. Límits de tensió a compressió i a tracció	pàg.112
2.4. Densitat	pàg.112
 C. DESENVOLUPAMENT DEL CÀLCUL	pàg.113
1. Introducció al mètode d'anàlisi	pàg.113
1.1. L'ANSYS	pàg.114



1.2. Puntualitats	pàg.116
2. Introducció a l'anàlisi estàtic lineal	pàg.117
3. Anàlisi estàtic lineal de la volta – <i>shell 63</i>	pàg.118
3.1. Creació del model – <i>preprocessor</i>	pàg.118
3.1.1. Elements tipus	pàg.119
3.1.2. Propietats del material	pàg.120
3.1.3. Constants reals	pàg.121
3.1.4. Geometria	pàg.122
3.1.5. Mallat	pàg.126
3.2. Definició de les condicions de contorn – <i>solve</i>	pàg.129
3.3. Lectura de resultats – <i>postprocessor</i>	pàg.132
3.3.1. Deformada	pàg.132
3.3.2. Reaccions	pàg.138
3.3.3. Tensions	pàg.139
4. Anàlisi estàtic lineal de la volta – <i>solid 45</i>	pàg.143
4.1. Creació del model – <i>preprocessor</i>	pàg.143
4.1.1. Elements tipus	pàg.143
4.1.2. Propietats del material	pàg.144
4.1.3. Constants reals	pàg.144
4.1.4. Geometria	pàg.144
4.1.5. Mallat	pàg.146
4.2. Definició de les condicions de contorn – <i>solve</i>	pàg.147
4.3. Lectura de resultats – <i>postprocessor</i>	pàg.152
4.3.1. Deformada	pàg.152
4.3.2. Reaccions	pàg.153
4.3.3. Tensions	pàg.154
5. Anàlisi estàtic lineal de la cúpula - <i>shell 63</i>	pàg.157
5.1. Creació del model – <i>preprocessor</i>	pàg.157
5.1.1. Elements tipus	pàg.157
5.1.2. Propietats del material	pàg.158



5.1.3. Constants reals	pàg.158
5.1.4. Geometria	pàg.158
5.1.5. Mallat	pàg.161
5.2. Definició de les condicions de contorn – <i>solve</i>	pàg.162
5.3. Lectura de resultats – <i>postprocessor</i>	pàg.164
5.3.1. Deformada	pàg.164
5.3.2. Reaccions	pàg.167
5.3.3. Tensions	pàg.167
6. Anàlisi estàtic lineal de la cúpula- <i>solid 45</i>	pàg.170
6.1. Creació del model – <i>preprocessor</i>	pàg.170
6.1.1. Elements tipus	pàg.170
6.1.2. Propietats del material	pàg.170
6.1.3. Constants reals	pàg.170
6.1.4. Geometria	pàg.171
6.1.5. Mallat	pàg.172
6.2. Definició de les condicions de contorn – <i>solve</i>	pàg.173
6.3. Lectura de resultats – <i>postprocessor</i>	pàg.175
6.3.1. Deformada	pàg.175
6.3.2. Reaccions	pàg.175
6.3.3. Tensions	pàg.176
7. Introducció a l'anàlisi estàtic no lineal	pàg.176
8. Anàlisi estàtic no lineal de la volta – <i>solid 45</i>	pàg.178
8.1. Creació del model – <i>preprocessor</i>	pàg.178
8.1.1. Elements tipus	pàg.178
8.1.2. Propietats del material	pàg.178
8.1.3. Constants reals	pàg.179
8.1.4. Geometria	pàg.179
8.1.5. Mallat	pàg.179
8.2. Definició de les condicions de contorn – <i>solve</i>	pàg.179
8.3. Lectura de resultats – <i>postprocessor</i>	pàg.181



8.3.1. Deformada	pàg.182
8.3.2. Reaccions	pàg.186
8.3.3. Tensions	pàg.187
9. Anàlisi de la patologia del pilar	pàg.190
9.1. Creació del model de pilar	pàg.190
9.1.1. Elements tipus	pàg.190
9.1.2. Propietats del material	pàg.191
9.1.3. Constants reals	pàg.191
9.1.4. Geometria	pàg.191
9.1.5. Mallat	pàg.192
9.2. Anàlisi amb càrrega centrada	pàg.192
9.2.1. Condicions de contorn	pàg.192
9.2.2. Lectura de resultats	pàg.193
9.3. Anàlisi amb càrrega descentrada	pàg.195
9.3.1. Condicions de contorn	pàg.195
9.3.2. Lectura de resultats	pàg.196
D. INTERPRETACIÓ DE RESULTATS	pàg.197
1. Introducció	pàg.197
2. Tipologia d'element	pàg.198
2.1. Models shell	pàg.198
2.2. Models sòlid	pàg.198
3. Tipologia d'anàlisi	pàg.200
3.1. Anàlisi lineal	pàg.200
3.2. Anàlisi no lineal	pàg.200
4. Tipologia de volta	pàg.201
5. Pilar pedra artificial	pàg.201

A. ESTAT DE CÀRREGUES – MÈTODE DE CÀLCUL

En aquest apartat es durà a terme la descripció del mètode de càlcul de les voltes de quatre punts que ideà Ignasi Bosch. L'arquitecte desenvolupà un mètode de càlcul senzill i aproximat amb la fi de que fos entenedor pel major nombre de persones i així afavorir a que s'apliqués a més construccions. Amb l'objectiu de fer-lo fàcil la teoria de càlcul no contempla l'esfericitat de la volta¹ ni el mòdul d'elasticitat.

Així que, en aquest capítol es desenvoluparà un exemple del càlcul que ell proposà i que alhora servirà com a base per determinar-ne l'estat de càrregues amb que es treballarà. La volta escollida per realitzar l'exemple i sobre la qual també es desenvoluparà l'anàlisi amb ANSYS, és la situada a la nau principal de l'església de Sant Narcís².

1. DADES DE LA VOLTA:

- Area: $8,18 \times 8,06 = 65,93 \text{ m}^2$
- Llum arc diagonal: 11,46 m
- Gruix volta: 4 cm.
- Fletxa arc diagonal: $\frac{\sqrt{8,18^2 + 8,06^2}}{10} = 11,5 \text{ m}$
- Fletxa generadors: $\frac{1,15}{2} = 0,57 \text{ m}$
- Fletxa directors: 0,57 m

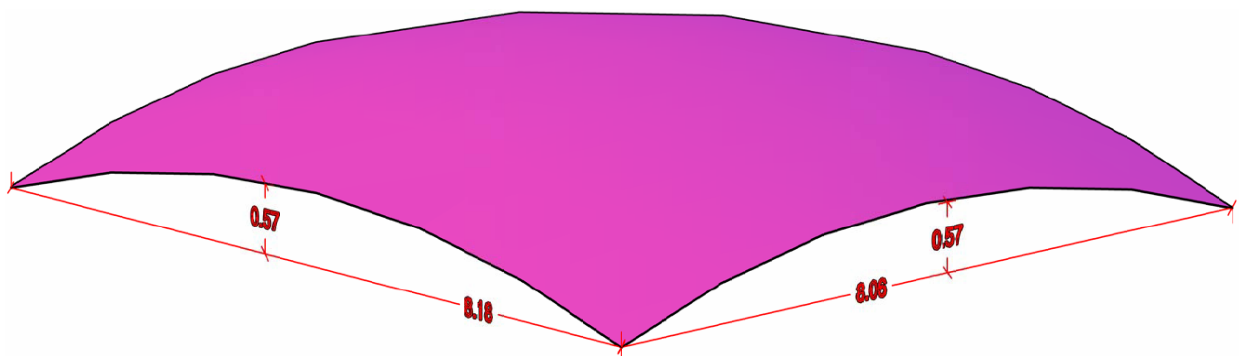


FIG 1: Imatge en isomètric de la volta de la nau principal

¹ Jordi Collell, Carles.2005.

² Veure plànols

2. HIPÒTESIS DE CÀRREGA³:

La hipòtesi de càrrega es pot fer en base el document bàsic del codi tècnic SE-AE (Seguretat estructural - accions en la edificació). Tot i així cal considerar que aquesta normativa no és del tot aplicable en aquest cas, ja que les consideracions fetes per l'arquitecte en el disseny i elecció dels materials és molt diferent de les construccions actuals.

2.1. Accions permanents:

En l'annex C del SE-AE s'inclouen els pesos dels materials, productes i elements constructius més tradicionals. Per calcular el pes propi de la volta es prendrà com a pes específic del maó foradat el valor que s'indica en la taula C.1 de l'annex c.

Tabla C.1 Peso específico aparente de materiales de construcción

Materiales y elementos	Peso específico aparente kN/m ³	Materiales y elementos	Peso específico aparente kN/m ³
Materiales de albañilería		Madera	
Arenisca	21,0 a 27,0	Aserrada, tipos C14 a C40	3,5 a 5,0
Basalto	27,0 a 31,0	Laminada encolada	3,7 a 4,4
Calizas compactas, mármoles	28,0	Tablero contrachapado	5,0
Diorita, gneis	30,0	Tablero cartón gris	8,0
Granito	27,0 a 30,0	Aglomerado con cemento	12,0
Sienita, diorita, pórfido	28,0	Tablero de fibras	8,0 a 10,0
Terracota compacta	21,0 a 27,0	Tablero ligero	4,0
Fábricas		Metales	
Bloque hueco de cemento	13,0 a 16,0	Acero	77,0 a 78,5
Bloque hueco de yeso	10,0	Aluminio	27,0
Ladrillo cerámico macizo	18,0	Bronce	83,0 a 85,0
Ladrillo cerámico perforado	15,0	Cobre	87,0 a 89,0
Ladrillo cerámico hueco	12,0	Estaño	74,0
Ladrillo silicocalcáreo	20,0	Hierro colado	71,0 a 72,5
Mampostería con mortero		Hierro forjado	76,0
de arenisca	24,0	Latón	83,0 a 85,0
de basalto	27,0	Plomo	112,0 a 114,0
de caliza compacta	26,0	Zinc	71,0 a 72,0
de granito	26,0	Plásticos y orgánicos	
Sillería		Caucho en plancha	17,0
de arenisca	26,0	Lámina acrílica	12,0
de arenisca o caliza porosas	24,0	Linóleo en plancha	12,0
de basalto	30,0	Mástico en plancha	21,0
de caliza compacta o mármol	28,0	Poliestireno expandido	0,3
de granito	28,0	Otros	
Hormigones y morteros		Adobe	16,0
Hormigón ligero	9,0 a 20,0	Asfalto	24,0
Hormigón normal ⁽¹⁾	24,0	Baldosa cerámica	18,0
Hormigón pesado	> 28,0	Baldosa de gres	19,0
Mortero de cemento	19,0 a 23,0	Papel	11,0
Mortero de yeso	12,0 a 28,0	Pizarra	29,0
Mortero de cemento y cal	18,0 a 20,0	Vidrio	25,0
Mortero de cal	12,0 a 18,0		

⁽¹⁾ En hormigón armado con armados usuales o fresco aumenta 1 kN/m³

³Aquesta hipòtesi de càrrega calculada també s'aplicarà a l'anàlisi estructural

a) Volta:

- i) Un maó massís de dimensions 4 x 14 x 29 cm té un volum de $1,56 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$. Si el pes aproximat d'aquest material és d 12 Kn/m^3 , s'obté que el pes unitari és de 0,029 Kn.

$$0,04 \times 0,14 \times 0,29 = 1,56 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$\frac{12 \text{ Kn}}{\text{m}^3} \times 1,56 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 = 0,023 \text{ Kn}$$

- ii) Si en un m^2 de volta hi ha unes 25,5 peces de maó massís de les dimensions esmentades, el pes per m^2 de la volta és de **0,71 Kn/m²**.

$$0,28 \times 0,14 = 0,039 \text{ m}^2/\text{ut}$$

$$\frac{1 \text{ m}^2}{0,039 \text{ m}^2} = 25,52 \text{ ut/m}^2 \text{ aprox.}$$

$$\frac{25,51 \text{ ut}}{\text{m}^2} \times \frac{0,023 \text{ Kn}}{\text{ut}} = 0,59 \text{ Kn/m}^2$$

b) Coberta:

- iii) Segons la normativa, el pes propi d'elements constructius, es troba recollit en la taula C.5 de l'annex C del SE-AE, la opció de la taula que s'ajusta més a la coberta a estudiar és la de faldons de teula sobre taulers i envanets conillers, amb un pes de $3,00 \text{ Kn/m}^2$. Aquesta és una consideració molt optimista degut a que els materials de l'església de Sant Narcís són més lleugers que els considerats per la normativa. Per tant es prendrà com a pes propi de la coberta el valor de 2 Kn/m^2 .

TOTAL PERMANENT: $2,59 \text{ Kn/m}^2$

2.2. Accions variables:

c) Sobrecàrrega d'ús:

Segons el document bàsic de seguretat estructural s'hauria de considerar el valor característic de sobrecarrega d'ús, que correspondria a la categoria G de la taula 3.1 "cobertes accessibles únicament per a la conservació", amb un resultat de càrrega uniforme de $1,00 \text{ Kn/m}^2$. Tanmateix no es considerarà aquest valor, ja que correspon a un factor que segurament no es valorava en el càlcul.

Tabla 3.1 Valores característicos de las sobrecargas de uso

Categoría de uso		Subcategorías de uso		Carga uniforme [kN/m ²]	Carga concentrada [kN]
A	Zonas residenciales	A1	Viviendas y zonas de habitaciones en, hospitales y hoteles	2	2
		A2	Trasteros	3	2
B	Zonas administrativas			2	2
C	Zonas de acceso al público (con la excepción de las superficies pertenecientes a las categorías A, B, y D)	C1	Zonas con mesas y sillas	3	4
		C2	Zonas con asientos fijos	4	4
		C3	Zonas sin obstáculos que impidan el libre movimiento de las personas como vestíbulos de edificios públicos, administrativos, hoteles; salas de exposición en museos; etc.	5	4
		C4	Zonas destinadas a gimnasio u actividades físicas	5	7
		C5	Zonas de aglomeración (salas de conciertos, estadios, etc)	5	4
D	Zonas comerciales	D1	Locales comerciales	5	4
		D2	Supermercados, hipermercados o grandes superficies	5	7
E	Zonas de tráfico y de aparcamiento para vehículos ligeros (peso total < 30 kN)			2	20 ⁽¹⁾
F	Cubiertas transitables accesibles sólo privadamente ⁽²⁾			1	2
G	Cubiertas accesibles únicamente para conservación ⁽³⁾	G1	Cubiertas con inclinación inferior a 20°	1 ⁽⁴⁾	2
		G2	Cubiertas con inclinación superior a 40°	0	2

d) Neu:

Si per conèixer el valor s'aplica la fórmula $Q_n = \mu \cdot s_k$, μ és 1 i s_k 0,4, s'arriba a determinar una càrrega variable de neu de **0,4 Kn/m²**.

Tabla 3.7 Sobrecarga de nieve en capitales de provincia y ciudades autónomas

Capital	Altitud m	s_k kN/m ²	Capital	Altitud m	s_k kN/m ²	Capital	Altitud m	s_k kN/m ²
Albacete	690	0,6	Guadalajara	680	0,6	Pontevedra	0	0,3
Alicante / Alacant	0	0,2	Huelva	0	0,2	Salamanca	780	0,5
Almería	0	0,2	Huesca	470	0,7	San Sebastián/Donostia	0	0,3
Ávila	1.130	1,0	Jaén	570	0,4	Santander	0	0,3
Badajoz	180	0,2	León	820	1,2	Segovia	1.000	0,7
Barcelona	0	0,4	Lérida / Lleida	150	0,5	Sevilla	10	0,2
Bilbao / Bilbo	0	0,3	Logroño	380	0,6	Soria	1.090	0,9
Burgos	860	0,6	Lugo	470	0,7	Tarragona	0	0,4
Cáceres	440	0,4	Madrid	660	0,6	Tenerife	0	0,2
Cádiz	0	0,2	Málaga	0	0,2	Teruel	950	0,9
Castellón	0	0,2	Murcia	40	0,2	Toledo	550	0,5
Ciudad Real	640	0,6	Orense / Ourense	130	0,4	Valencia/València	0	0,2
Córdoba	100	0,2	Oviedo	230	0,5	Valladolid	690	0,4
Coruña / A Coruña	0	0,3	Palencia	740	0,4	Vitoria / Gasteiz	520	0,7
Cuenca	1.010	1,0	Palma de Mallorca	0	0,2	Zamora	650	0,4
Gerona / Girona	70	0,4	Palmas, Las	0	0,2	Zaragoza	210	0,5
Granada	690	0,5	Pamplona/Iruña	450	0,7	Ceuta y Melilla	0	0,2

TOTAL VARIABLE: 0,4 Kn/m²

TOTAL CÀRREGA: 2,59+0,4 : 3,00 Kn/m²

3. DESENVOLUPAMENT DEL CÀLCUL:⁴

H: empenta horitzontal segons direcció diagonal

P: Càrrega unitària de la volta (3,00 Kn/m²)

a i b: costats de la volta (8,18 i 8,06 m respec.)

l: llum de l'arc diagonal (11,46 m)

f: fletxa de l'arc diagonal (1,15 m)

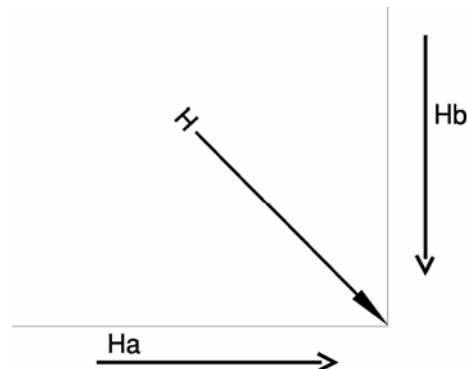


FIG 2: Composició de les empentes

3.1. Valor d'empenta:

$$H = \frac{P \times a \times b \times l}{2 \times f \times 8} = \frac{300 \times 8,18 \times 8,06 \times 11,46}{2 \times 1,15 \times 8} = 12319,0 \text{ Kg}$$

⁴ Per veure el desenvolupament de l'estudi que dóna com a resultat les fórmules de càlcul utilitzades, consultar el llibre "Les voltes de quatre punts, Cabrera, Albert. 2005".

3.2. Càlcul de la secció de ferro utilitzada:

- Empenta horitzontal a i b

$$H_a = H_b = \frac{H \times a}{l}$$

$$H_a = \frac{12,3 \times 8,18}{11,46} = 8,77 \text{ Tn}$$

$$H_b = \frac{12,3 \times 8,06}{11,46} = 8,65 \text{ Tn}$$

- Secció de ferro a col·locar

$$S_a = \frac{H_a}{f_{yd}} = \frac{8,77}{4,00} = 2,20 \text{ cm}^2 \text{ que equivaldria a 1 rodó de 20 mm}$$

$$S_b = \frac{H_b}{f_{yd}} = \frac{8,65}{4,00} = 2,16 \text{ cm}^2 \text{ que equivaldria a 1 rodó de 20 mm}$$

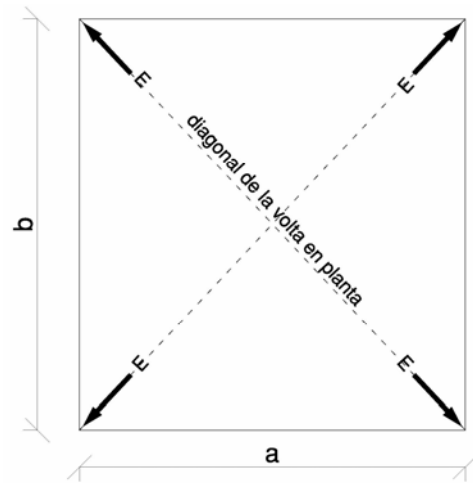


FIG 3: Distribució de les empentes

B. CONSTANTS DE CàLCUL

1. MATERIALS UTILITZATS EN LA CONSTRUCCIÓ¹

En aquest apartat es procedeix a la identificació i caracterització dels materials que conformen i envolten la volta objecte de l'estudi amb la fi de conèixer les propietats.

1.1. MAÓ MASSÍS – 5 x 14 x 29 cm:

S'ha utilitzat el maó massís de 5 x 14 x 29 col·locat en pla per la formació de les fulles exteriors de parets de tancament on la peça quedava vista.

Mesura: 5 x 14 x 29 cm

Pes/unitat: 1,8 kg

Peces/m² (en projecció): 32 ut aprox.



FIG 1: Maó massís

1.2. MAÓ FORADAT – 4 x 14 x 29 cm:

El maó foradat s'usà per a la formació de les voltes, per a l'execució dels envans de sostre mort en sotacoberta, per a la formació de les soleres que realitzaven la funció de suport de les teules o bé pels envans interiors o parets exteriors que no quedaven vistes

Mesura: 4 x 14 x 29 cm

Pes/unitat: 1,5 kg

Peces/m²: 24 ut aprox.



FIG 2: Maó foradat

¹ PFC Marina Riera i Gigliola Defranchi, 2004.

1.3. TEULA ÀRAB

Les peces d'acabat de les cobertes són de teula àrab de color roig natural. Les teules es col·locaven directament a sobre de la solera realitzada amb maons foradats. Les filades mestres anaven preses amb morter de ciment lent. Cal destacar que no es col·locava cap tipus d'aïllament, ni entre els envanets de sostre mort, ni a sobre de la solera.

Mesures:

A = 22,5 cm	B = 18 cm
C = 8,5 cm	D = 6,5 cm
E = 1,5 cm	F = 50 cm
Pes/unitat: 2,5 kg	Peces/m ² : 25 ut.

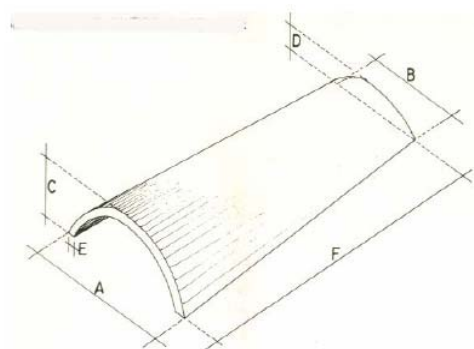


FIG 3: Teula àrab

1.4. MORTER DE CIMENT LENT

El morter de ciment lent estava format per la mescla de sorra amb calç apagada i aigua i tenia un adormiment molt lent. La sorra era aconsellable que fos de riu o de mina. Un fet que el diferencia d'un morter de ciment ràpid o d'un morter de ciment pòrtland és que el % d'argiles i el % de graves de la barreja són diferents.

Aquest tipus de morter, si es deixava fraguar bé, adquiria una duresa important que en determinats casos podia superar a la del ciment pòrtland. Les dosificacions més emprades per aquest tipus de morter són:

Tipus	Cal (kg)	Sorra(m ³)	Aigua (m ³)
1/2	335	0,96	0,29
1/3	240	0,5	0,275



1.5. MORTER DE GUIX

El morter de guix està format per guix, aigua i sorra. A la hora de fabricar el guix es va coure aquest a alta temperatura i es va barrejar amb guix lent fet a trossos per posteriorment amassar-lo. La sorra havia de ser silici i sense gaires argiles; a més, havia de ser molt fina.

1.6. FORMIGÓ

En l'església s'utilitzà el formigó per reomplir les parts de càrrega que tenien la fi d'aguantar voltes de grans llums. Aquest tipus de formigó era del tipus ciclopi i pel que s'aprecia en les fotos hi predominava molt més la pedra que la massa del formigó.

1.7. ACER DOLÇ

En la construcció del grup Sant Narcís només es van utilitzar perfils d'acer dolç en els perímetres de les parets que tancaven les voltes d'edificis grans, com les de l'església.

1.8. FUSTERIA

La fusteria utilitzada era de pi de Flandes.

2. COMPORTAMENT DE LA FÀBRICA DE CERÀMICA

El Mètode de càlcul dels Elements Finit² (MEF), com n'és el càlcul elàstic que es durà a terme, assimila la fàbrica a un continu al qual atribueix propietats elàstiques. Aquestes venen definides per dues constants, el mòdul de Young³ i el de Poisson³, que determinaran el comportament elàstic lineal i isòtrop de la fàbrica.

² Explicat en l'apartat d'obtenció de resultats

³ Explicat en les pàgines següents

Per entendre millor el que s'està exposant, cal recordar que els materials elàstics i isòtrops són els que presenten el mateix comportament mecànic per a qualsevol direcció d'estirament al voltant d'un punt.

Tanmateix, per a la realització d'un anàlisi on es pretén reproduir el comportament real de la volta no és viable prendre com a constants elàstiques els valors que proporciona la normativa, ja que estan dimensionats en base uns coeficients de seguretat.

Així que amb la fi d'ajustar al màxim l'anàlisi estructural de la volta que es durà a terme, s'han consultat diferents estudis on es realitzaven proves experimentals que permetien conèixer els valors de comportament reals de les fàbriques ceràmiques.

2.1. EL MÒDUL D'ELASTICITAT

Un dels valors fonamentals per conèixer el comportament d'un material és el mòdul de Young o mòdul d'elasticitat.

El mòdul d'elasticitat per a materials isòtrops lineals és una constant sempre i quan es treballi amb valors de tensió que quedin dins el rang de deformació reversible, tal i com es mostra en el següent diagrama de tensió - deformació de la fàbrica.

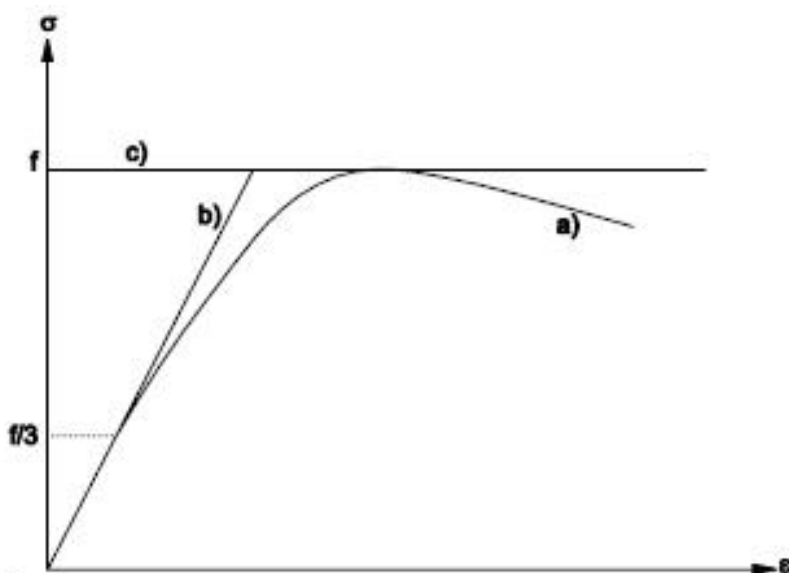


FIG 4: Diagrama tensió - deformació de la fàbrica

- Com a forma genèrica es segueix la representació de "a"
- Els diagrames "b" i "c" són els que s'adopten per a la realització del càlcul

El valor es defineix mitjançant el coeficient de tensió i deformació que apareixen en una barra recta estirada que estigui composta pel material que volem analitzar. Per tant, el mòdul de Young s'obté del resultat de la següent operació.

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon}$$

E : mòdul d'elasticitat longitudinal.

σ : tensió sobre la barra utilitzada per determinar el mòdul de elasticitat.

ϵ : deformació unitària en qualsevol punt de la barra.

S'han consultat diverses fonts per tal de concretar al màxim aquest valor de deformació. Tot i que en un inici es va plantejar escollir el mòdul de deformació experimental determinat per l'Arnau Blancafort en el seu projecte, de 11000 MPa; es va considerar que era massa alt ja que els mòduls de deformació per a la ceràmica solen ser més baixos. A més, tot i que ell estudià el mateix model de volta la composició del material no era la mateixa, amb el que es va creure oportú consultar altres fonts que analitzessin la deformació ceràmica, com són el CTE o altres PFC. Aquests coincidien en un marge de valors més reduïts, amb el que es va determinar que el més correcte per aquest cas era de 6000 MPa.

Cal remarcar que es considera el mòdul d'elasticitat com a fàbrica, és a dir, com a conjunt de morter i ceràmica.

2.2. EL COEFICIENT DE POISSON

El coeficient de Poisson " ν ", es una constant elàstica que proporciona una mesura de l'estrenyiment de secció d'un prisma de material homogeni (composició idèntica en tots els punts del cos) i isòtrop (mateixes propietats elàstiques en totes les direccions) quan s'estira longitudinalment i s'aprima en les direccions perpendiculars a la de l'estirament.

La fórmula per al càlcul del coeficient de Poisson és:

$$\nu = - \frac{\epsilon_{lat}}{\epsilon_{long}}$$

En aquest cas, el valors de diferents estudis estimen que les característiques de la ceràmica corresponen a un coeficient de Poisson de 0,3 ut.

2.3. LÍMITS DE TENSIÓ A COMPRESSIÓ I A TRACCIÓ

Els límits de tensió a tracció i a compressió sempre seran equivalents al mòdul de Young adoptat. Per tant, si aquest és de 6000 MPa es considerarà:

Límit a compressió: 6 MPa

Límit a tracció: 0,6 MPa

2.4. DENSITAT

La densitat ha estat considerada segons les especificacions del CTE, tal i com ja s'ha explicat en l'apartat d'estats de càrrega d'aquest mateix projecte. Per tant, es prendrà com a valor de densitat del maó foradat 1200 Kg/m³.



C. DESENVOLUPAMENT DEL CÀLCUL

Un cop feta la introducció prèvia i determinats els paràmetres bàsics per dur a terme els diferents anàlisi, es procedeix a iniciar el càlcul estructural pròpiament dit.

Com ja s'ha anat dient, l'estudi que es farà en base dos tipologies de voltes que es troben a l'església de Sant Narcís, la de quatre punts i la cúpula semiesfèrica, i se'n realitzaran diferents tipus d'anàlisi per determinar quin és el model que aporta millors resultats.

1. INTRODUCCIÓ AL MÈTODE D'ANÀLISI

Les tasques de projectar i calcular estructures es basen en mètodes desenvolupats durant anys i que són part fonamental del que avui anomenem teoria d'estructures. El més avançat i popularitzat, gràcies al gran avanç dels ordinadors, és el numèric; dins d'aquest, el més general i apte per a tot tipus d'aplicacions és el dels elements finits.

Amb la fi d'evitar errors és convenient partir d'una base molt clara, per això cal remarcar:

- El mètode d'elements finits consisteix en la transformació d'un sistema real d'infinites incògnites a un model matemàtic de finites incògnites relacionades entre si per elements de mida finita, amb el que es pot aconseguir una interpretació del comportament de manera intuïtiva; aquest model matemàtic estaria format per:
 - o Nodes: localització en l'espai d'un punt on es consideraria que existeixen diferents graus de llibertat i accions del sistema físic, és a dir, el punt on s'ubiquen les variables de càlcul
 - o Elements: és una representació matemàtica que simula el domini; els elements estan connectats entre si gràcies als nusos, i és a través d'aquestes connexions que la informació passa d'un element als altres elements que estan connectats. Els elements poden ser puntuals, lineals, superficials...
 - o Condicions de contorn: poden ser restriccions de desplaçament, càrregues aplicades en nusos, pressions sobre els elements i

temperatura (en aquest projecte no s'estudien ja que no es considera la influència d'aquesta).

- Cada nus té certs graus de llibertat que caracteritzen la solució de les equacions diferencials que representen el problema que es vol resoldre.
- L'operació de discretització d'una determinada forma geomètrica en tot un conjunt d'elements, connectats entre sí per nusos, s'anomena mallat.

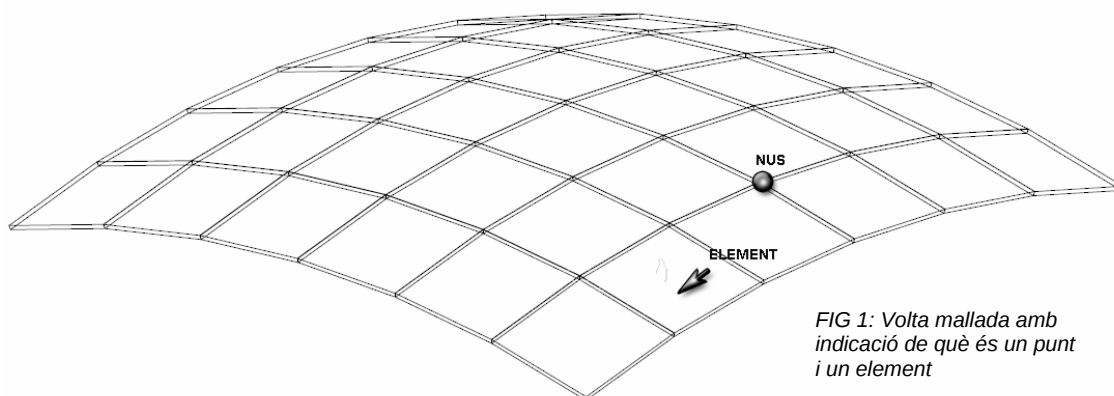


FIG 1: Volta mallada amb indicació de què és un punt i un element

1.1. L'ANSYS

Per a duu a terme l'anàlisi estructural es farà ús del programa informàtic ANSYS, aquest programa és una eina de gran utilitat per al càlcul mecànic i resistent d'estructures mitjançant el mètode d'elements finits.

Al programa ANSYS no se li introdueixen les unitats amb que es vol treballar, sinó que treballa amb unitats coherents. Per tant, s'ha de decidir quines unitats es faran servir per tal de respectar aquest criteri durant tot el treball. En aquest cas s'han considerat les següents unitats:

- Dimensions [m], per a totes les mesures de distància
- Forces i reaccions [N]
- Temps [seg]
- Massa [Kg]
- Pressions, tensions i esforços [Pa, N/m²]
- Velocitat [m/s]

- Acceleració [m/s^2]
- Densitat [Kg/m^3]
- Tensió [Pa , N/m^2]
- Mòdul de Young [Pa , N/m^2]

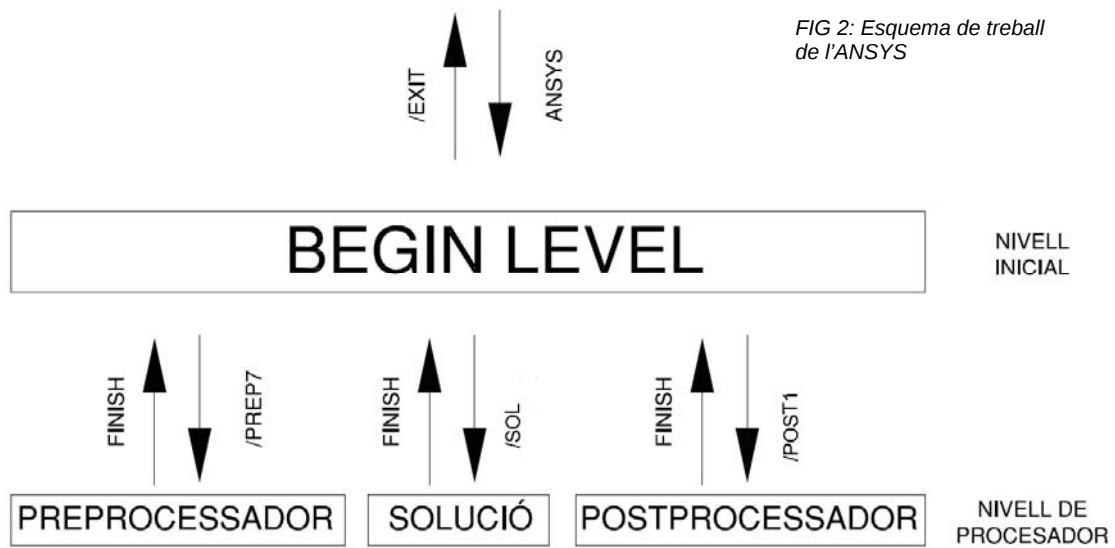
L'ANSYS classifica les operacions en tres nivells o processadors que parteixen d'un mateix *Main Menu*. Amb la fi de facilitar l'exposició del desenvolupament seguit per realitzar el càlcul, s'ha decidit adoptar aquesta mateixa forma de classificació:

- El preprocessador: inclou la construcció del model, definició de la geometria, materials, tipus i característiques dels elements.
- Solució: permet l'aplicació de càrregues, definició de la tipologia d'anàlisi a realitzar i obtenció de la solució.
- Postprocessador: permet diferents interpretacions del resultat, obtenció de taules, gràfics...

Formes de treball de l'ANSYS:

- Batch: s'introdueix un fitxer de processador de text que inclou una sèrie d'ordres. Aquest fitxer és el *.log i queda recollit en l'annex.
- Interactiu: es treballa mitjançant menús i/o ordres introduïts directament des de dins el programa. Aquesta és la forma de treball que s'exposa en aquest capítol, ja que és la més fàcil d'entendre.

En la següent imatge s'exposa l'esquema de treball d'ANSYS. En la forma interactiva aquest esquema no és important però en la introducció d'ordres és vital, ja que per canviar d'un processador a un altre cal que es retorni al nivell inicial mitjançant les ordres anotades al costat de les fletxes (/finish, /prep7, ...)

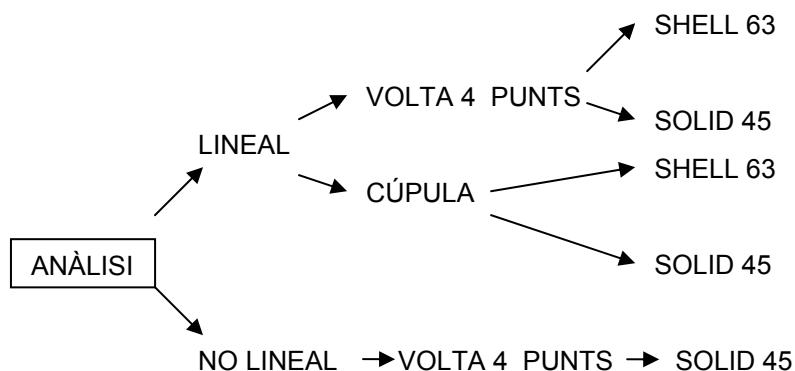


1.2. PUNTUALITATS

En aquest projecte es durà a terme dos tipus d'anàlisi estàtics, el lineal i el no lineal, i alhora s'aplicaran diferents tipus d'elements finits (el *shell* i el *solid*) per tal d'estudiar-ne els diferents comportaments. Posteriorment, en el capítol d'interpretació de resultats, es farà una comparativa dels resultats obtinguts.

El primer dels anàlisis que es farà, el lineal, és el més comú però alhora és el de menys rigor. Amb el segon, el no lineal, s'aconsegueixen resultats més exactes però el desenvolupament d'aquest és molt més complex.

A continuació es mostra el següent esquema, per tal de poder entendre millor el desenvolupament del capítol:



2. INTRODUCCIÓ A L'ANÀLISI ESTÀTIC LINEAL

S'aplicarà aquest mètode per tal de conèixer els esforços interns que actuen en l'element estructural envers les càrregues verticals aplicades i el pes propi considerat. Un material té un comportament elàstic quan al retirar la càrrega no hi ha deformació permanent. Contràriament, un material es considera que té comportament plàstic¹ quan al retirar la càrrega hi ha una deformació residual.

Pel que fa a la linealitat, cal dir que la majoria de materials estructurals tenen una zona inicial del diagrama tensió - deformació en que es comporten tant de forma elàstica com lineal, és a dir, una relació entre càrregues i tensions resultants lineal amb el que si es duplica la magnitud de la carga, s'obté el doble de resposta del model.

Tot i que totes les estructures reals tenen un comportament de forma no lineal a partir d'un cert nivell de carga, l'anàlisi lineal és el més habitual degut a la senzillesa d'aquest. En general permet l'estudi d'esforços, desplaçaments i forces axials com a resultat de l'aplicació de cargues estàtiques, i es pot afirmar que és adequat quan les càrregues són ben conegudes i el màxim esforç és evident.

Per tant, s'aplicarà aquest mètode sota la suposició de que es respecta la linealitat del gràfic tensió - deformació "b" que es mostra a continuació:

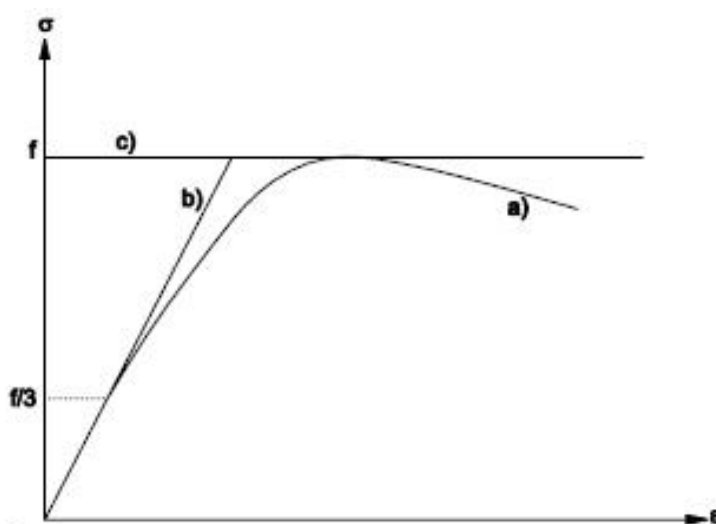


FIG 3: Diagrama tensió - deformació de la fàbrica. Per al càlcul estàtic lineal suposem el comportament del diagrama "b".

¹ En general, es designa com a propietat elàstica d'un material quan té un comportament lineal, i com a propietat plàstica un comportament no lineal.

En executar l'anàlisi lineal s'aplicaran cargues estàtiques (que no depenen del temps), com forces o pressions. A més, caldrà que s'introdueixin les propietats elàstiques del material: densitat, mòdul de Young i mòdul de Poisson. En aquest cas no és necessari que el programa conegui els coeficients de dilatació tèrmica, ja que no es valora la implicació de la temperatura.

El procediment es començarà modelitzant la volta per posteriorment passar a aplicar les càrregues pertinents tot indicant les restriccions necessàries per reproduir, el més fidelment possible, les condicions de contorn reals.

3. ANÀLISI ESTÀTIC LINEAL DE LA VOLTA – *SHELL 63*

3.1. CREACIÓ DEL MODEL - *PREPROCESSOR*

El model utilitzat per a la realització de l'anàlisi és la volta ceràmica de quatre punts representada en els plànols com a "volta principal". Les dimensions d'aquesta en planta són de 8,18 m de llarg per 8,06 m d'amplada, amb una fletxa dels arcs generadors i generatrius de 0,57 m.²

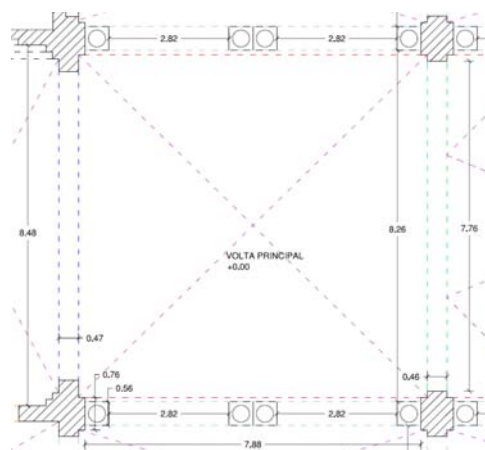


FIG 4: Volta principal de l'església

El primer pas un cop obert el programa és indicar el directori on es volen guardar els arxius que es creen. Posteriorment, i abans d'iniciar cap processador, s'activarà el marcador *structural*, ja que aquesta és la tipologia d'anàlisi amb que es treballarà.

² La geometria i dimensions d'aquesta ja s'ha explicat en l'apartat d'introducció tècnica

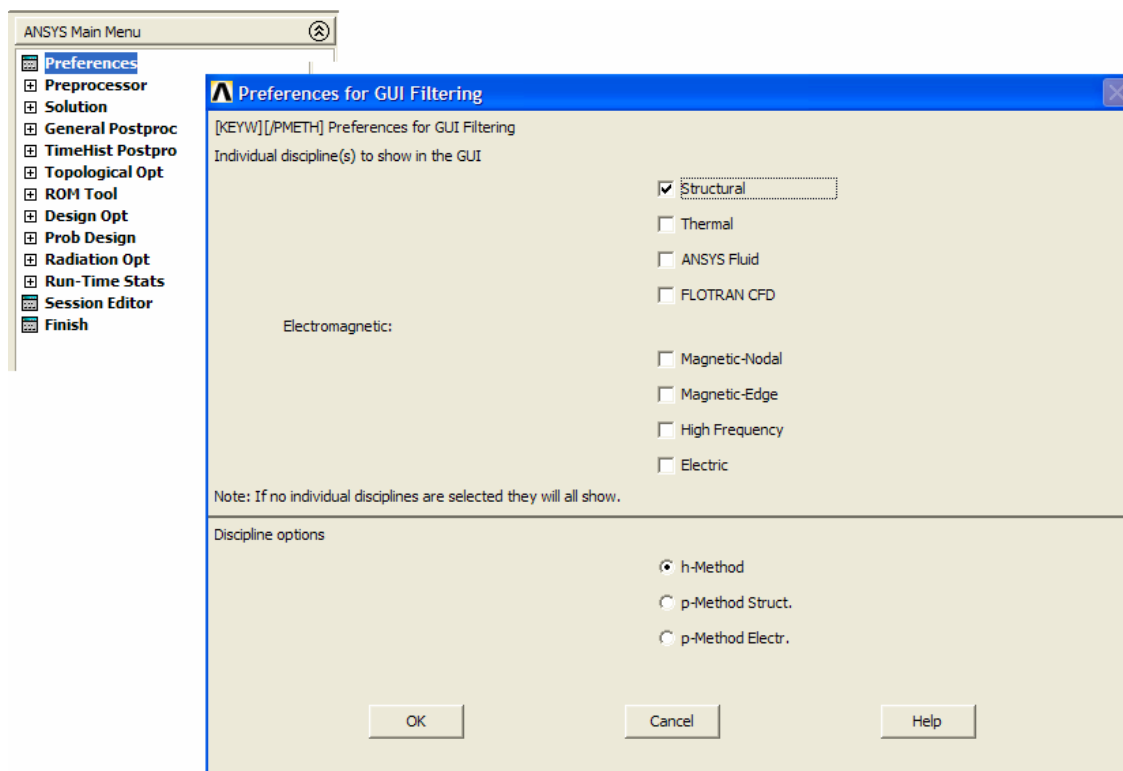


FIG 5

3.1.1. Elements tipus

En aquest apartat l'ANSYS permet la selecció de la tipologia d'element amb què es vol mallar la volta.

Dos dels factors més rellevants que influeixen en l'elecció de l'element tipus de mallat són la modelització de l'objecte en 2-D o 3-D, i els graus de llibertat desitjats segons el tipus de càlcul a realitzar.

Dels elements que disposa l'ANSYS el més habitual per a la representació d'una volta és el *shell63*, una "làmina" composta per 4 nodes, de tres dimensions, i amb sis graus de llibertat cadascun d'ells, tres de desplaçaments, traduïts als eixos X,Y i Z i tres de rotacions respecte aquests tres eixos. L'element *shell* permet estudiar factors com la deformada, la distribució de tensions, les reaccions en els punts de recolzament, l'afectació de la temperatura en el model etc...

A més, quan s'arriba a l'opció de mallat el programa deixa escollir si es vol que l'element *shell* adopti forma de triangle o de rectangle; donat el cas amb el que es

treballa, on es voldrà controlar el mallat per distribuir els esforços de forma puntual i sobre punts concrets, és més recomanable escollir la forma rectangle.

L'elecció de l'element es realitza en el primer processador, que rep el nom de *preprocessor*.

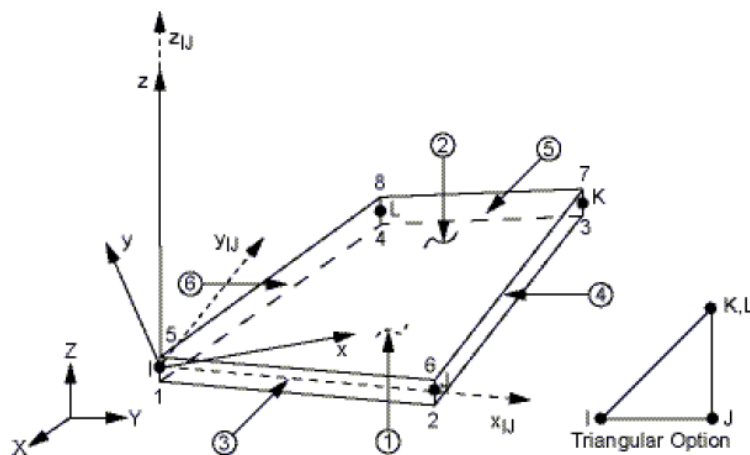


FIG 6: Geometria Shell 63

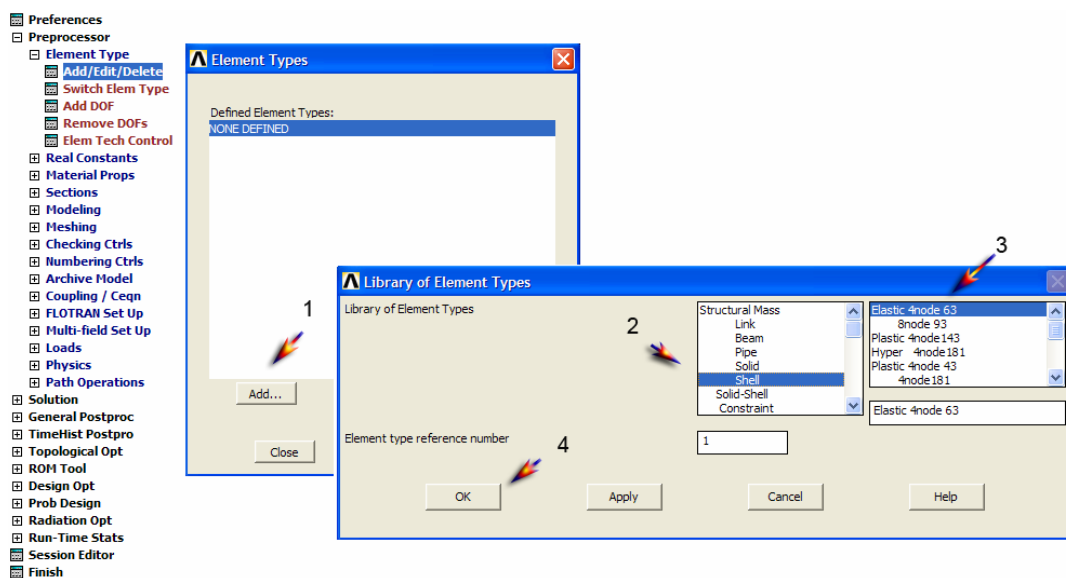


FIG 7: Elecció de l'element

3.1.2. Propietats del material

Aquestes depenen del tipus d'anàlisi que es vulgui realitzar. Per exemple, per dur a terme l'anàlisi lineal - elàstic, les propietats ha introduir són el mòdul de Young (EX), el mòdul de Poisson (PRXY) i la densitat (DENS). Que són 6000 MPa (valor a introduir en Pa), 0,3 i 1200 Kg/m³ respectivament.

Aquestes dades s'introdueixen dins el *preprocessor*, tal i com es mostra en la següent imatge.

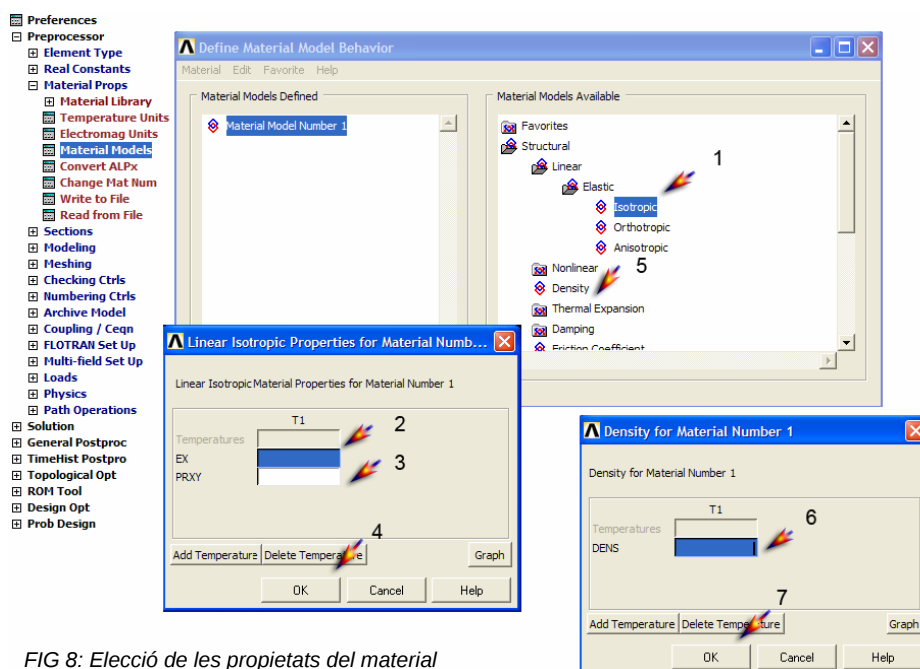


FIG 8: Elecció de les propietats del material

3.1.3. Constants Reals

El conjunt de constants reals conté, en general, les propietats geomètriques de l'element (gruix, inèrcia de la secció transversal...). Per al tipus d'anàlisi que es durà a terme, on es treballa amb elements *shell*, tan sols és imprescindible introduir el gruix d'aquestes plaquetes.

En la volta que es tracta en aquest projecte, la hipòtesi de càlcul es fa en base considerant que està formada per peces ceràmiques de maó foradat col·locades en pla amb un cantell de 4 cm, per tant aquest serà el gruix a introduir.

En la finestra interactiva només es requereix introduir el valor en la primera casella, ja que el programa suposarà que la peça és uniforme.

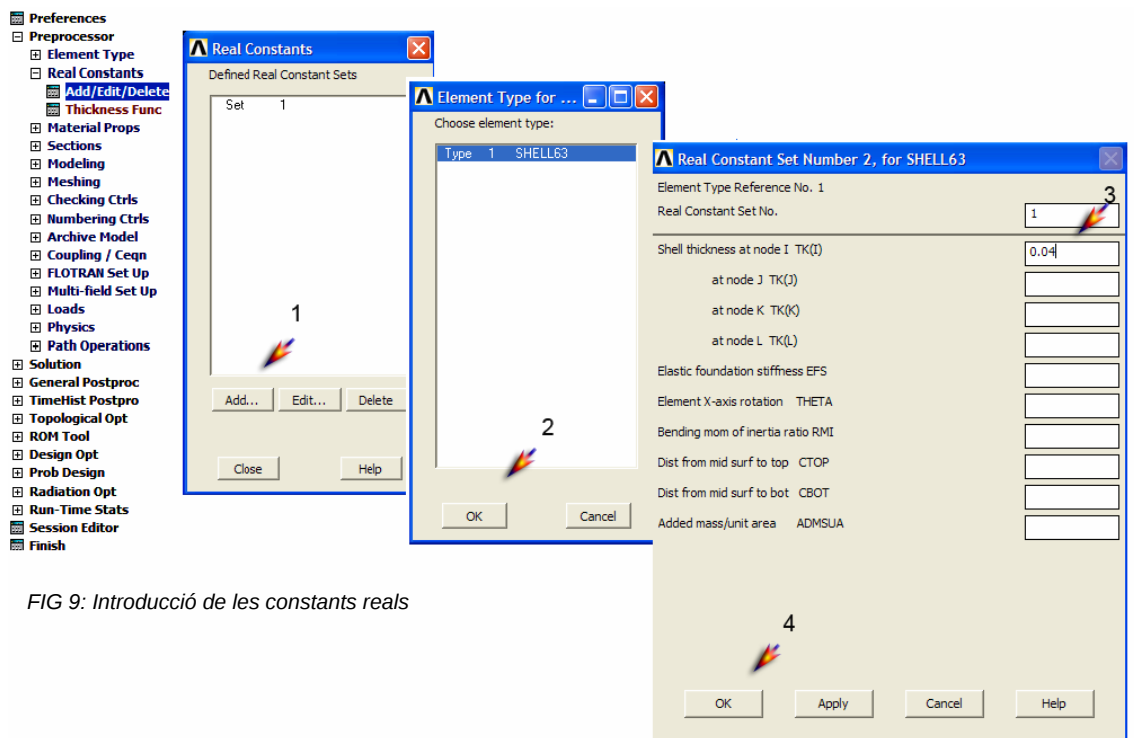


FIG 9: Introducció de les constants reals

3.1.4. Geometria

Per tal de modelitzar la volta es comença introduint les coordenades dels *keypoints* que marcaran la forma dels arcs generadors i directors de la volta de quatre punts.

Cada un dels arcs generadors i directors el formen 3 *keypoints*, tanmateix dos d'aquests sempre són comuns per a un dels altres arcs, amb el que tan sols s'hauran d'introduir 8 *keypoints*³ per a la realització del model; les coordenades d'aquests es recullen en el següent quadre:

Nº punt	X	Y	Z
1	0	0	0
2	4,09	0	0,57
3	8,18	0	0
4	0	4,03	0,57
5	8,18	4,03	0,57
6	0	8,06	0,57
7	4,09	8,06	0,57
8	8,18	8,06	0

³ En el procés real seguit s'han introduït 9 *keypoints*, tal i com es pot veure en alguna de les imatges, tot i així aquest és prescindible, ja que no intervé en la formació de l'element estructural.

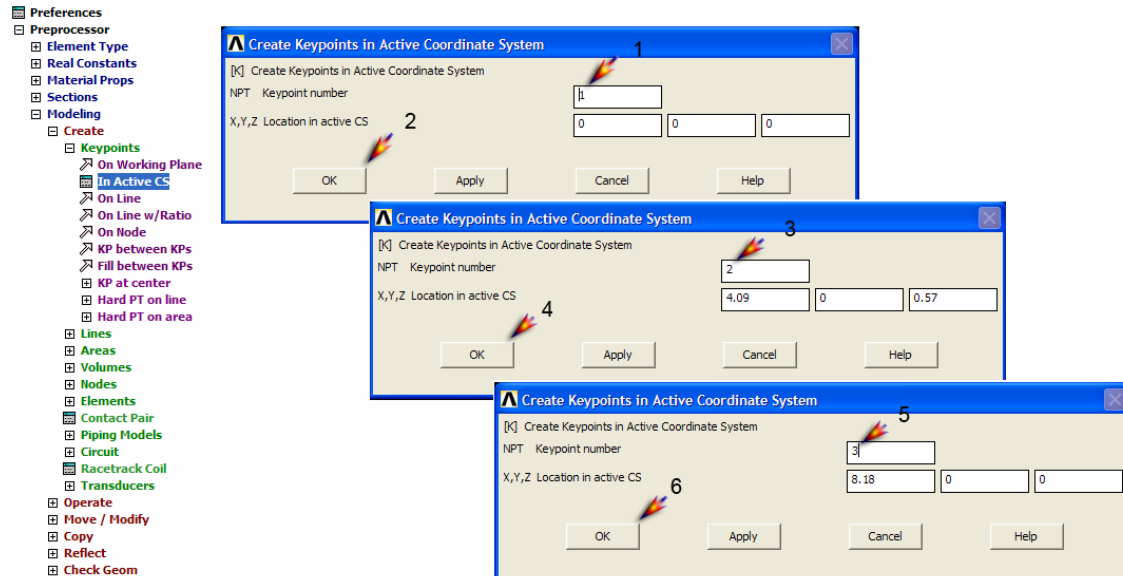


FIG 9: Introducció dels keypoints

Un cop introduïts els *keypoints*, es crearan els quatre arcs que delimiten les quatre arestes de la volta; per tant, l'operació descrita a continuació es repetirà quatre vegades per cada un dels arcs que s'ha de generar.

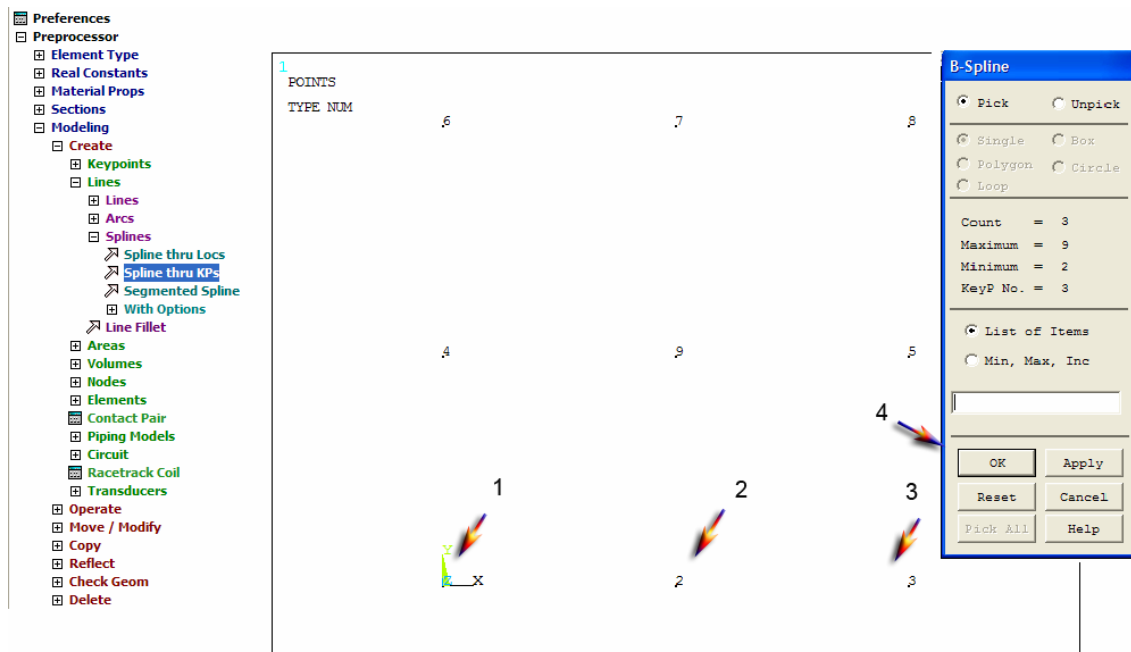


FIG 10: Formació dels arcs

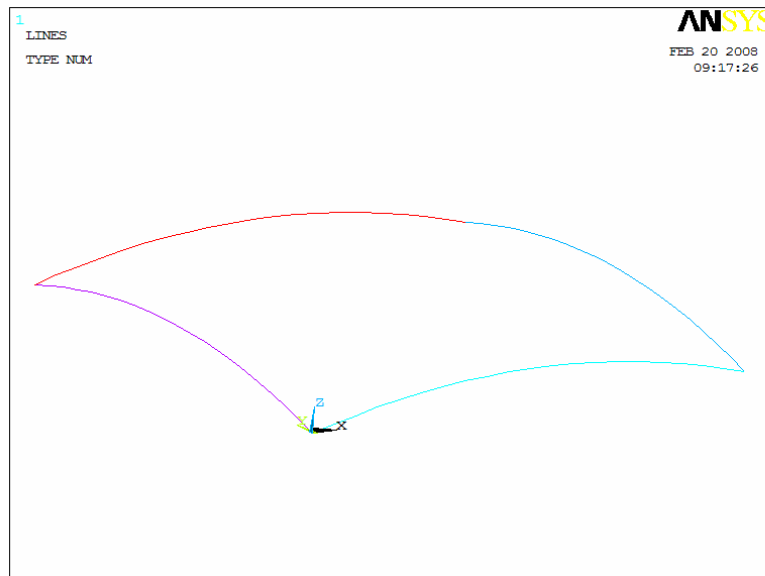


FIG 11: Figura obtinguda al generar els quatre arcs

Posteriorment es passa a generar l'àrea, com es pot veure en el menú interactiu que s'exposa a continuació. La modelització de l'àrea és fa a partir dels quatre arcs dibuixats.

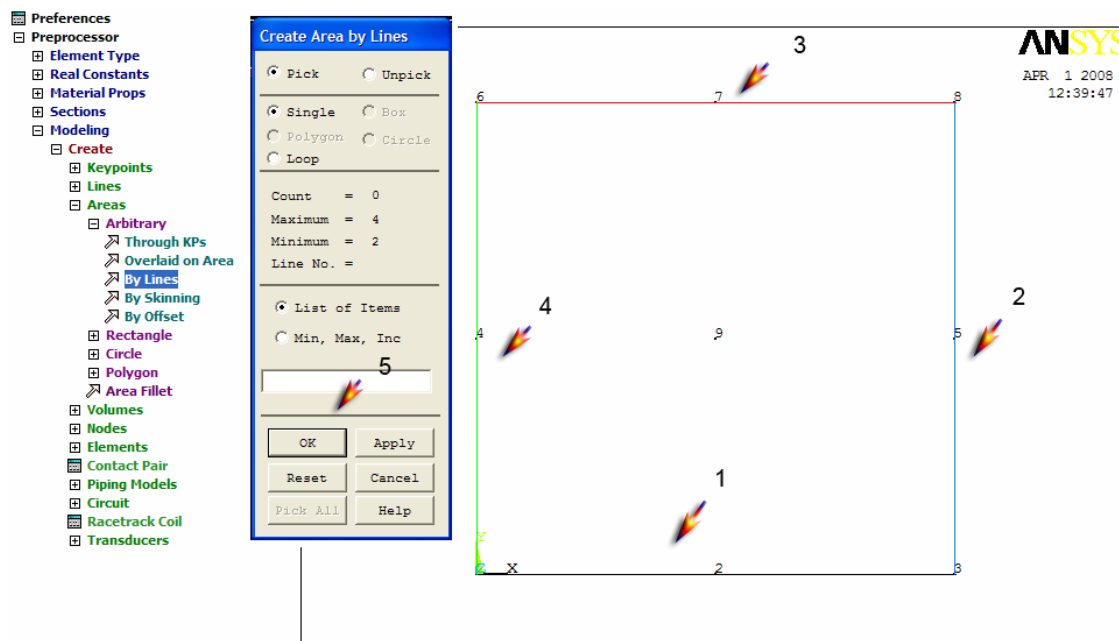


FIG 12: Generació de l'àrea

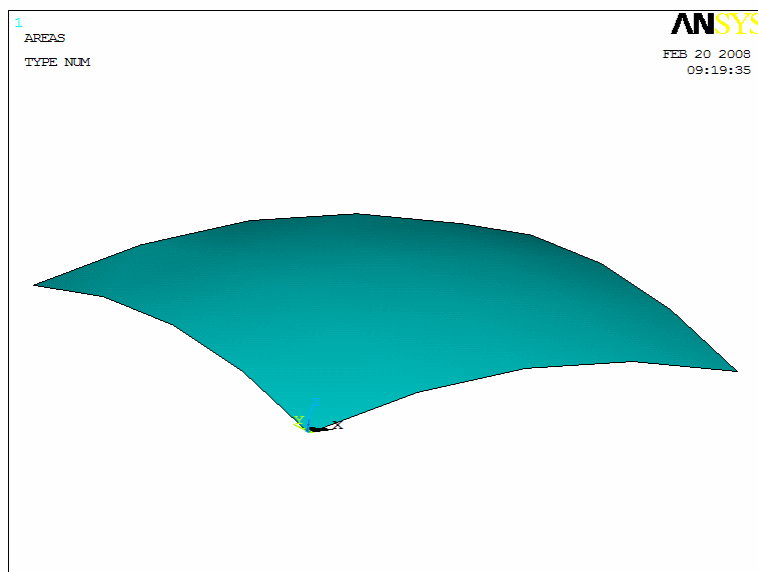


FIG. 13: Àrea de la volta

Un cop obtinguda l'àrea, s'indicarà a l'ANSYS que aquesta àrea és l'element 1, de manera que treballarà segons les propietats introduïdes com a material 1 (constants reals, etc.) marcades en els corresponents apartats.

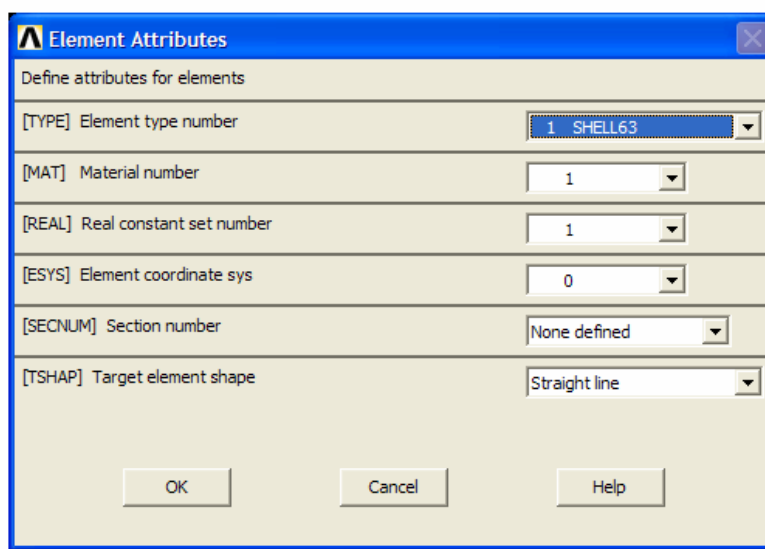
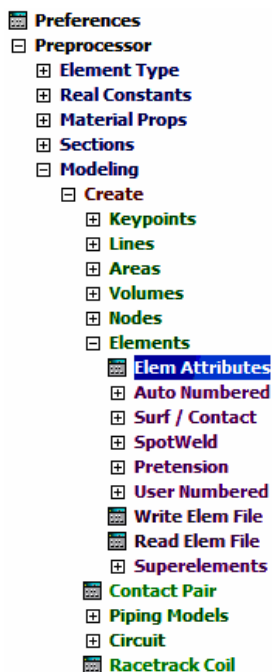


FIG. 14

3.1.5. Mallat

L'ANSYS ofereix moltes eines per realitzar el mallat, amb la fi de que cada usuari pugui fer-ho de la forma més adient. És molt important fer un mallat correcte ja que és el pas que més afecta a la precisió dels anàlisis obtinguts.

En aquest cas, es farà de forma manual sobre l'àrea obtinguda en el pas anterior, per tal de poder controlar en quins punts es creen els nodes, ja que posteriorment serà sobre aquests on s'aplicaran les càrregues.

S'ha volgut executar un mallat de manera que en una direcció els nodes quedessin a una distància coneguda entre si per tal de simular la disposició de les 13 costelles; per tant s'han fet 28 divisions, al ser un múltiple de 14, sabem que hi haurà una càrrega cada dos nodes en aquesta direcció.

En l'altre direcció s'ha fet de manera que entre node i node i haguessin 50 cm de separació, és a dir, 30 divisions. De manera que si s'aplica una càrrega puntual cada dos nodes en aquest sentit, estarem simulant una càrrega puntual cada 1 m de distància (aquest procés s'exposa més endavant).

Òbviament, per aconseguir una distribució amb les distàncies esmentades, s'haurà de recórrer a una disposició quadricular.

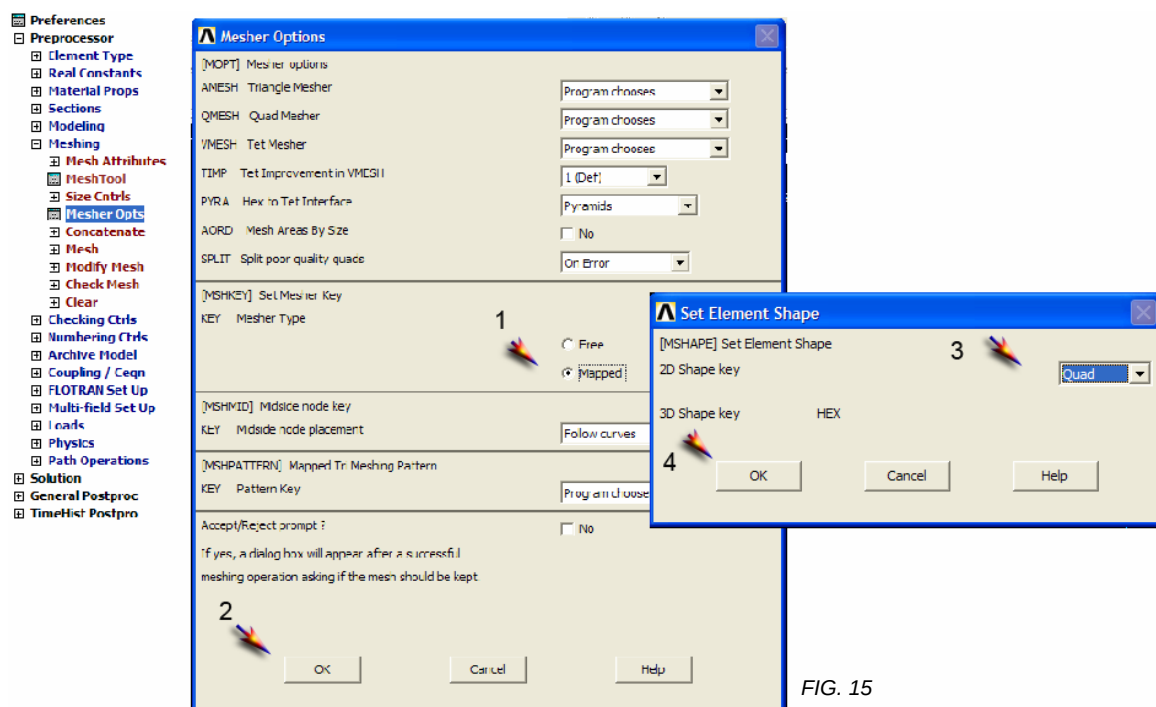


FIG. 15

Posteriorment es passa a designar quines línies disposaran d'una divisió de 28 parts i quines altres de 30, per tal d'aconseguir el mallat descrit anteriorment.

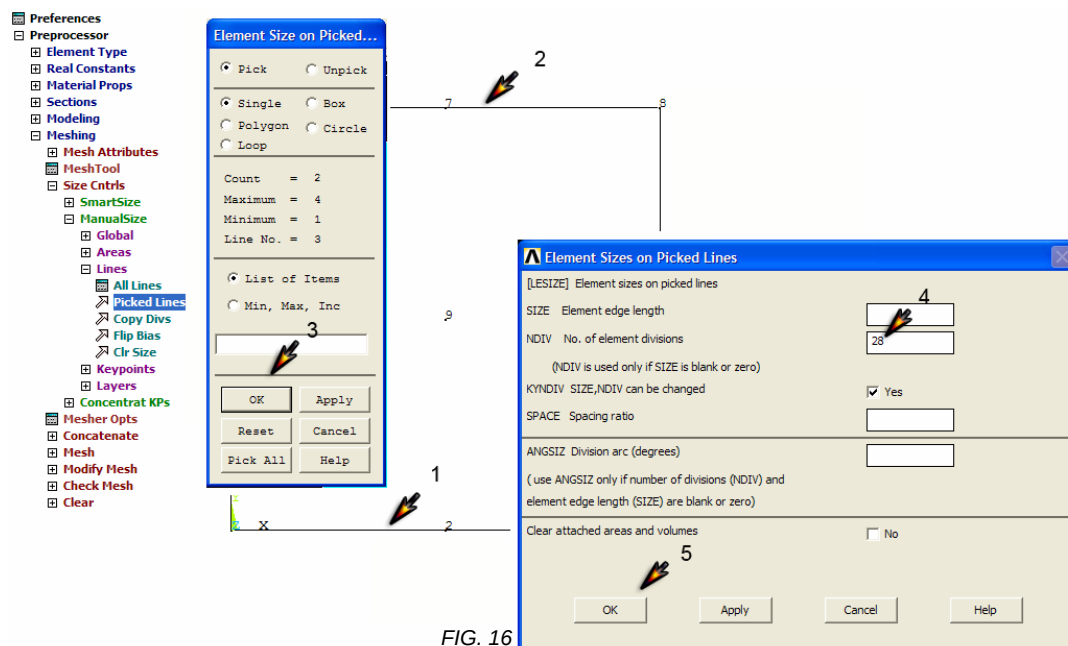


FIG. 16

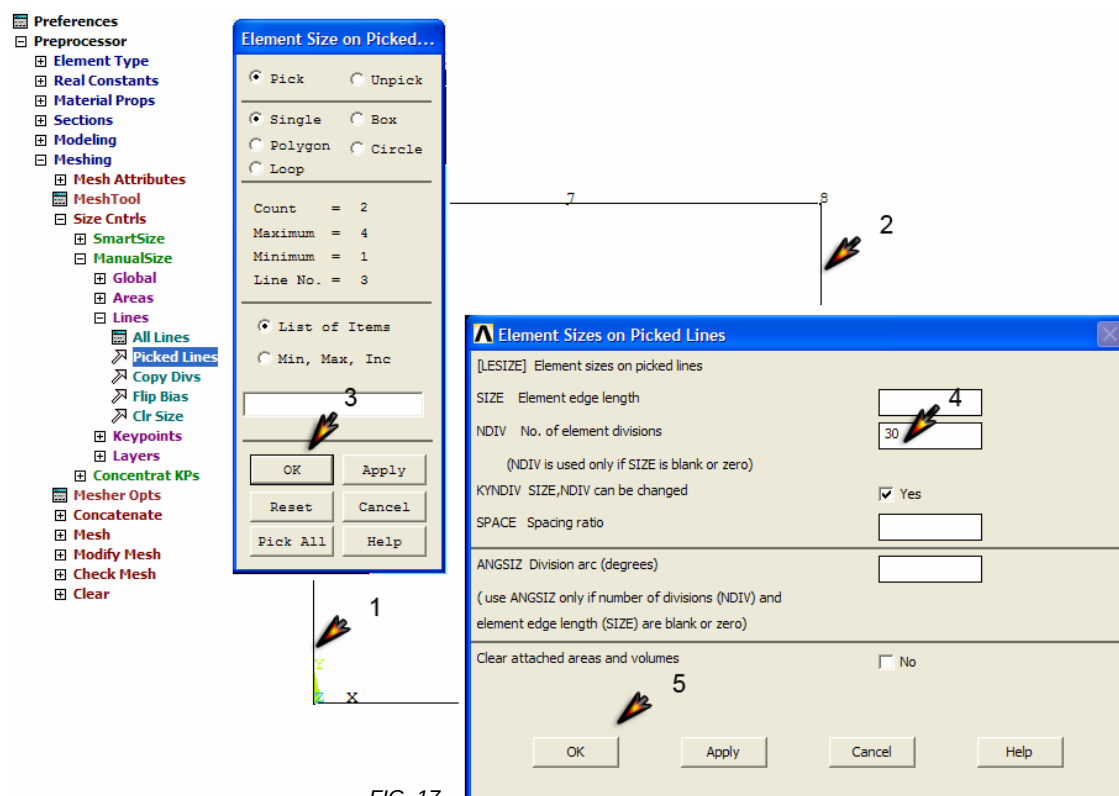


FIG. 17

Finalment es procedirà a executar el mallat, discretitzant l'àrea.

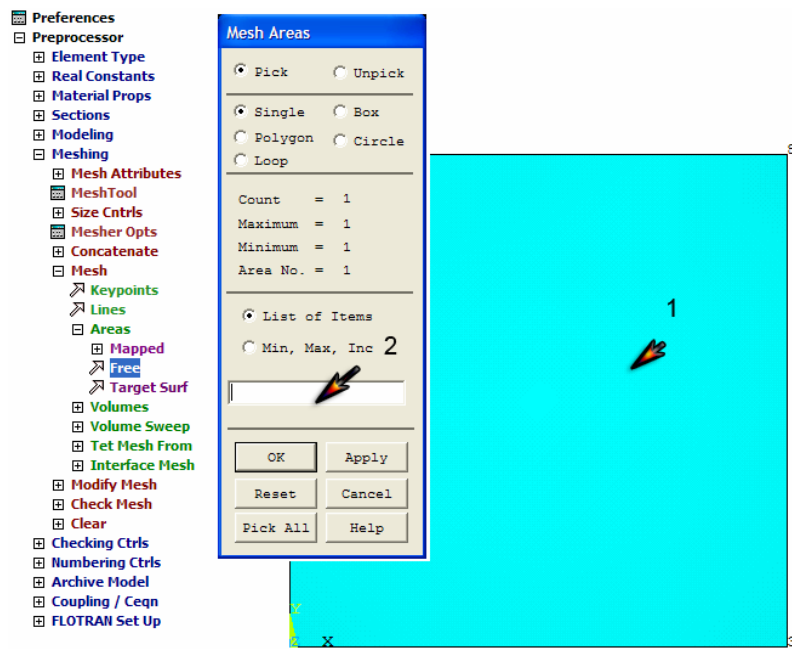


FIG. 18

S'obté la següent figura:

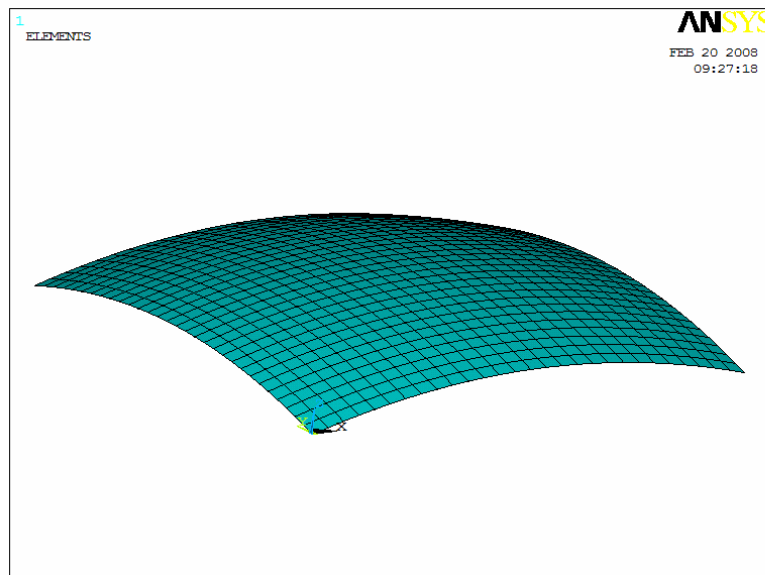


FIG 19: Àrea mallada

3.2. DEFINICIÓ DE LES CONDICIONS DE CONTORN - SOLVE

Per a la definició de les condicions de contorn, s'inicia el segon processador de l'ANSYS, el *solve*. En primer lloc s'haurà d'elegir el tipus d'anàlisi que es vol realitzar, tal i com ja s'havia introduït, aquest serà l'estàtic.

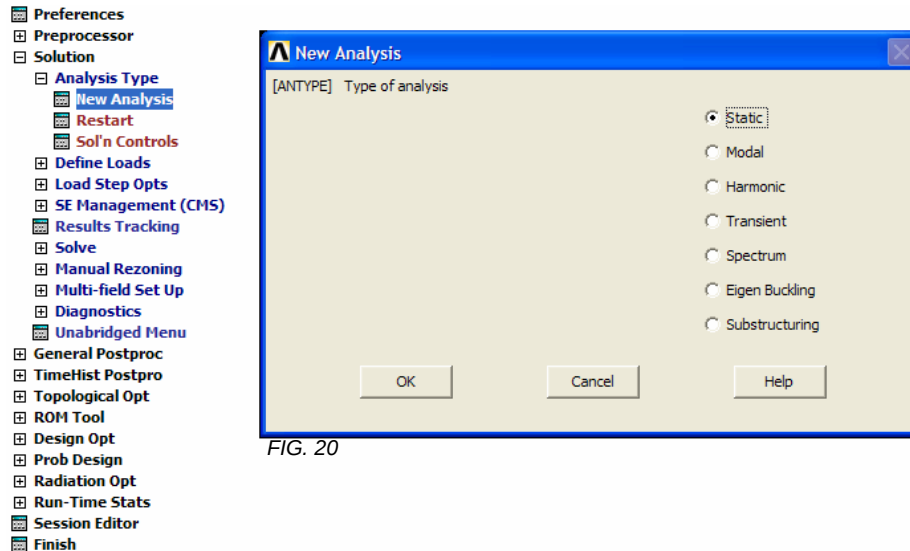


FIG. 20

Un cop fet aquest pas es bloqueja l'eix X, Y i Z els 4 *keypoints* de les cantonades, que alhora són els recolzaments de la volta. Els moments MX, MY i MZ no es bloquegen, ja que els punts de recolzament no es consideren encastats.

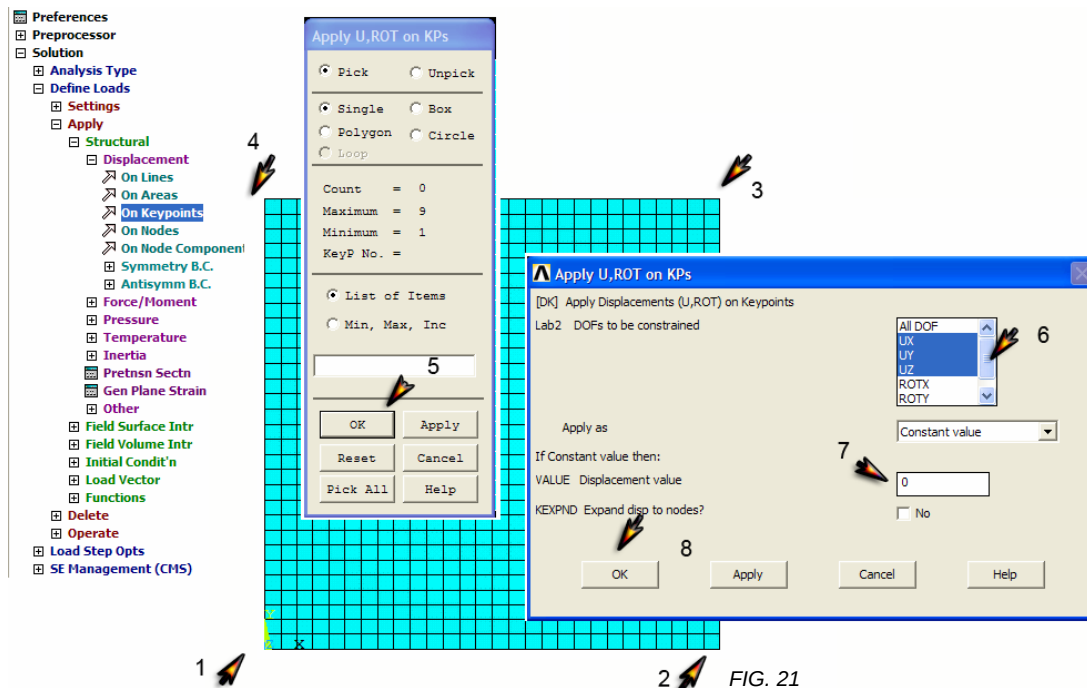


FIG. 21

En segon lloc s'aplica la gravetat en l'eix z, de $9,8 \text{ m/s}^2$. És imprescindible considerar aquest valor si es vol que el programi reconegui el pes propi.

Es pot determinar aquest pes propi de forma manual i d'aquesta manera poder comprovar posteriorment que els resultats que ens proporciona l'ANSYS són fiables. Es pren com a densitat 1200 kg/m^3 i com a dimensions en verdadera magnitud de la volta 8,29 i 8,16 metres amb 4 cm de gruix.

$$\text{Pes propi} = 8,29 \times 8,16 \times 0,04 \times 1200 = 3247,03 \text{ kg}$$

Si un kg equival a 9,8 N, s'arriba a concloure que 3247,03 kg equivalen a 31820,87 N.

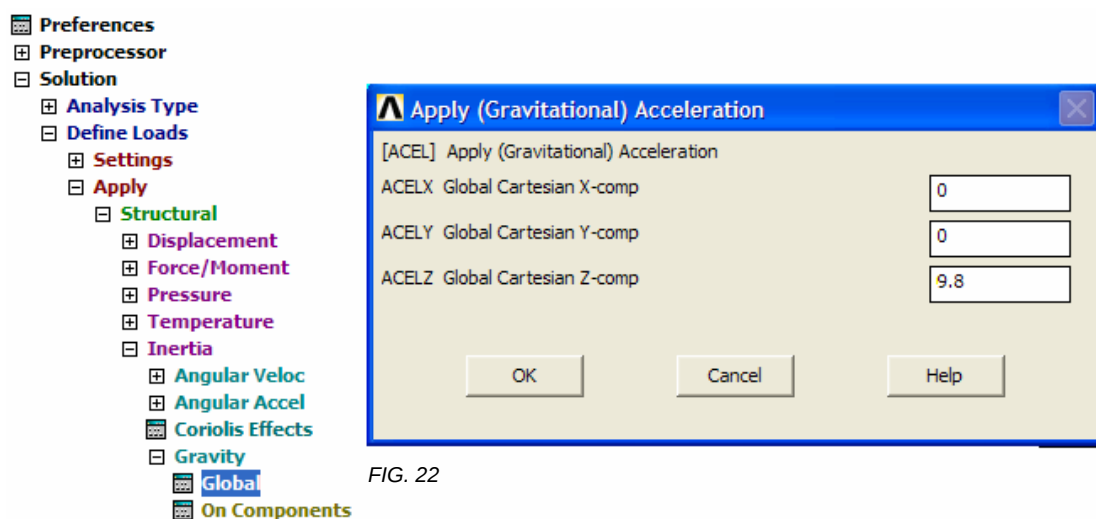


FIG. 22

Per determinar la carrega a aplicar s'ha partit de que el pes que es transmetia era de $2,41 \text{ Kn/m}^2$ ⁴, obtenint una carga total de 163027,82 N. Les costelles estan situades cada 0,6 m i les carregues puntuals cada 0,5 m. Si es divideix 163027,82 N entre 13 i 16 parts per simular la distribució descrita, s'obté que cada carrega puntual equival a un valor de -783,78 N.

⁴ Aquesta, ha estat calculada en l'apartat d'introducció tècnica, i s'ha descomptat el valor de pes propi de la volta, ja que l'ansys el valora a partir de la densitat.

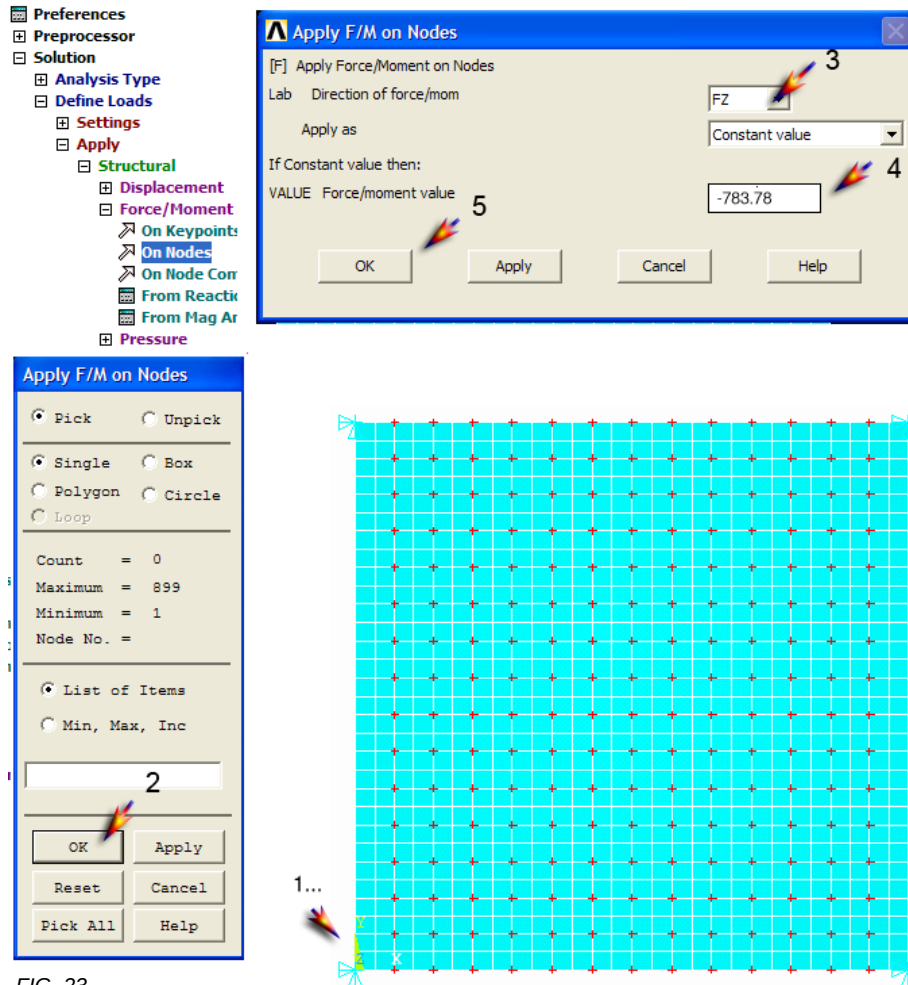


FIG. 23

L'aplicació de les condicions de contorn, en aquest cas, és complexa, ja que caldrà seleccionar cada un dels punts de forma manual.

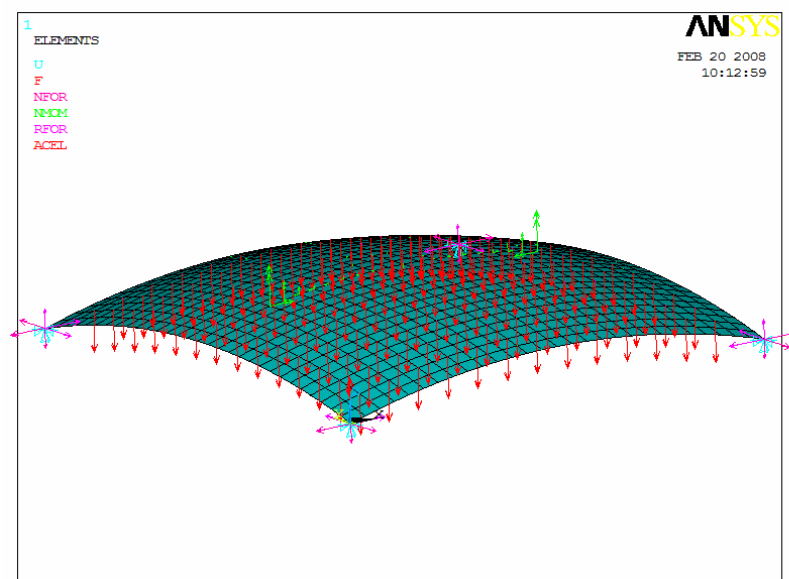


FIG 24: Àrea amb condicions de contorn aplicades.

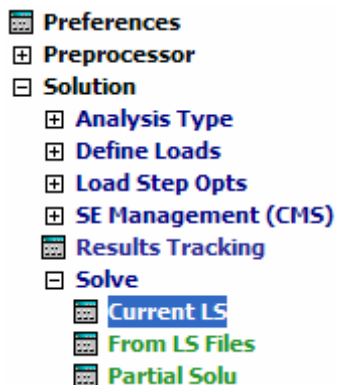


FIG 25

Arribat aquí, es pot dir que ja s'ha aconseguit crear la geometria i per tant es pot procedir al tercer processador. Abans, caldrà introduir la opció que es mostra en la figura 25, per tal de que l'ANSYS ens solucioni la geometria i verifiqui si aquesta conté algun tipus d'error.

Si el model és vàlid, apareixerà una finestra amb un missatge de text on s'hi podrà llegir en anglès: *Solution is done*.

3.3. LECTURA DE RESULTATS - POSTPROCESSOR

3.3.1. Deformada

Per conèixer la deformada cal que a partir del *menú postprocessor* es seleccionin les següents opcions, obtenint d'aquesta manera una imatge on es mostra en color blau la deformada de la volta, i en forma de malla (sense color), la geometria de la volta abans d'aplicar càrregues.

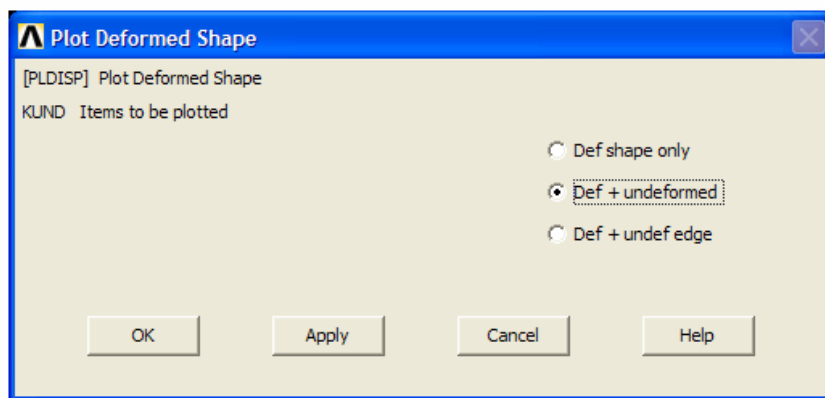
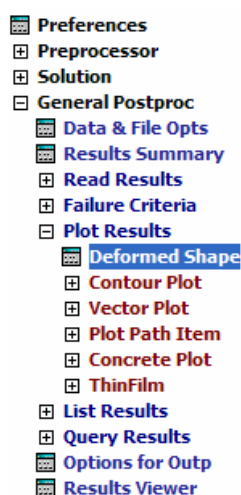


FIG 26: Elecció de la tipologia de deformada

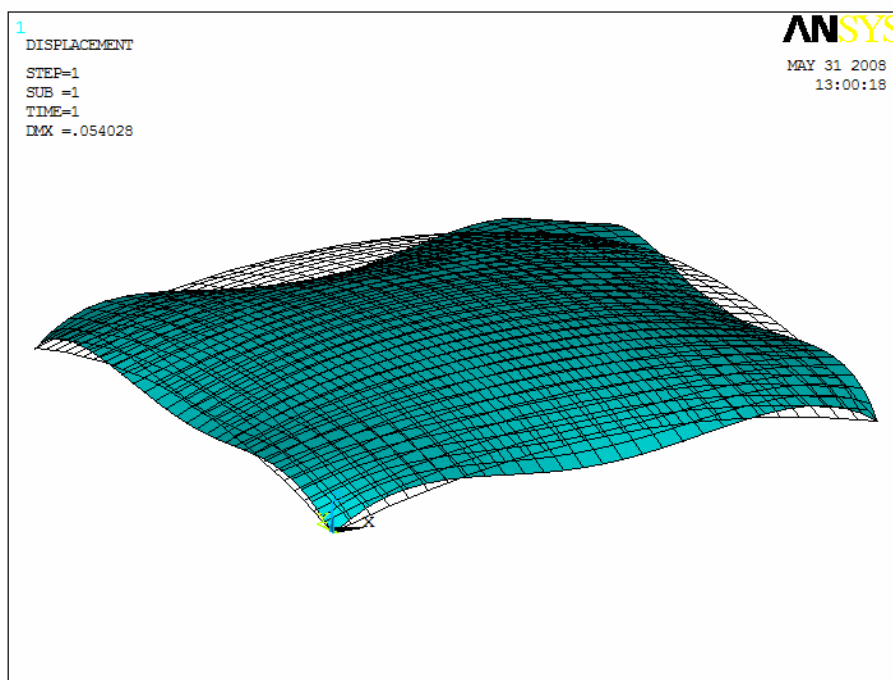


FIG 27: Deformada de la volta en vista isomètrica

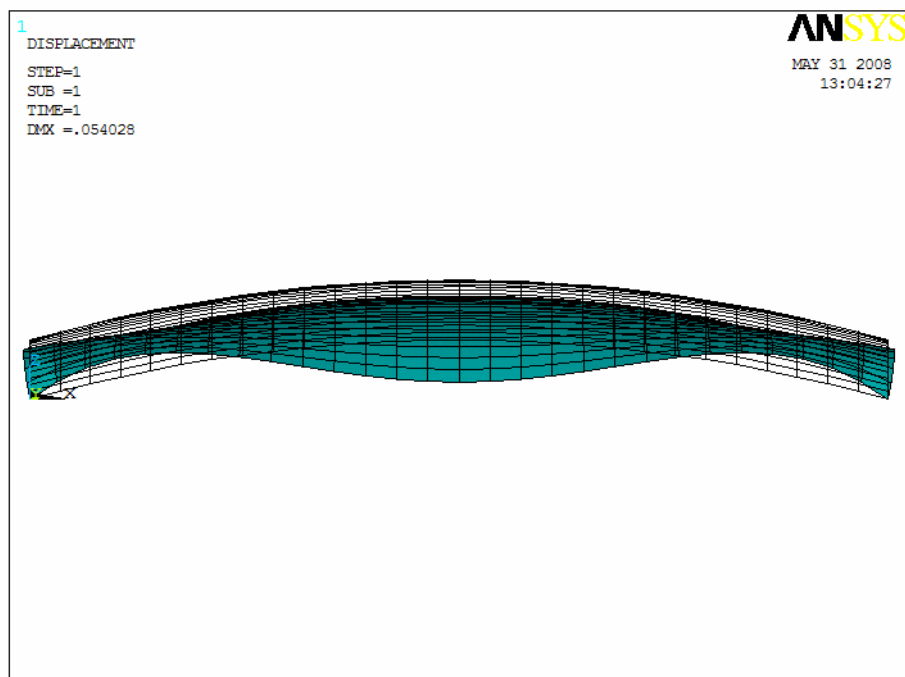


FIG 28: Deformada de la volta en alçat

S'entén com a deformada la representació de la docilitat amb què una estructura pot ser deformada per una força, sense ruptura. En la imatge, la part més dòcil i la menys resistent a les càrregues sotmeses, és la central de cada un dels quatre costats, on es veu que adopta un pandeig més acusat. Aquests punts més dòcils seran els més propensos a sofrir patologies.

A més, el programa proporciona el valor de deformació màxima obtinguda, que és de 0,054 metres. Un valor alt però coherent i lògic amb la tipologia d'anàlisi lineal que s'ha adoptat, que no imposa cap obstacle a que l'element es vagi deformant d'una manera continua i uniforme a mesura que augmenta la tensió aplicada. A més cal tenir en compte que la situació es magnifica donades les dimensions de la volta.

En la següent imatge es pot veure el desplaçament en l'eix z. Es mostra aquest eix perquè és la direcció que s'ha establert que treballa la gravetat i les càrregues, amb el que conseqüentment també serà el que es deforma més.

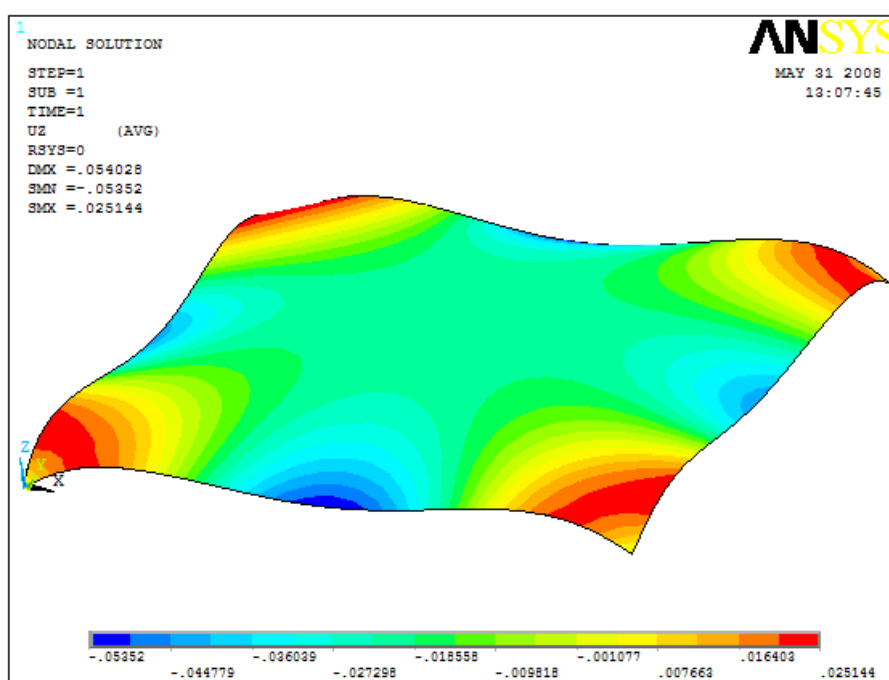


FIG 29: Desplaçament de la volta en l'eix z

Per tal de confirmar numèricament que els valors més alts de deformada corresponen als punts situats al centre dels costats, es pot recorre a la llista de resultats. Hi ha diverses formes d'accedir a aquesta llista, la més fàcil és seleccionant el menú *result viewer* i dins aquest obrir un desplegable que mostrarà les diferents opcions a escollir. El procediment quedà recollit en la figura 30.

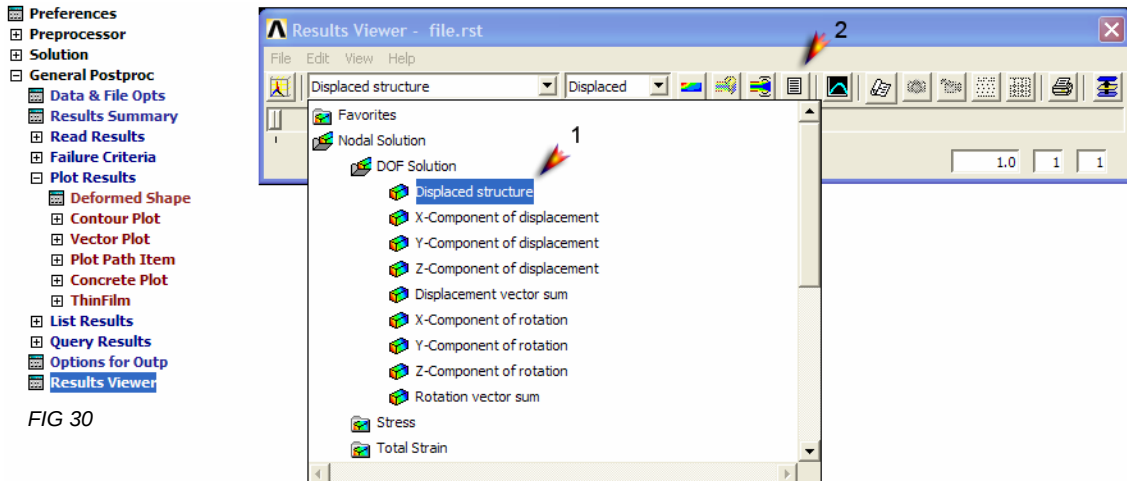


FIG 30

Aquesta opció proporciona un llistat amb els desplaçaments i rotacions que pateix cada node en cada un dels tres eixos. Com que el model estudiat té un nombre molt elevat de nodes, és més fàcil veure en primer lloc amb quin número s'han designat aquests nodes situats al centre dels costats, per posteriorment buscar en el llistat els resultats d'aquests. Aquest pas es fa activant la opció Plot `ctrls>Numbering>Nodes`, i a continuació `Plot>Nodes` (en l'*Utility Menu*).

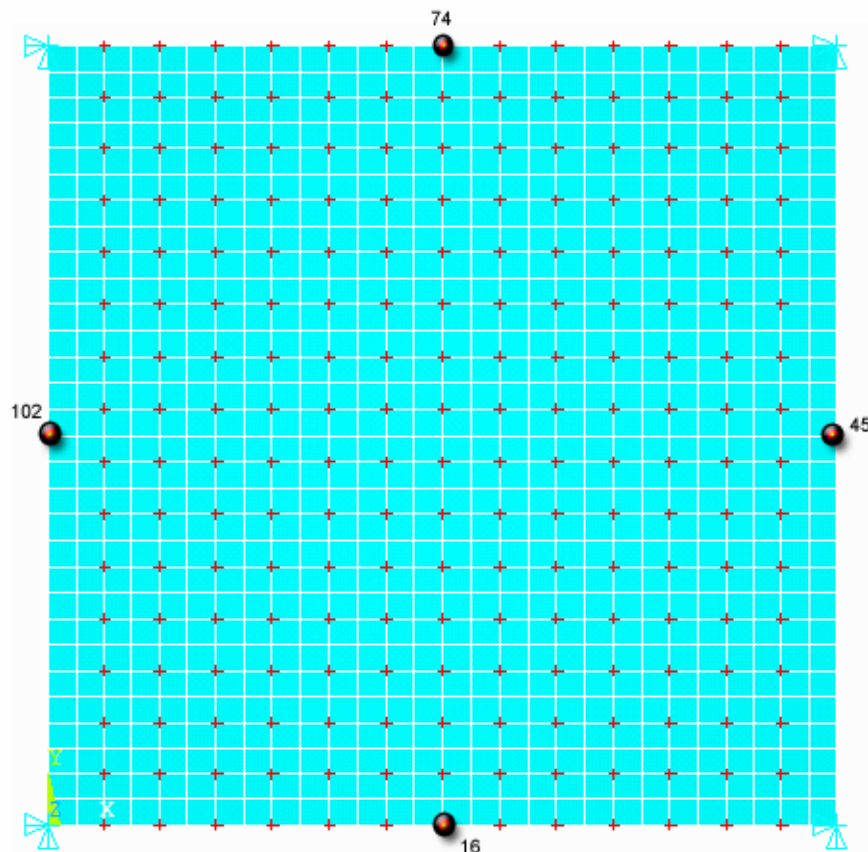


FIG 31: Punts a analitzar

Per tant, els nodes a analitzar són: 16, 74, 45, 102, amb els següents resultats:

NODE	UX	UY	UZ	ROTX	ROTY	ROTZ
16	-0.21272E-11	0.73907E-02	-0.53520E-01	0.26684E-01	0.16027E-10	-0.14725E-11
74	0.22459E-11	-0.73907E-02	-0.53520E-01	-0.26684E-01	-0.16484E-10	-0.31086E-11
45	-0.51814E-02	-0.11659E-11	-0.43463E-01	-0.31134E-10	0.17167E-01	0.79696E-11
102	0.51814E-02	0.11611E-11	-0.43463E-01	0.31118E-10	-0.17167E-01	0.79666E-11

Hi ha una diferència de resultat substancial, degut a que els nodes 16 i 74 tenen una càrrega puntual més pròxima que els altres dos nodes. A més, es pot comprovar que els valors màxims, que es donen en l'eix z, corresponen amb el valor màxim obtingut al analitzar la deformada, de 0,054 m.

Cal remarcar que s'han realitzat diverses proves de càlcul amb diferents mòduls elàstics. S'ha comprovat que l'elecció d'aquest valor incideix directament amb el resultat de la deformada però no amb la resta de paràmetres com poden ser les tensions, reaccions en els recolzaments...A partir d'aquí es pot afirmar que el model respon adequadament a la llei de Hooke imposada:

A continuació s'exposa una sèrie d'imatges, amb l'evolució de la deformada segons el valor de mòdul elàstic:

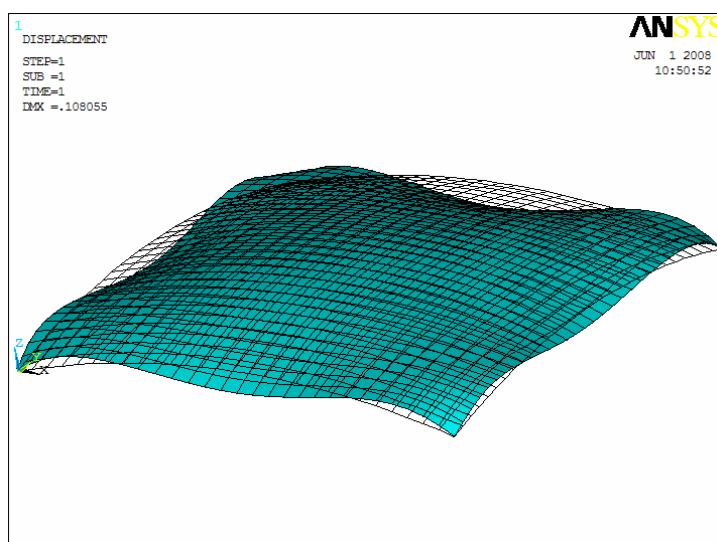


FIG 32: Mòdul elàstic 3000 MPa, deformada de 0.10 metres

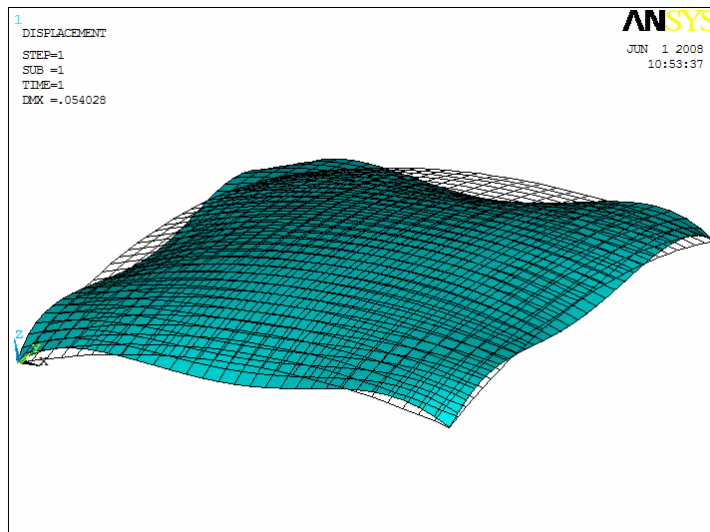


FIG 33: Mòdul elàstic 6000 MPa, deformada de 0.05 metres

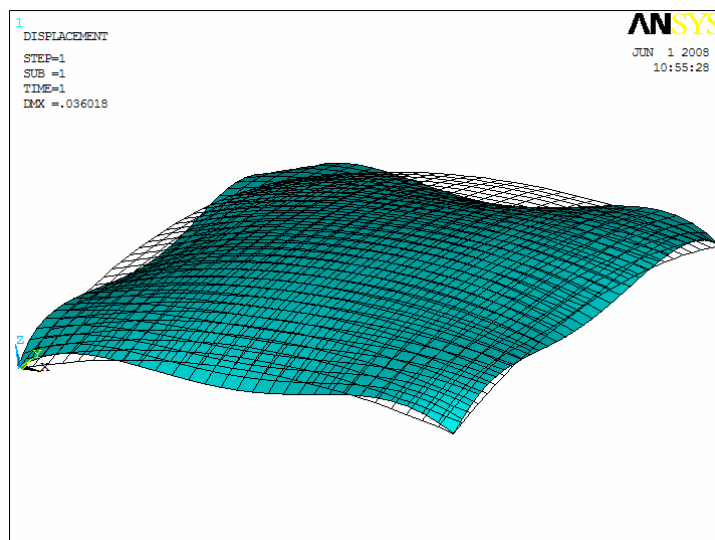


FIG 34 Mòdul elàstic 9000 MPa, deformada de 0.03 metres

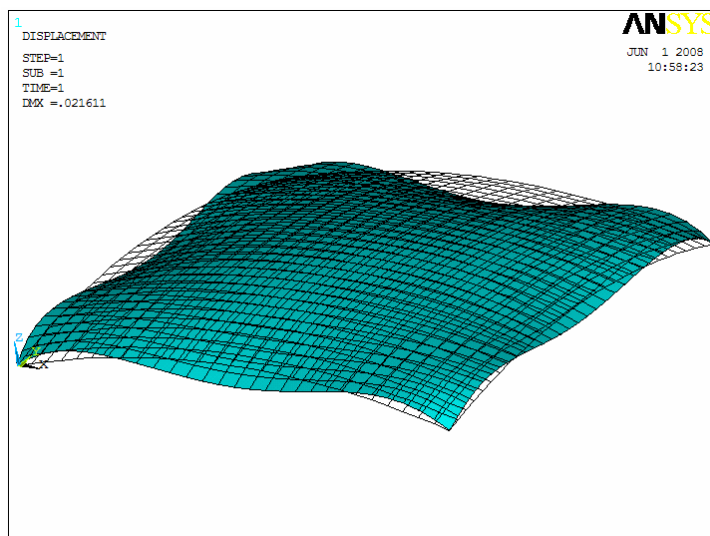


FIG 35: Mòdul elàstic 15000 MPa, deformada de 0.02 metres

Per tant, doncs, es comprova que l'augment de valor del mòdul elàstic incideix directament en la disminució de la deformada.

3.3.2. Reaccions

L'ANSYS proporciona els valors de les reaccions en els quatre punts de recolzament amb els següents menús:

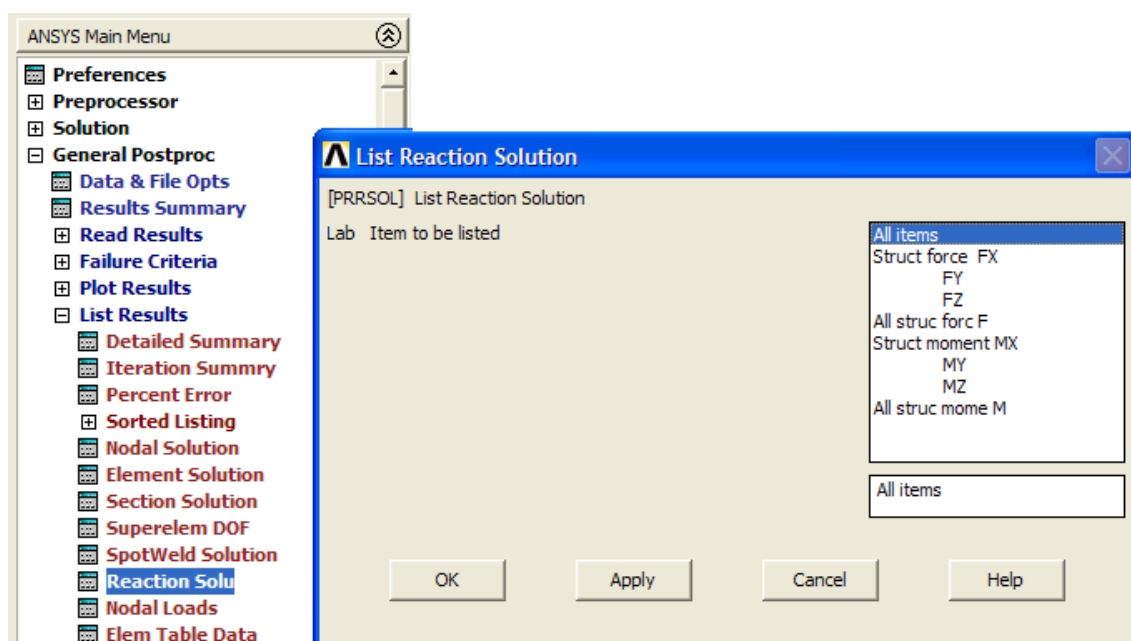


FIG 36

Les reaccions proporcionades per l'ANSYS en els quatre punts de recolzament i per cada un dels tres eixos són⁵:

NODE	FX	FY	FZ
1	0.11162E+06	90559	48709
2	-0.11162E+06	90559	48709
30	-0.11162E+06	-90559	48709
60	0.11162E+06	-90559.	48709
TOTAL VALUES			
	0.25175E-08	-0.28813E-08	0.19484E+06

⁵ No té rellevància a quin recolzament en concret pertany cada un dels valors, ja que la geometria i distribució de forces és simètrica, i per tant les reaccions i resultats també.

S'obté un total de 194840 N, un valor molt pròxim al calculat manualment, 194848,71 N, resultat de la suma del pes propi i les cargues aplicades, 31820,87 i 163027,28 N. Tot i que el valor no és exacte perquè el model de càlcul que utilitza l'ANSYS és més complex que el que s'ha fet de forma manual, és pot donar el model per vàlid.

3.3.3. Tensions

Per conèixer el valor de les tensions, l'ANSYS mostra els resultats a través de dues formes, la numèrica i la gràfica. A la primera s'hi accedeix mitjançant el menú *results viewer*:

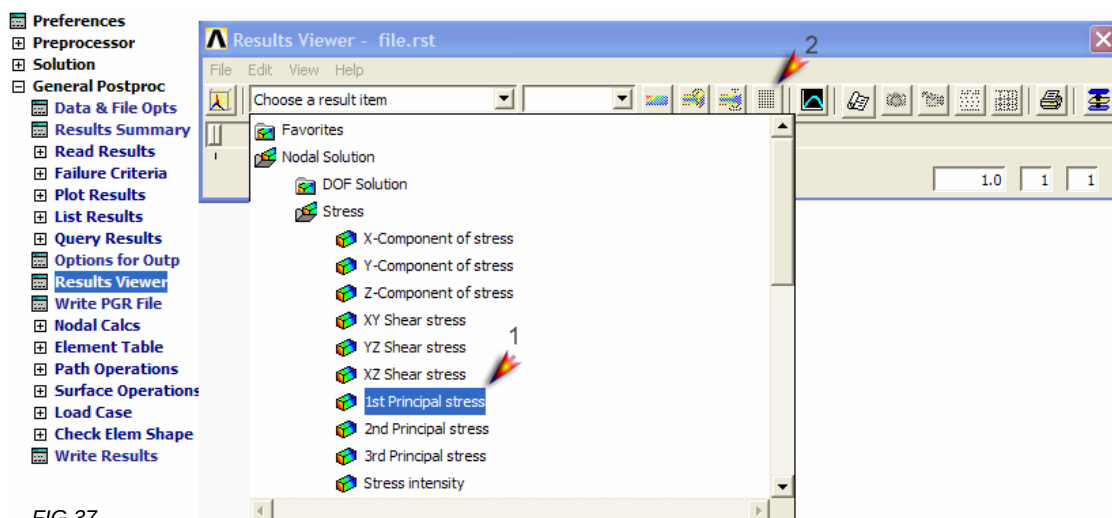


FIG 37

D'aquesta manera s'obté una llista dels resultats i es pot veure a quins nodes corresponen els valors més alts; tanmateix no és de gran utilitat per al cas que es tracta, ja que es treballa amb una quantitat de nodes molt gran i es difícil situar cada un d'ells. Per tant, és més fàcil visualitzar l'afectació gràficament. A aquesta s'hi accedeix mitjançant el menú *results viewer*:

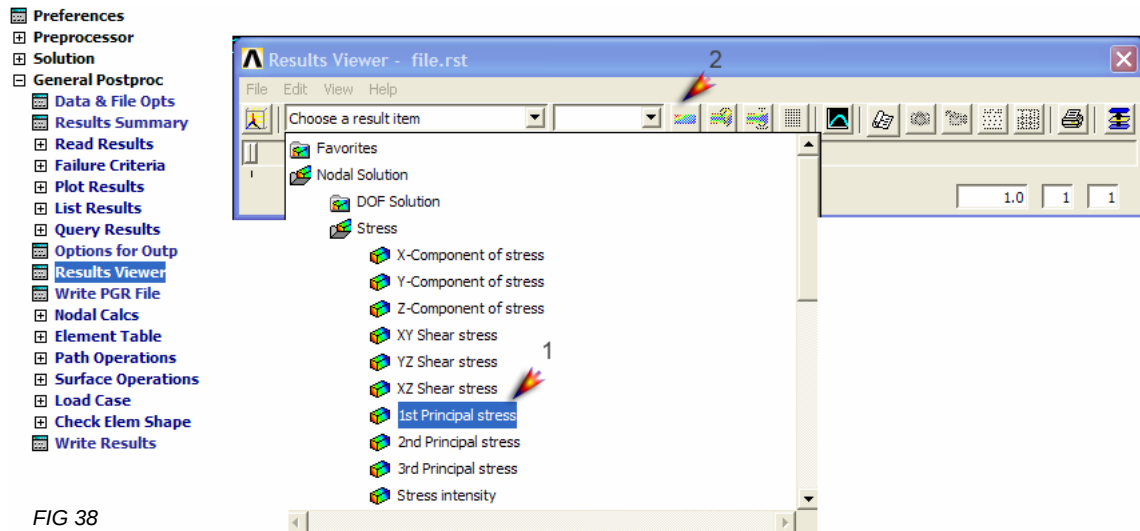


FIG 38

Amb la opció esmentada l'ANSYS mostra una imatge on es pot observar mitjançant les intensitats dels colors els punts on els valors de tensions són més alts.

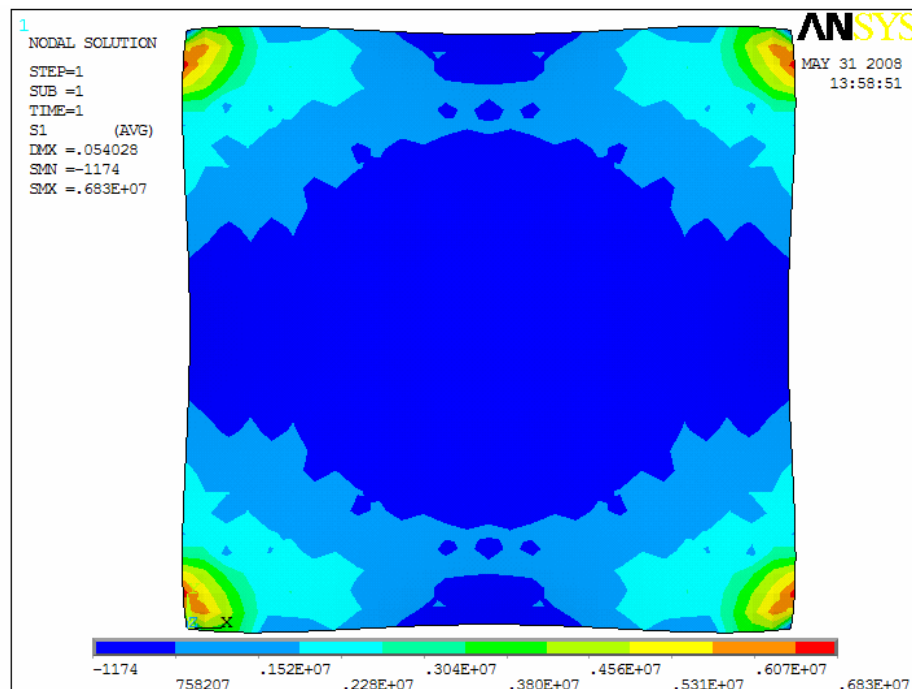


FIG 39: Gràfic de tensions en planta i en vista des de la part superior.

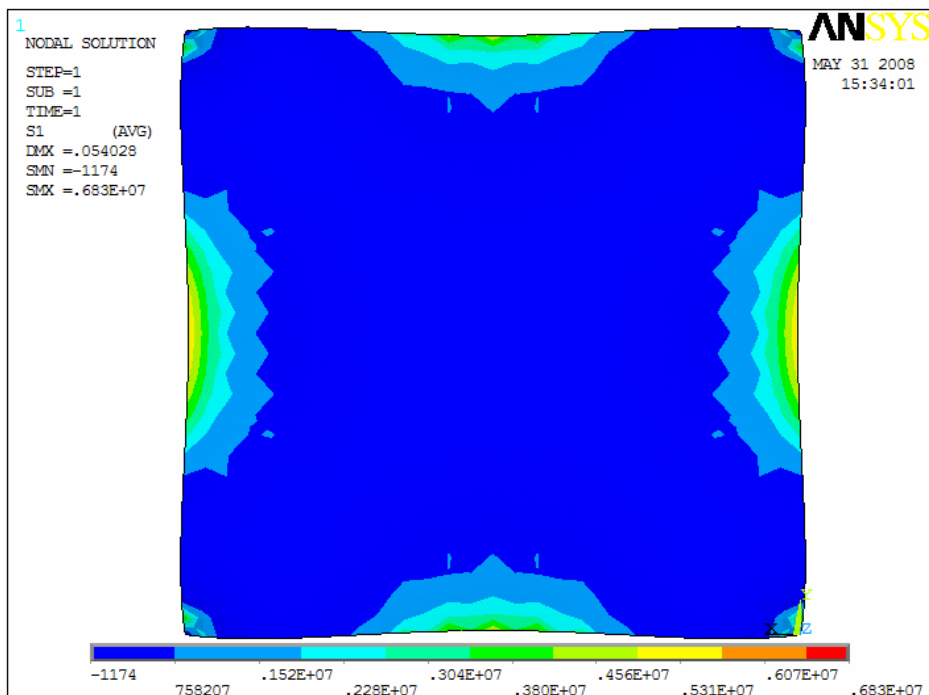


FIG 40: Gràfic de tensions en plata i vist des de la part inferior

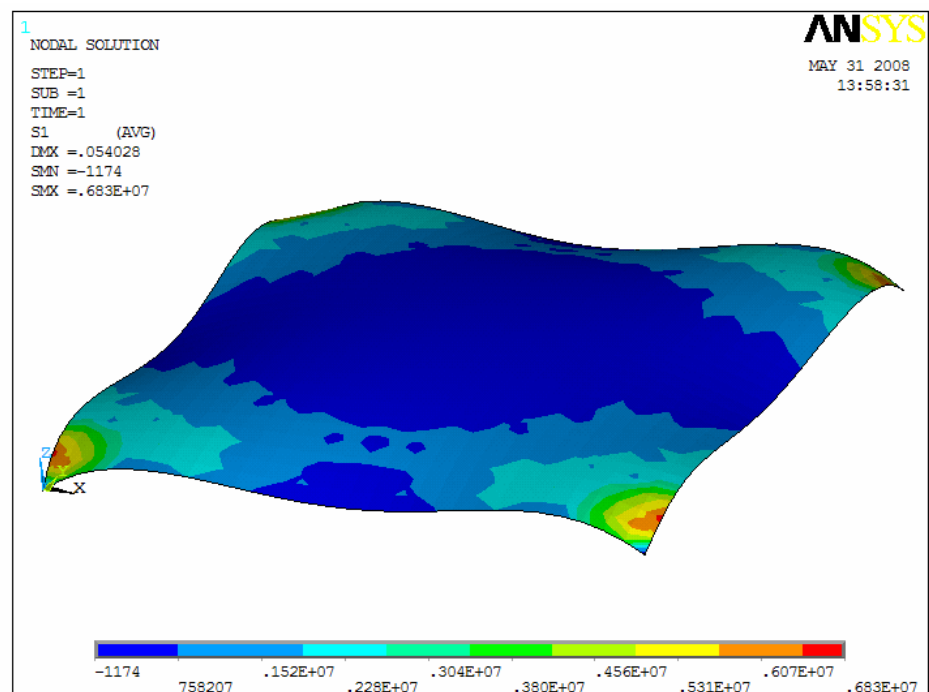


FIG 41: Gràfic de tensions de la cara superior en vista isomètrica

El color vermell indica els valors més alts per a tensions a tracció, aquests es concentren en els recolzaments de la cara superior, tot i que no acaben d'arribar a l'extrem. El resultat obtingut és correcte, ja que és en aquestes zones on es massifiquen totes les tensions per tal de ser transmeses als pilars. Com s'exemplifica en la figura 42, les cares traccionades són les que adopten la curvatura cap a l'exterior.

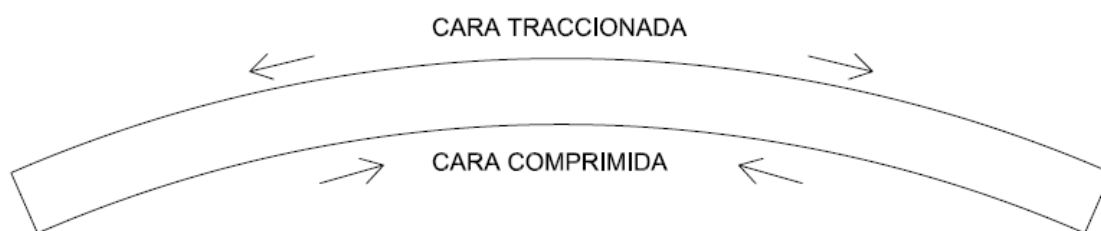


FIG 42

Cal considerar que el comportament de la volta de quatre punts és singular enfront de la resta de típica volta de catalana, que disposa de més superfície de recolzament, amb el que es disminueix considerablement els esforços de compressió en aquestes zones.

El programa, a més, indica el valor numèric més alt per a les forces de tracció, que és de $0,683 \times 10^7$ Pa, equivalent a $6,83 \text{ MPa} = 0,68 \text{ Kg/mm}^2$. En els punts a tracció el desplaçament de la volta es produeix en el sentit positiu de l'eix Z, per tant aquesta zona "s'aixeca" respecte la seva situació original.

El color blau identifica els valors més alts per a compressions. Aquestes es concentren principalment a tot la part central dels costats i en general a tot el centre de la volta, és a dir, gairebé domina tota l'àrea. El valor numèric més alt que es produeix a compressió és de -1174 Pa, equivalents a $-1,19 \times 10^{-4} \text{ Kg/mm}^2$, és un valor molt més baix que el màxim a tracció.

Aquest resultat no s'acaba d'ajustar al que es buscava. Tot i que la forma de treball que es mostra, en que la ceràmica treballa en gran part a compressió i en els punts de recolzament queda traccionada, sí que és lògica, els valors que reflexa el programa no ho són tant. Pels models consultats en altres treballs, les compressions solen arribar a valors més alts.

En els gràfics anteriors s'ha pogut observar la distribució de les tensions, on hi predominen els valors a compressió, tot i que aquests són baixos. Per tant, en contra del que es pensa habitualment, la volta ceràmica és un element que també treballa a flexió en molts punts de la seva dimensió.

Per tal de demostrar que el mòdul d'elasticitat no és una variable que influeix en la distribució de tensions, es mostra la següent imatge, on s'aprecien les tensions de la

mateixa volta amb un mòdul d'elasticitat 15000 MPa. Els valors resultats són idèntics i la distribució de tensions també.

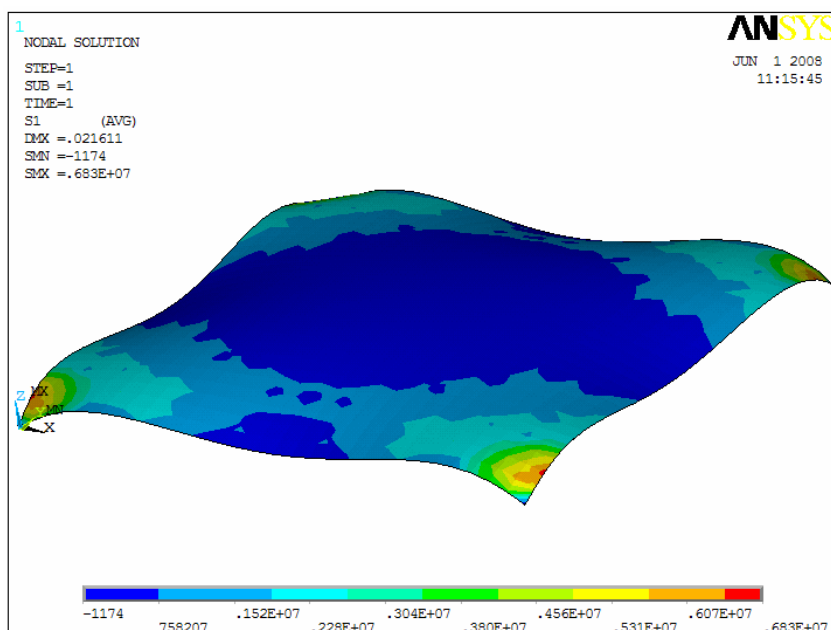


FIG 43: Gràfic de tensions de la cara superior en vista isomètrica amb mòdul d'elasticitat 15000 MPa.

4. ANÀLISI ESTÀTIC LINEAL DE LA VOLTA – SOLID 45

Amb la fi de comparar dos tipus d'anàlisi lineal amb l'ANSYS per conèixer quin respon de manera més fiable al model de volta de quatre punts, es desenvoluparà un anàlisi lineal a partir de l'element *solid 45*, que permetrà representar la volta amb gruix.

4.1. CREACIÓ DEL MODEL

El primer pas a fer un cop obert el programa i indicat el directori on es guardaran els arxius que es creïn, és activar el marcador *structural*.

4.1.1. Elements tipus

Per a la realització d'aquesta tipologia d'anàlisi, com ja s'ha enunciat, s'adoptarà l'element *solid 45*, que permet modelitzar sòlids en tres dimensions. Queda definit per 8 nodes que contenen 3 graus de llibertat: 3 de desplaçaments, traduïts als eixos X, Y,

i Z. Aquest model permet conèixer el mateix tipus de dades que l'element shell: deformada, reaccions... Però en contra, es pot ajustar més a valors reals ja que permet treballar amb el gruix i conseqüentment és capaç de redistribuir millor els esforços.

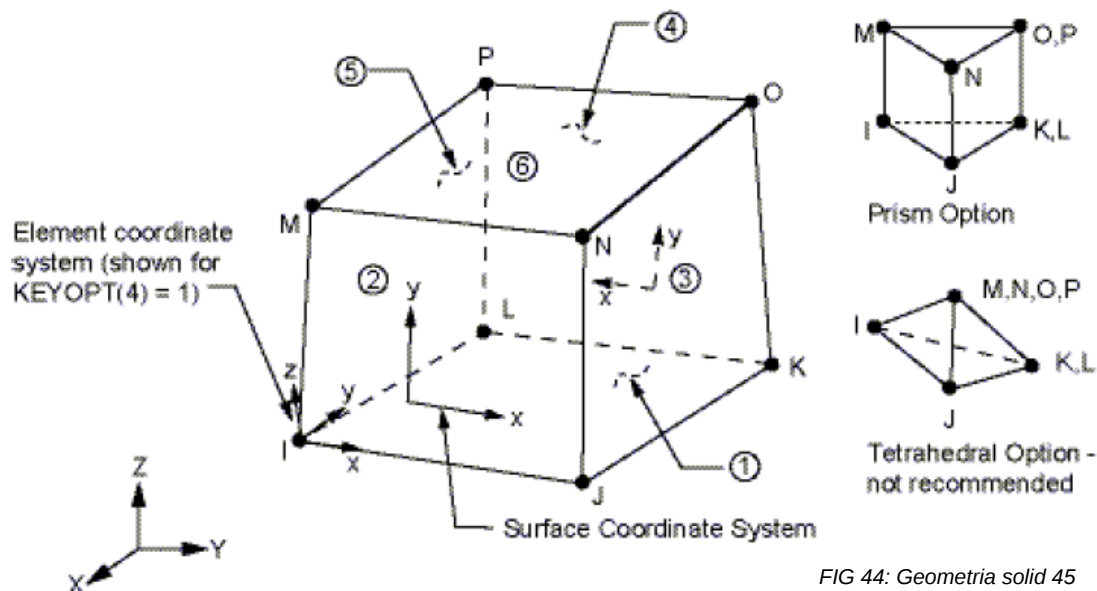


FIG 44: Geometria solid 45

4.1.2. Propietats del material

Aquest apartat és idèntic al explicat en el punts 3.1.2. Ja que al ser el mateix material també es considera que té les mateixes propietats.

4.1.3. Constants reals

Al treballar amb elements *solid* no es requereix la introducció de constants reals.

4.1.4. Geometria

El procediment per introduir la geometria és semblant al que s'ha anat seguint, tot i que té algunes variacions ja que en aquest cas el que s'està modelitzant és un sòlid.

El primer pas consisteix en seguir tot el procediment utilitzat en l'apartat 3.1.4 d'aquest mateix capítol; per tant s'introduiran els *keypoints*, es dibuixaran les línies i es formarà l'àrea.

En el segon pas s'extrusionarà la volta 4 cm en l'eix z (que és el que es considera que proporciona l'alçada a l'element). El procediment queda recollit en la figura 45:

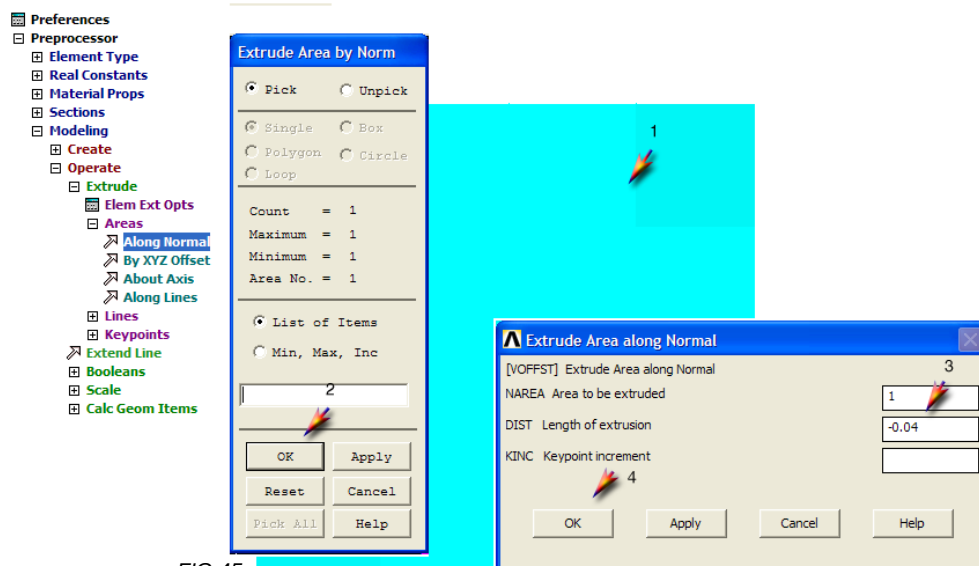


FIG 45

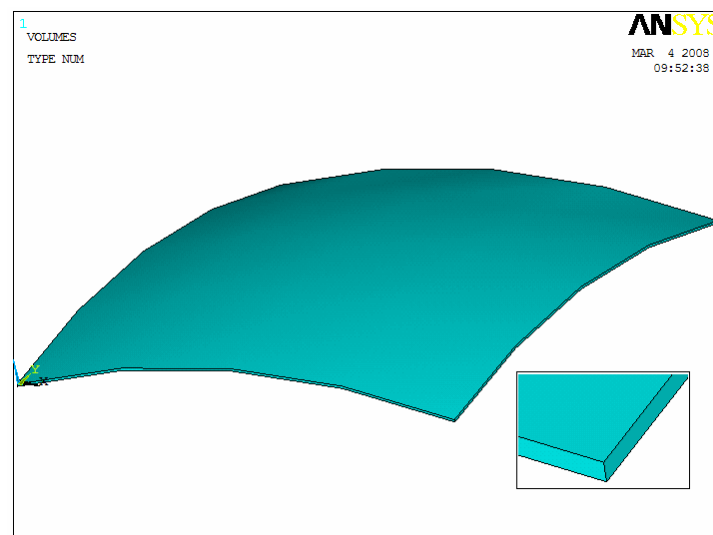


FIG 46: Imatge obtinguda en extrudir la volta

Un cop obtingut el volum, s'assignarà a l'ANSYS que aquest és l'element 1 i quedarà regulat pel tipus de material, constants reals, etc. assenyalades en els corresponents apartats.

4.1.5. Mallat

Per al mallat de la volta s'ha seguit un procediment molt diferent al ja explicat, degut a que ara es treballa amb un element del tipus solid.

En primer lloc, s'introduirà a l'ANSYS que la dimensió de l'element finit no superi la relació 0,15, que és una mida correcte per obtenir resultats mínimament òptims.

Pel tipus de volta i per poder veure bé el que passa, interessa que el seu gruix quedi dividit en diverses capes. Si els elements fossin del mateix gruix que la volta el programa podria donar problemes o fer una mala modelització, així que si es crearan nodes en la part intrínseca de la volta per tal d'ajuda a redistribuir millor els esforços.

S'ha decidit dividir aquest gruix en 5 parts; per tal que quan es faci el mallat apareguin les 5 parts s'haurà de dividir la línia de l'aresta en 5, sinó el programa ho dividiria en les parts que ell cregui més oportú.

Tot el procediment a seguir queda recollit en la imatge 47:

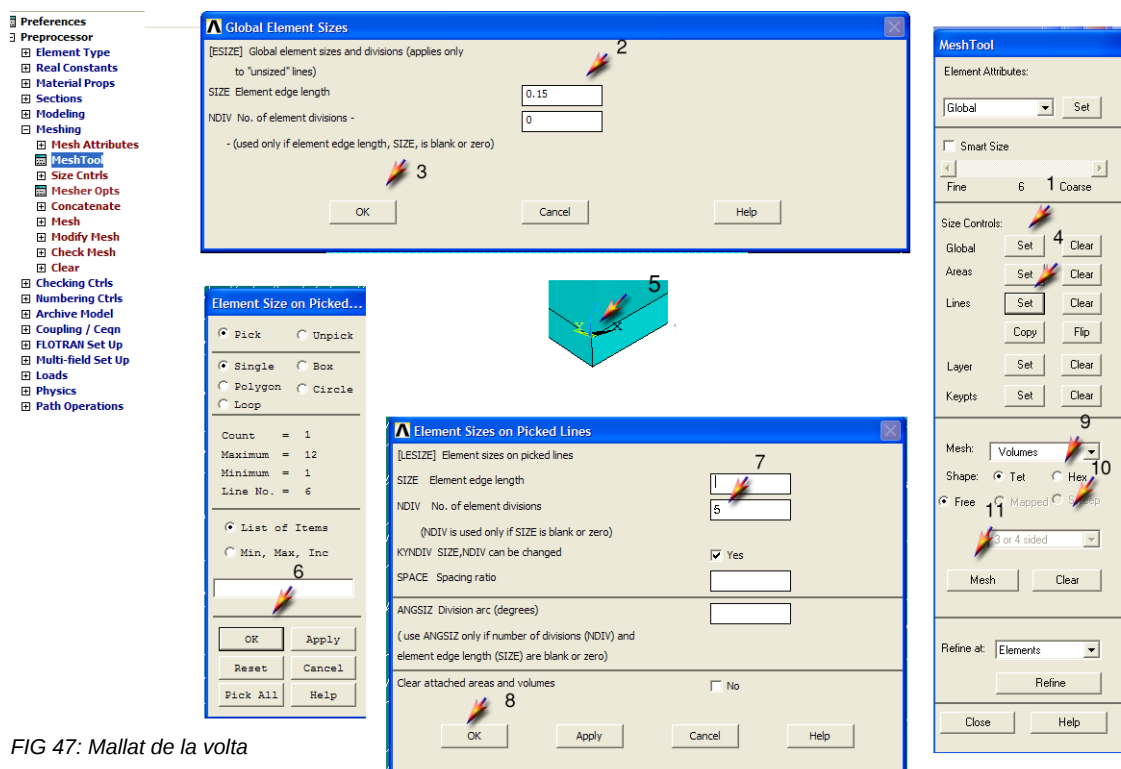


FIG 47: Mallat de la volta

Al clicar la opció *mesh* es procedeix a mallar tot el volum, i s'obté una imatge com la de la figura 48:

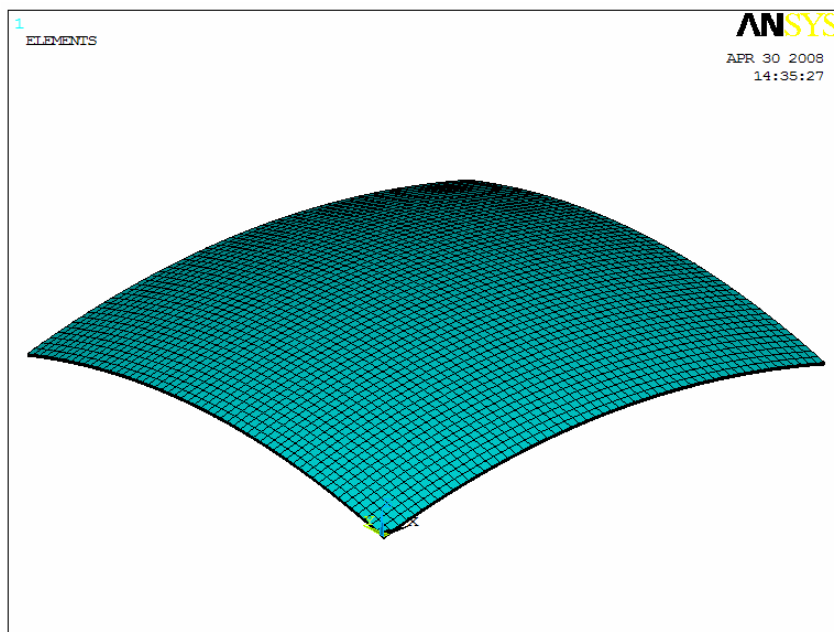


FIG 48: Imatge obtinguda al mellar la volta

En aquest cas no s'ha pogut controlar "directament" el nombre de divisions realitzades, amb el que variarà substancialment la forma d'introduir les carregues respecte el model *shell* 63.

4.2. DEFINICIÓ DE LES CONDICIONS DE CONTORN - SOLVE

Per a la definició de les condicions de contorn s'inicia el segon processador de l'ANSYS, el *solve*. En primer lloc s'haurà d'escollir el tipus d'anàlisi que es vol realitzar, tal i com ja s'havia explicat en l'apartat 3.2., serà l'estàtic.

Un cop fet aquest pas s'impedeix el desplaçament en l'eix X, Y i Z dels 4 *keypoints* inferiors de les arestes, que són, alhora, els recolzaments de la volta. Els moments MX, MY i MZ no es restringeix el desplaçament, ja que els punts de recolzament no estan encastats.

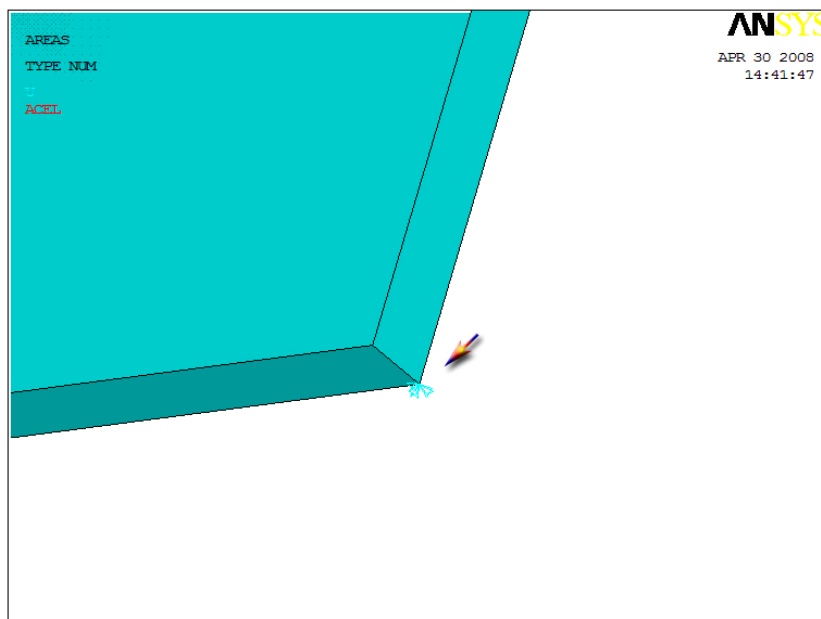


FIG 49: Punt de recolzament a marcar

En segon lloc s'aplica la gravetat en l'eix Z, de $9,8 \text{ m/s}^2$. És imprescindible considerar la gravetat si es vol que el programi reconegui el pes propi.

Es pot determinar aquest pes propi de forma manual i d'aquesta manera comprovar posteriorment que els resultats que proporciona l'ANSYS són fiables. El pes propi calculat de forma manual té un valor de 3247,03 kg equivalents a $31820,87 \text{ N}^6$.

Per determinar la carrega a aplicar s'ha partit de que el pes que es transmetia era de $2,41 \text{ Kn/m}^2$ ⁷, obtenint una carga total de 163027,82N. Les costelles estan situades cada 0,6 m i les carregues puntuals, que simulen ser uniformes repartides, cada 0,5 m.

Si es reparteix aquest valor entre 13 i 56 parts, per simular la distribució de 13 costelles, s'obté que cada càrrega puntual equival a un valor de -223,94 N per a cada punt d'aplicació. En aquest cas s'ha dividit en 56 parts per que és la divisió automàtica que ha fet l'ANSYS en aquesta direcció.

⁶ Per conèixer com s'ha obtingut aquest valor, cal veure l'apartat 3.2.

⁷ Aquesta càrrega superficial ha estat calculada en l'apartat d'introducció tècnica, i s'ha descomptat el valor de pes propi de la volta, ja que l'ANSYS el valora a partir de la densitat.

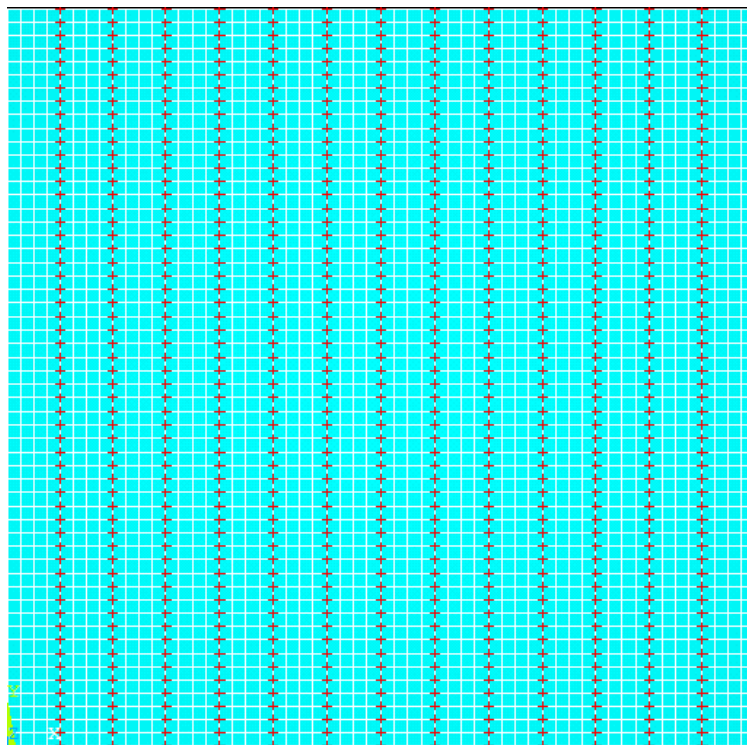


FIG 50: Distribució de càrregues

La selecció dels punts amb un mallat dens és força més complexa, ja que n'hi ha un gran nombre. Una de les raons per les quals s'ha decidit aplicar la càrrega puntual en cada un dels nodes de l'eix transversal és perquè en aquest cas és més fàcil escollir-los tots que no alternar la seva selecció. El procés de selecció de punts que s'ha seguit és el següent:

1. S'ha valorat en quants elements s'havia dividit l'eix longitudinal i s'ha comprovat que el nombre és 52, un valor adequat ja que és múltiple de 13 (el nombre de costelles), i permet fer una divisió entera. Així que es simularà que hi ha una costella cada 4 elements.
2. S'executen les ordres indicades a continuació per tal de que el programa mostri la numeració de nodes que ha realitzat.

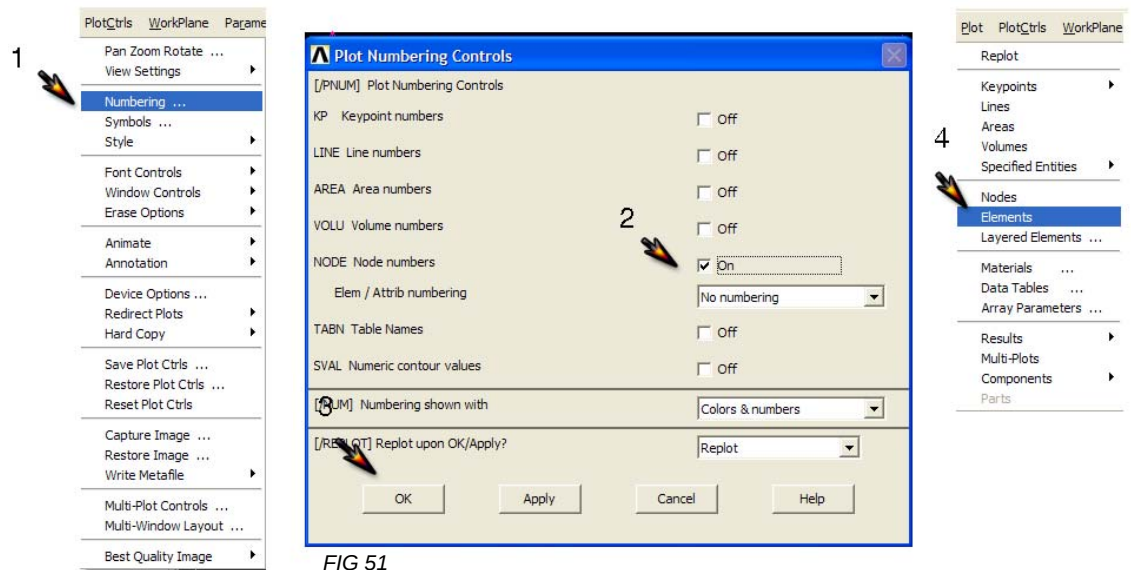


FIG 51

3. El procés a seguir per cada una de les costelles serà el següent: en primer lloc caldrà aproximar-se al principi d'aquestes amb el visor i comprovar quina numeració té.

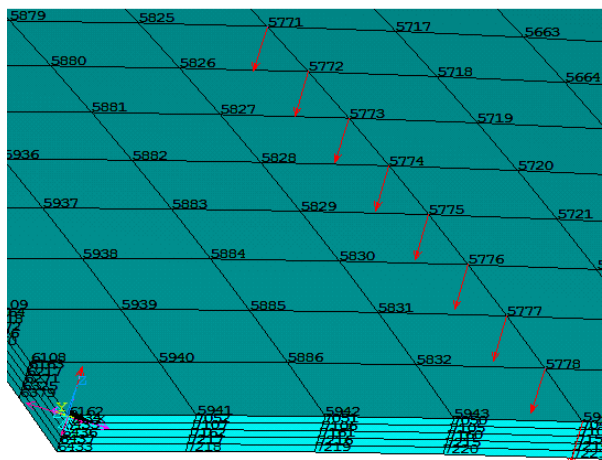


FIG 52

Com es pot apreciar en la imatge 52, la numeració de la primera costella s'inicia amb el 5778 (el node situat a l'extrem de moment no es tindrà en compte perquè segueix una altra numeració), i disminueix fins arribar al 5725.

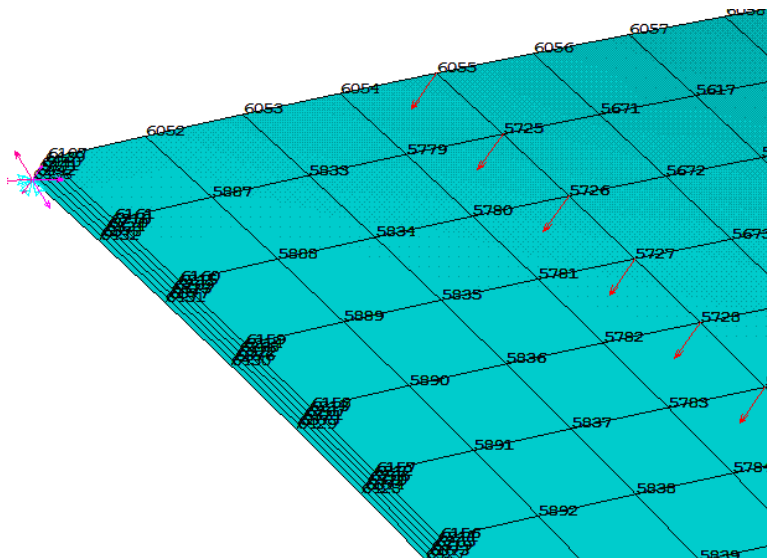


FIG 53

Un cop es coneixi la numeració, es seleccionarà la tira de nodes, tal i com es mostra en la figura 54:

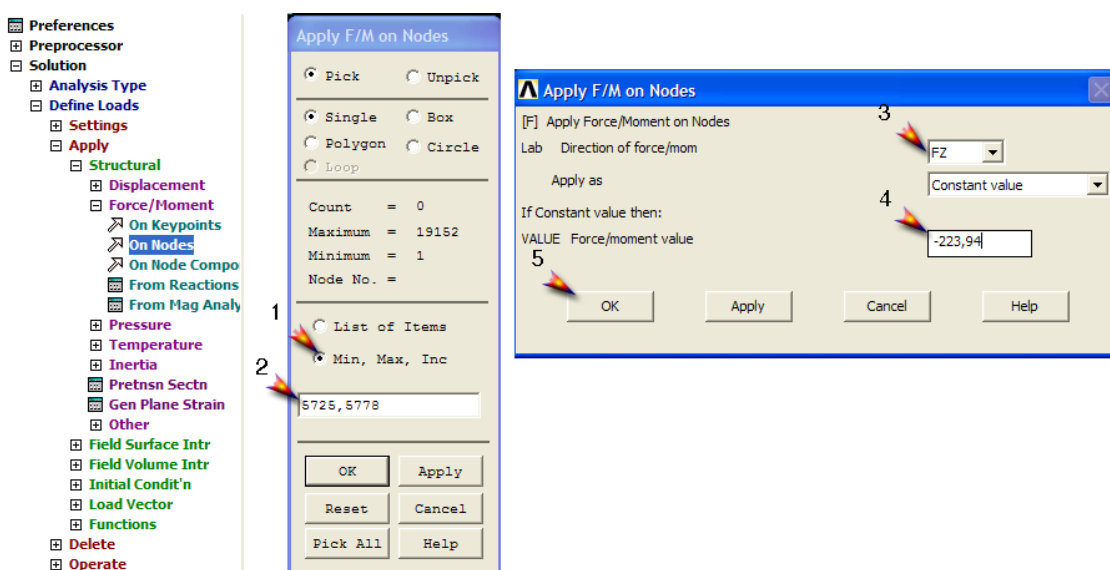


FIG 54

Es realitzarà aquesta operació per a cada una de les costelles. Tanmateix, faltaria seleccionar aquells nodes situats en els extrems, que no segueixen la mateixa numeració que la resta de la costella. Per aquests caldrà visualitzar la numeració assignada i introduir la càrrega puntual per cada un d'ells, de la següent manera:

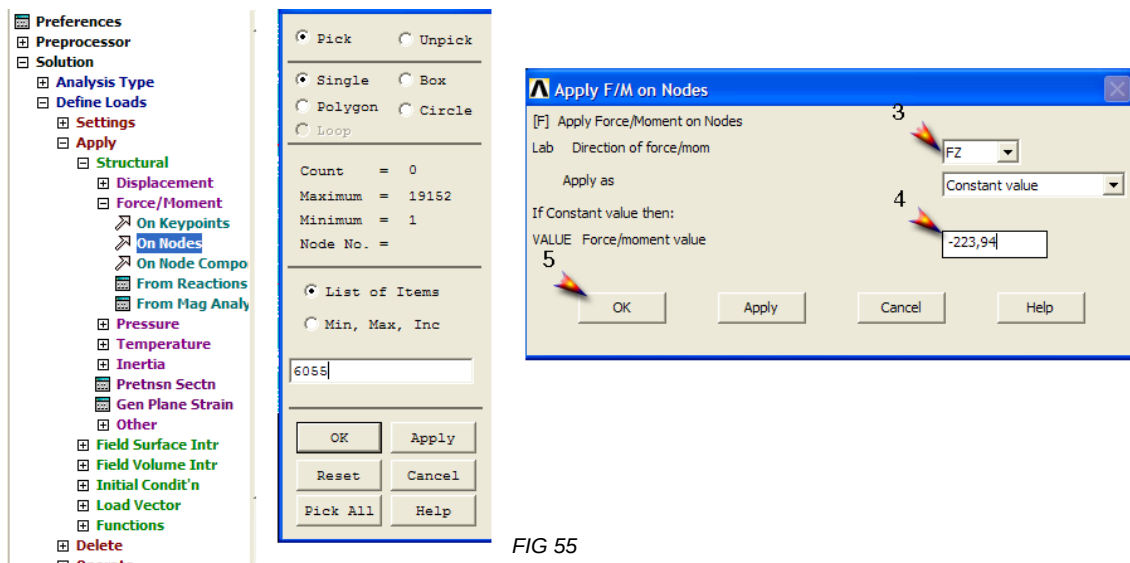


FIG 55

Arribat aquí, es pot dir que ja s'ha aconseguit crear la geometria i per tant es pot procedir al tercer processador. Abans caldrà verificar que el model té solució.

Si el model és vàlid, apareixerà una finestra amb un missatge de text on s'hi podrà llegir en anglès: *Solution is done*.

4.3. LECTURA DE RESULTATS – POSTPROCESSOR

4.3.1. Deformada

Per aquest anàlisi, on s'utilitza l'element tipus *solid 45*, no s'observen canvis substancialment importants en relació als obtinguts en l'anàlisi amb elements *shell*. La deformada adopta la mateixa forma de major pandeig en els laterals. En contra, el valor de deformada és diferent, ja que en aquest cas el resultat és de 10,4 cm, enfront els 5 cm obtinguts amb el model *shell 63*.

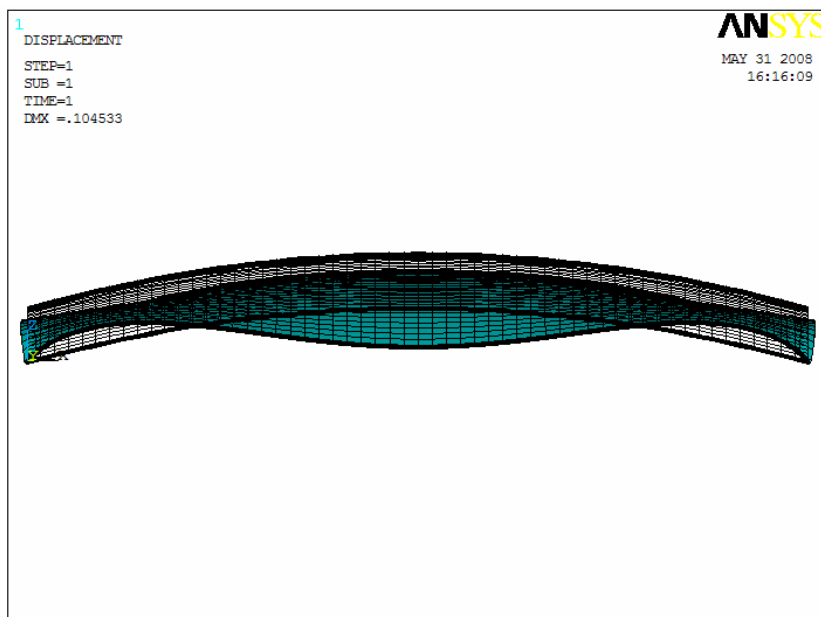


FIG 56:
Deformada
de la volta,
vista
lateralment.

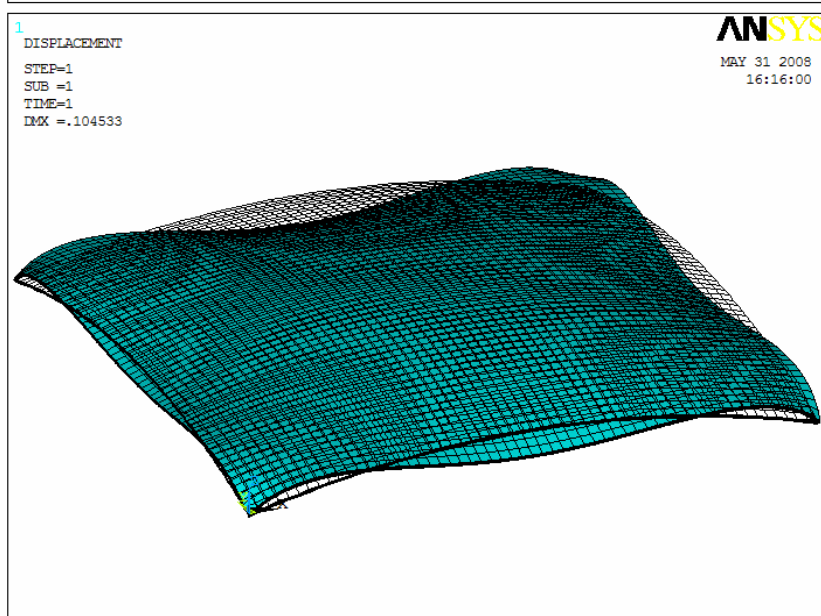


FIG 57:
Deformada
de la volta,
vista en
isomètric.

4.3.2. Reaccions

Les reaccions en els suports són les següents:

NODE	FX	FY	FZ
6162	0.10260E+06	89024	48510
6438	0.10260E+06	-89024	48510
6718	-0.10260E+06	-89024	48510
6993	-0.10260E+06	89024	48510
TOTAL VALUES			
	0.26299E-01	0.21243E-05	0.19404E+06

Els resultats mostrats són en Newtons. Es pot observar que la distribució d'esforços és exacte en cada un dels quatre punts de recolzament.

Cal remarcar que s'obté un valor total de 194040 N, un valor molt pròxim al calculat de forma manual, 194848,71 N, procedent de la suma del pes propi i les cargues aplicades, 31820,87 N i 163027,28 N; de manera que es pot afirmar que s'ha obtingut una bona modelització.

Les forces reaccionen bàsicament només en l'eix Z, perquè és només en aquesta direcció on s'ha aplicat la força de la gravetat i les càrregues puntuals.

4.3.3. Tensions

Les tensions obtingudes es mostren en les següents figures, de forma gràfica i en diferents perspectives:

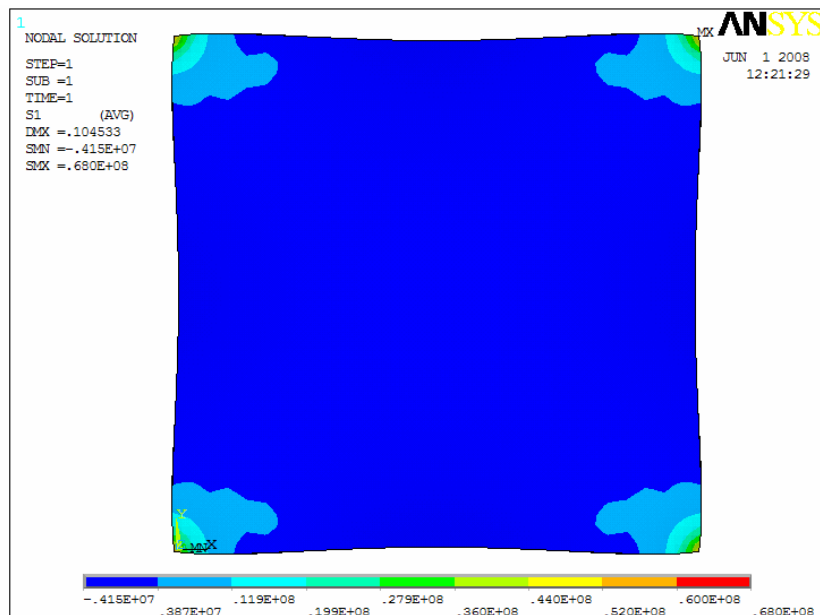


FIG 58:
Diagrama de
tensions de la
cara superior,
vista en
planta.

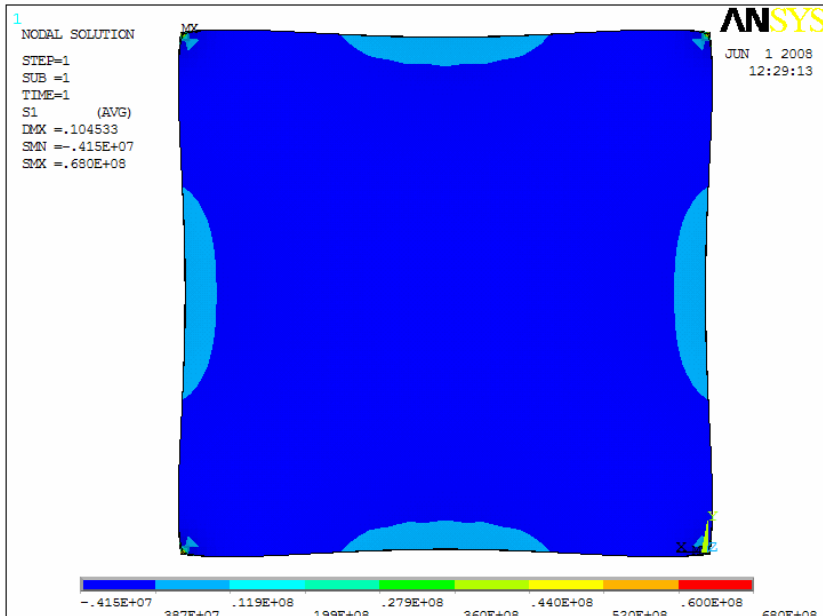


FIG 59:

Diagrama de tensions de la cara inferior, vista en planta.

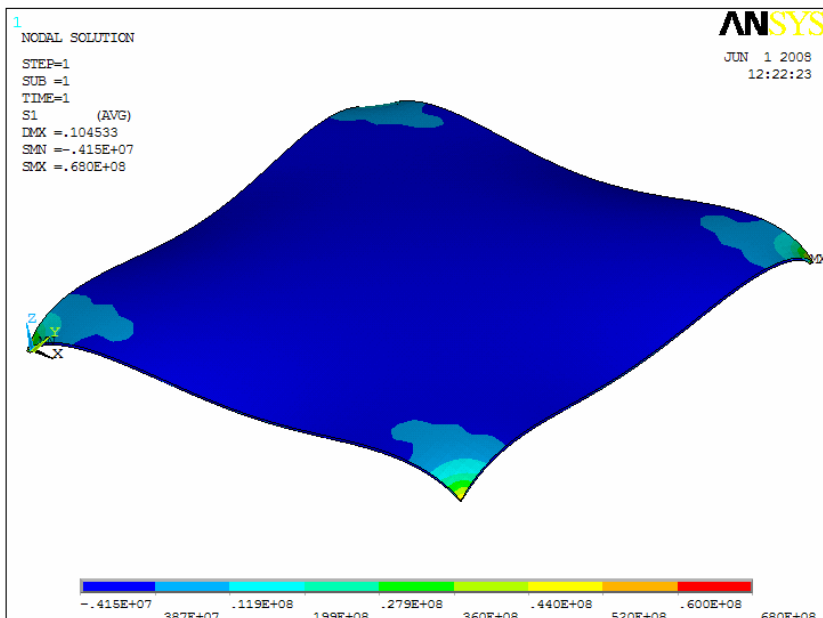


FIG 60:

Diagrama de tensions de la cara superior, vista isomètrica.

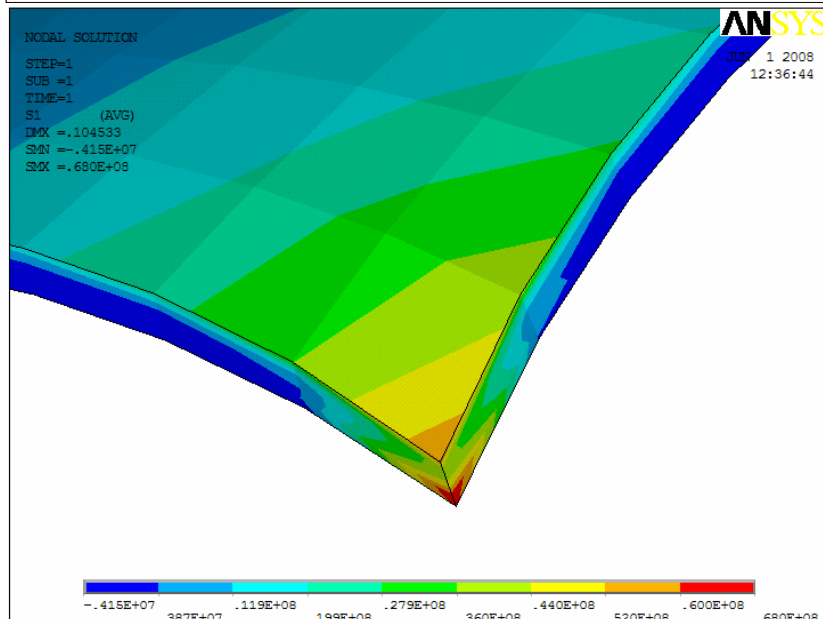


FIG 61:

Diagrama de tensions en el punt de recolzament.

El color vermell és el que indica els valors més alts per a tensions a tracció; en aquest cas els esforços de tracció es concentren just en els punts de recolzament. És una situació més correcte que la obtinguda amb el model *shell* ja que a la realitat els esforços a tracció es concentren més en aquests punts; a més, les tensions es distribueixen d'una forma més uniforme.

El model d'anàlisi amb elements sòlids, al tenir volum, mostra millor els resultats, ja que es pot veure en el gruix de la volta com una cara traccionada passa a comprimida. A mode d'exemple, si s'observa la zona de recolzament: la cara exterior de la volta es troba amb valors a traccions i quan més s'aproxima a la punta més augmenta aquest esforç. Pel que fa a la cara inferior aquesta es troba amb valors alts a compressions i a mesura que s'acosta a la punta passen a ser de tracció, degut a que la volta es troba subjectada a un punt i la restricció de poder desplaçar-se fa que quedi flexionada.

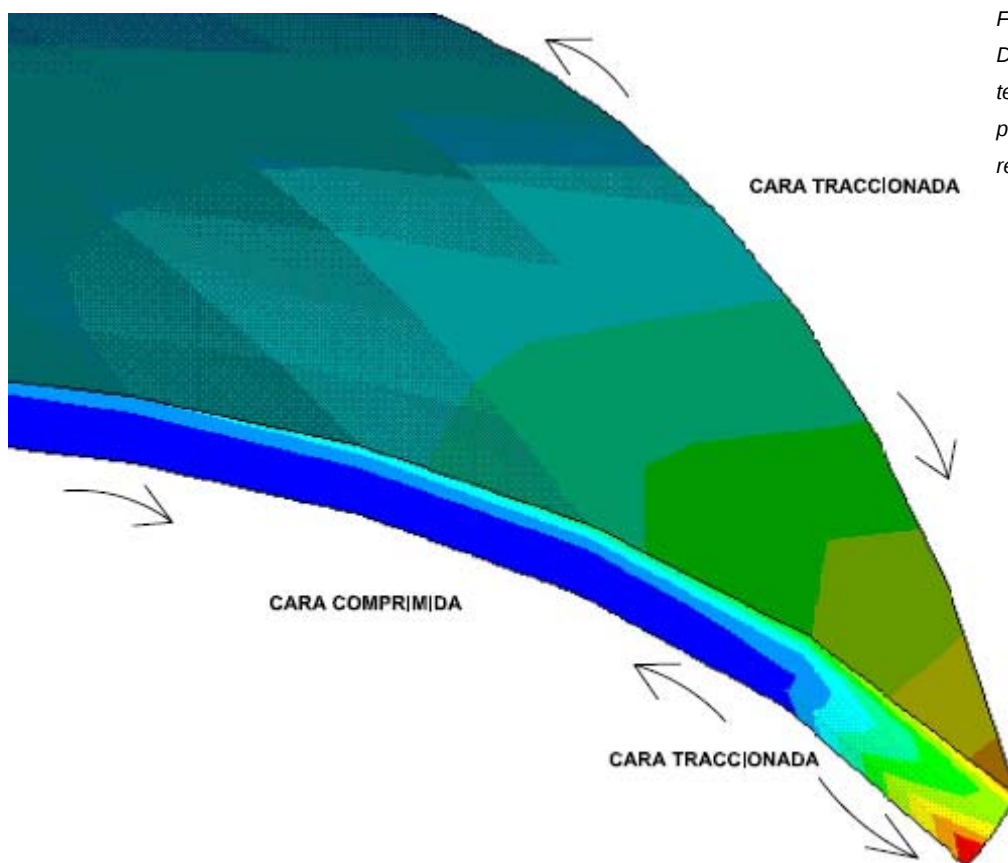


FIG 62:
Diagrama de
tensions en el
punt de
recolzament.

El programa, a més, indica el valor numèric més alt per a les forces de tracció, que és de $0,68 \times 10^8$ Pa, equivalent a $68,3 \text{ MPa} = 6,9 \text{ Kg/mm}^2$. En els punts de tracció el desplaçament de la volta és en el sentit positiu de l'eix Z.

Pel que fa al color blau, que identifica els valors més alts per a compressions, es concentra principalment a tot la part central dels costats i en general a tot el centre de la volta, és a dir, gairebé domina tota l'àrea. El valor numèric més alt que es produeix a compressió és de $-0,415 \times 10^8$ Pa, equivalents a $-41,5$ MPa = $-4,23$ Kg/mm².

5. ANÀLISI ESTÀTIC LINEAL DE LA CÚPULA8 - SHELL 63

5.1. CREACIÓ DEL MODEL

El primer pas a fer un cop obert el programa i indicat el directori on es guardaran els arxius que es creïn, és activar el marcador *structural*. La cúpula modelitzada, com ja s'ha definit, respon a un model de volta semiesfèrica vuitavada, amb una dimensió dels costats de 3,30 metres i alçada 4,35 metres.

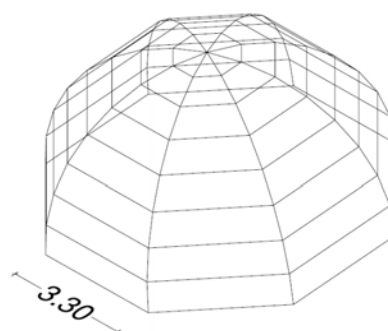


FIG 63

5.1.1. Elements tipus

En el cas de la cúpula, s'adoptaran dos models d'elements finits, ja que les costelles també es convertiran en elements finits. Per mallar les àrees s'utilitzarà l'element *shell 63*, que ja ha estat explicat en l'apartat anterior, i per mallar les costelles s'utilitzarà el *beam 4*, una "barra" composta per 2 nodes, de tres

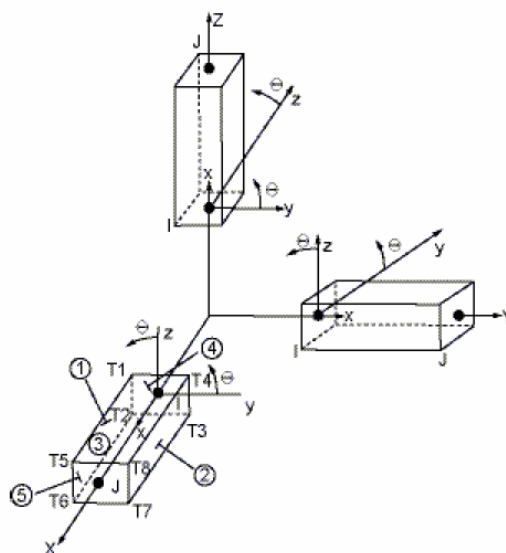


FIG 64: Geometria Beam 4

⁸ En aquest apartat tan sols s'indicarà l'execució en ANSYS d'aquells passos que siguin diferents als ja explicats.



dimensions, i amb els graus de llibertat: UX, UY, UZ, ROTX, ROTY, ROTZ.

5.1.2. Propietats del material

Aquest apartat és idèntic al explicat en el punt 3.1.2 Ja que al ser el mateix material també es considera que té les mateixes propietats.

5.1.3. Constants reals

Pel que fa a les constants reals, per als elements *shell* s'introduiran les mateixes propietats ja esmentades en l'apartat 3.1.3, per a l'element *beam*, al ser una barra, no requereix la introducció de les constants reals.

5.1.4. Geometria

La generació de la volta semiesfèrica de l'església ha estat un procés força lent ja que es necessiten multitud de punts per definir-la i a més, aquests han de ser molt precisos, així que s'ha fet ús del programa de disseny Autocad. S'ha pres com a punt de referència per desenvolupar la cúpula el centre de la base octogonal, d'aquesta manera s'aconsegueix de forma més senzilla un model totalment simètric:

Nº punt	X	Y	Z
1	0,3	3,33	0
2	-4,02	1,66	0
3	-4,02	-1,66	0
4	-1,66	-4,02	0
5	1,66	-4,02	0
6	4,02	-1,66	0
7	4,02	1,66	0
8	-1,66	4,02	0
9	-0,83	2,01	3,77
10	0,83	2,01	3,77
11	2,01	0,83	3,77
12	2,01	-0,83	3,77
13	0,83	-2,01	3,77



14	-2,01	0,83	3,77
15	-2,01	0,83	3,77
16	-2,01	-0,83	3,77

Per tal de donar forma a la cúpula, s'ha començat reproduint la base octogonal sobre la que es desenvolupa.

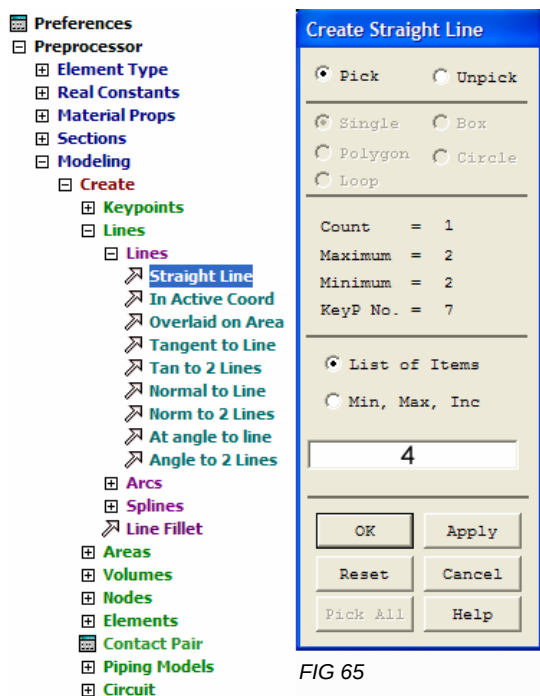


FIG 65

Un cop s'ha fet la base, de cada aresta d'aquesta surt un arc que finalitza en el punt més alt de la cúpula, fins formar els vuit costats.

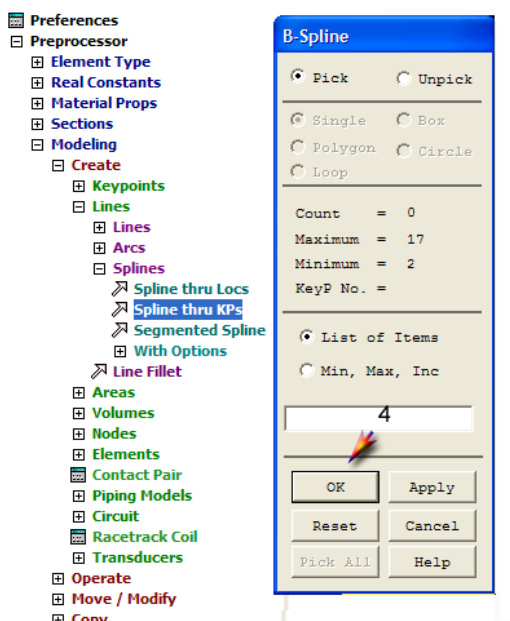


FIG 66

En la figura 67 es mostra en isomètric una imatge de com la cúpula ja ha adoptat la forma final un cop s'han introduït els arcs.

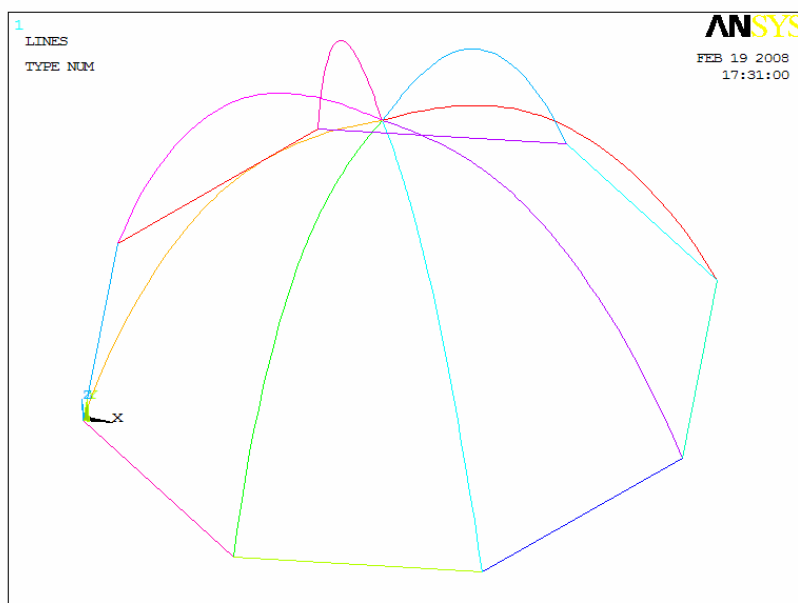


FIG 67: Línies que conformen la geometria de la cúpula.

Així que arribat a aquest punt, només cal definir les àrees, cada una compresa per una línia base i dues de laterals, i s'obté la següent figura:

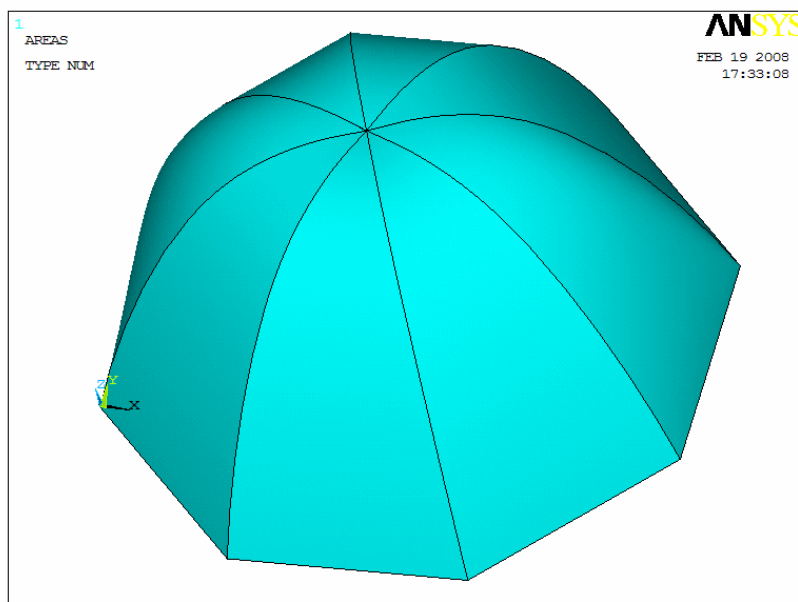


FIG 68: Àrea que conforma el volum de la cúpula.

5.1.5. Mallat

Un cop es té la geometria, es procedeix a la fase de mallat.

En aquest cas, ja que les costelles formen part de l'estructura que sustenta la volta, s'hauran de mallar, i es farà amb el mateix procediment aplicat en la discretització de la volta de quatre punts, de tal manera que la distància entre nodes obtinguda sigui una distància coneguda i així aplicar càrregues puntuals simulant càrregues lineals.

Tanmateix en aquest cas la opció de mallat serà triangular, ja que és la més òptima donada la geometria de l'element. Un cop mallades les costelles, es procedirà a discretitzar les àrees.⁹

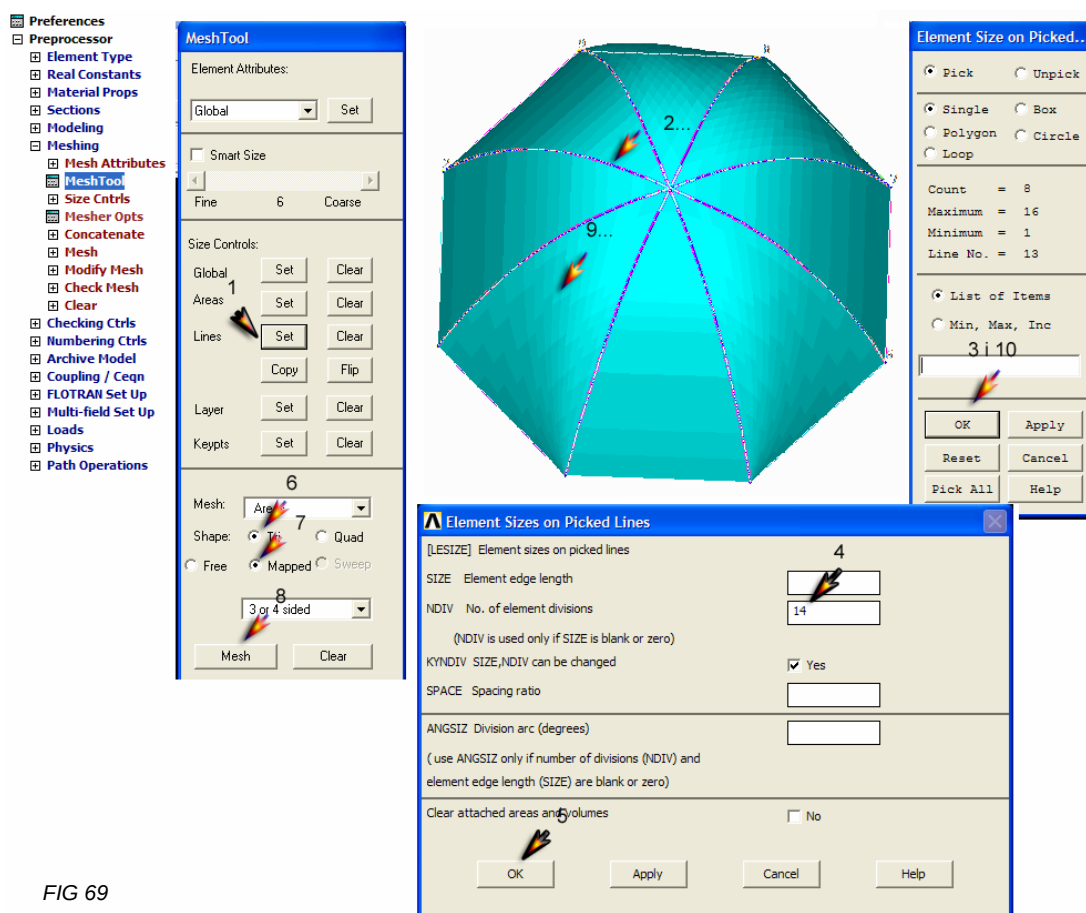


FIG 69

⁹ Quan en les imatge mostrades, en la numeració de passos a seguir, s'indica un número i a continuació punts suspensius, significa que s'han de seleccionar tots els elements destacats com el que s'està senyalant en aquell pas.

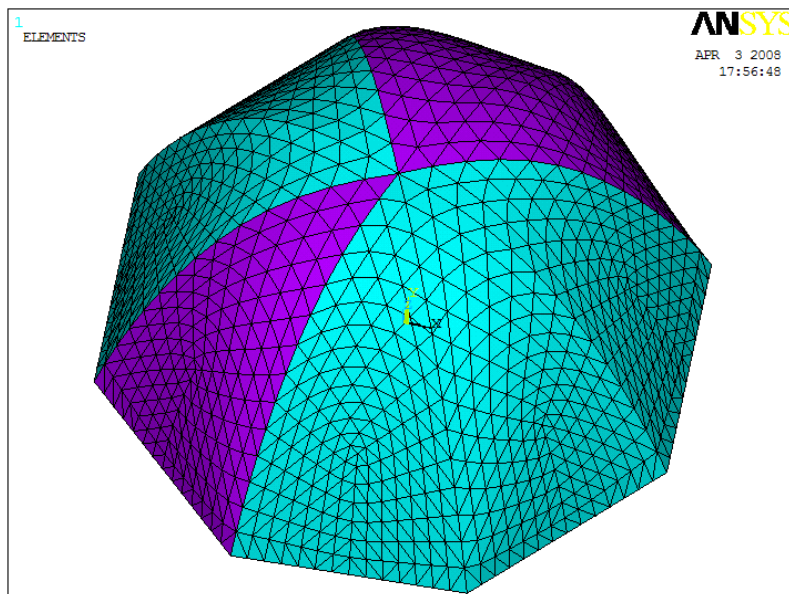


FIG 70: Model obtingut de la cúpula.

5.2. DEFINICIÓ DE LES CONDICIONS DE CONTORN

Per a la realització d'aquest anàlisi s'inicia el segon processador de l'ANSYS, el *solve*. En primer lloc s'haurà d'elegir el tipus d'anàlisi que es vol realitzar, tal i com s'ha anotat en l'apartat referent a la volta de quatre punts. En segon lloc, s'hauran de bloquejar les línies que formen la base octogonal en l'eix z:

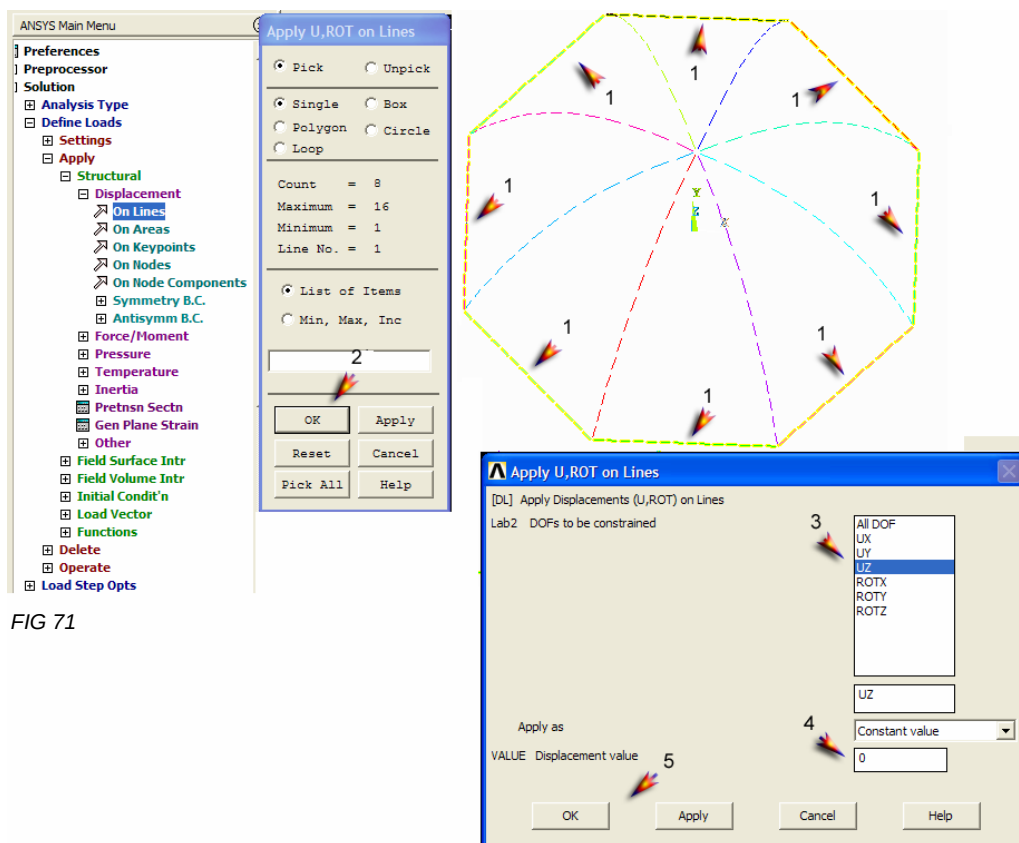


FIG 71

Posteriorment s'aplicarà la gravetat en l'eix z, de $9,8 \text{ m/s}^2$. És imprescindible aplicar aquest valor si es vol que el programa reconegui el pes propi. Es pot determinar aquest pes propi de forma manual i d'aquesta manera comprovar posteriorment que els resultats que proporciona l'ANSYS són fiables. Es pren com a densitat 1200 kg/m^3 , i com a dimensions reals de la volta una àrea aproximada de 100 m^2 :

$$\text{Àrea semiesfera: } 2 \times \pi \times r^2 = 2 \times \pi \times 4^2 = 100 \text{ m}^2$$

$$\text{Pes propi} = 100 \text{ m}^2 \times 1200 \times 0.04 = 4800 \text{ kg}$$

Si un kg equival a $9,8 \text{ N}$, 4800 kg equivalen a 47040 N .

Per calcular la carrega a aplicar s'ha partit de que el pes que es transmetia era de $2,41 \text{ Kn/m}^2$ ¹⁰, obtenint una carga total de 241000 N . Les costelles estan situades en cada aresta de la cúpula i les carregues puntuals, que simulen ser uniformes repartides, cada $0,5 \text{ m}$. Si aquest valor es reparteix entre les 8 costelles i les 14 divisions fetes en cada una d'elles, s'obté que cada carrega puntual equival a un valor de $-2151,786 \text{ N}$ (veure la següent figura).

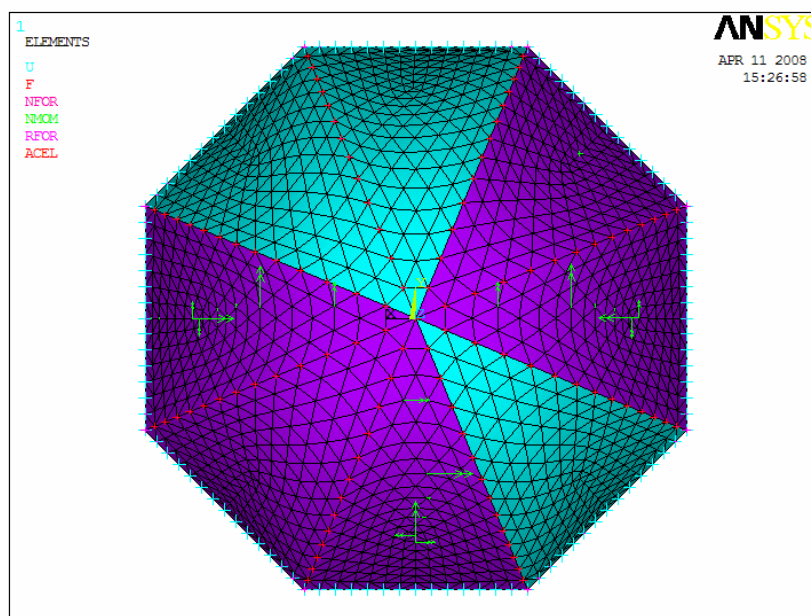


FIG 72: Distribució de forces, en planta.

¹⁰ Aquesta, ha estat calculada en l'apartat de introducció tècnica

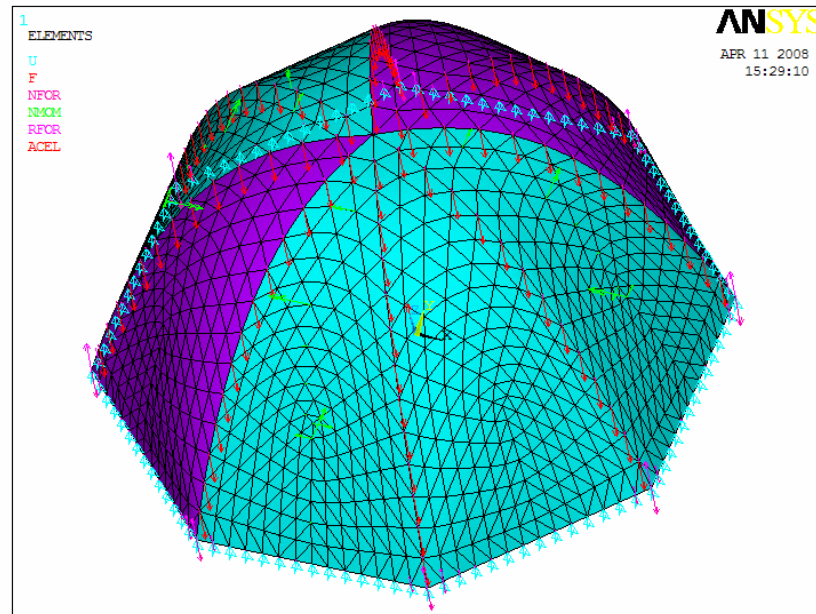


FIG 73: Distribució de forces, en isomètric.

5.3. LECTURA DE RESULTATS

5.3.1. Deformada

La deformada, pel cas de la cúpula, és més difícil poder visualitzar en una mateixa imatge el model anterior i el model posterior a l'aplicació de les càrregues, ja que queda una tramada molt densa. Per tant, es mostra a mode de comparació la situació inicial i la posterior a l'aplicació de càrregues en dues figures:

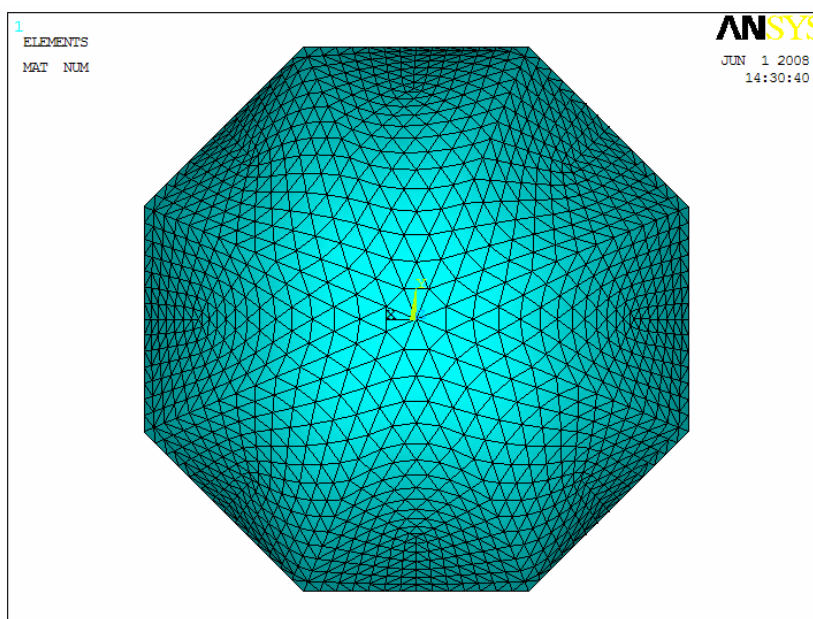


FIG 74: Imatge en planta de la cúpula, abans d'aplicar les càrregues.

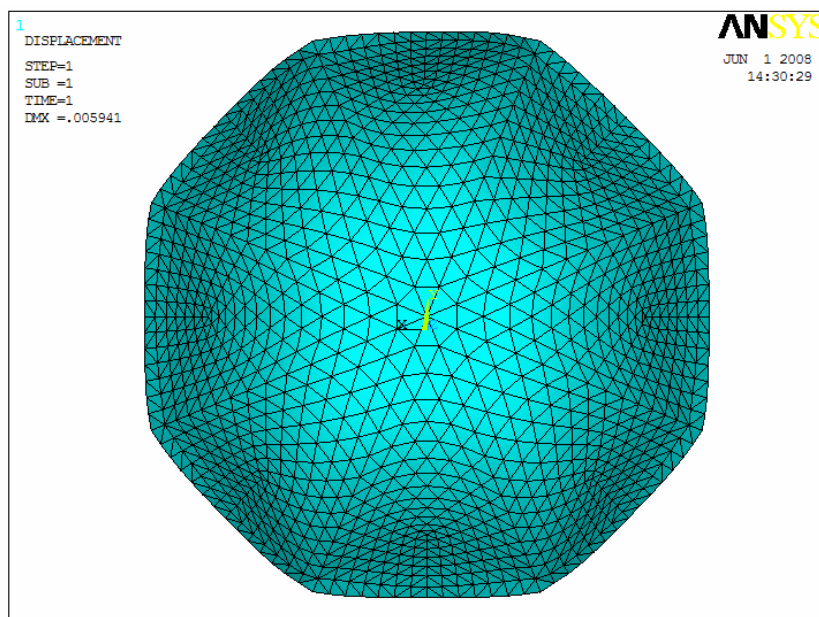


FIG 75: Imatge en planta de la cúpula, un cop aplicades les càrregues.

En la primera imatge mostrada es pot veure la cúpula sense deformar i en la segona deformada. Si es fa una comparació entre les dues, es pot veure que la volta pateix una reducció general cap a baix (queda com “xuclada”), i a més experimenta una lleugera obertura de la base cap a l’exterior. En la imatge següent, es pot veure la disminució d’alçada que pateix la volta respecte el model inicial:

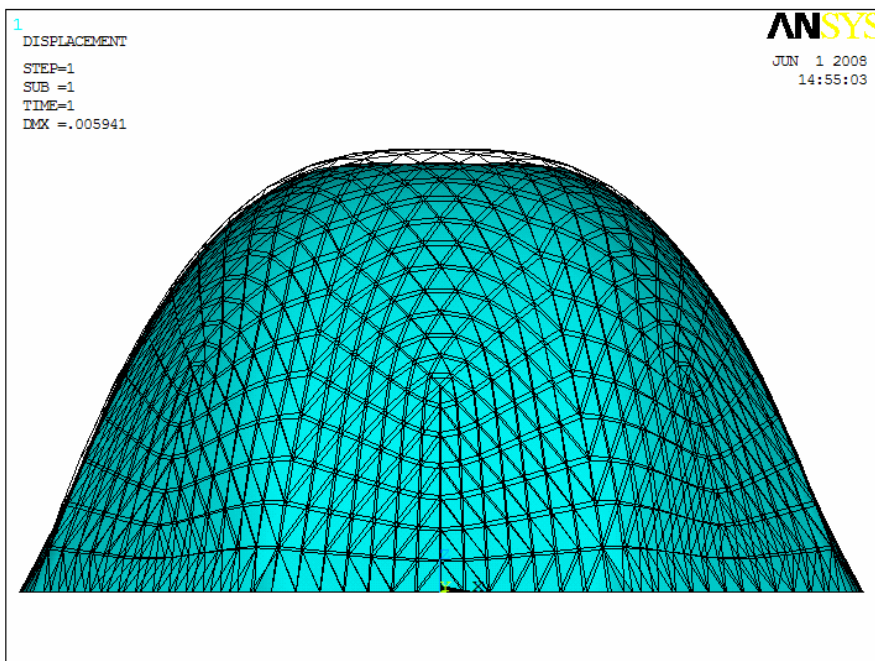


FIG 76: Imatge en alçat de la cúpula. Es mostra l’estat inicial i la deformada alhora.

El valor de deformada que s’ha obtingut és de 0,005 metres, si es aquest es compara amb el model de volta de quatre punts, es pot observar que en aquest cas el resultat no és tan alt, ja que la cúpula disposa de major recolzament i permet que els esforços

no es concentrin en punts tan concrets; a més, al fixar tota la base s'evita que aquesta s'obri amb excés cap als costats.

Els resultats obtinguts gràficament es poden comparar amb els numèrics, tal i com ja s'ha fet amb la volta de quatre punts. Per tant, amb el llistat que emet l'ANSYS de resultats de deformacions, es pot comprovar el nus que pateix major deformació:

NODE	UX	UY	UZ	ROTX	ROTY	ROTZ
2	0.26622E-03	0.29305E-02	-0.40736E-02	-0.25446E-04	0.10551E-03	0.92460E-05

Cal puntualitzar que el desplaçament en l'eix X i l'eix Y, assenyalats en la taula, es deuen a l'obertura de la cúpula.

Aquest node es situa al punt més alt de la cúpula, on conflueixen totes els costelles. En el gràfic situat als peus, es pot veure situació del node descrit, en la zona de color blau fosc.

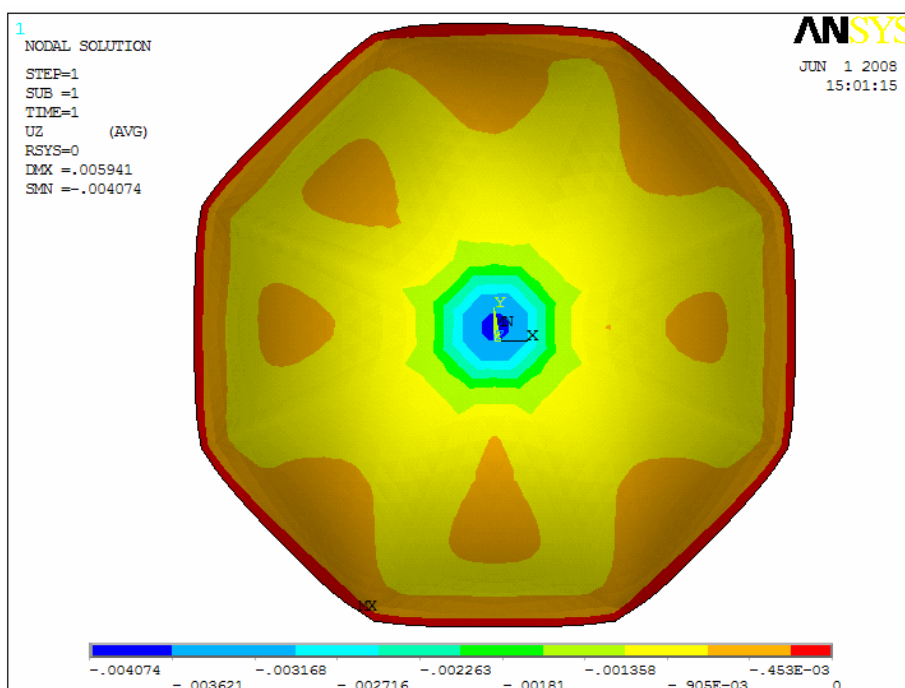


FIG 77: Imatge en planta de la cúpula, s'observa la intensitat de desplaçament per l'eix Z.

5.3.2. Reaccions

Ja que aquest model té múltiples punts de recolzament, en aquest cas tan sols es mostraran els valors totals resultants. Cal recordar que tan sols s'ha fixat l'eix Z i per tant, l'únic valor diferent a 0 serà la reacció en aquest eix:

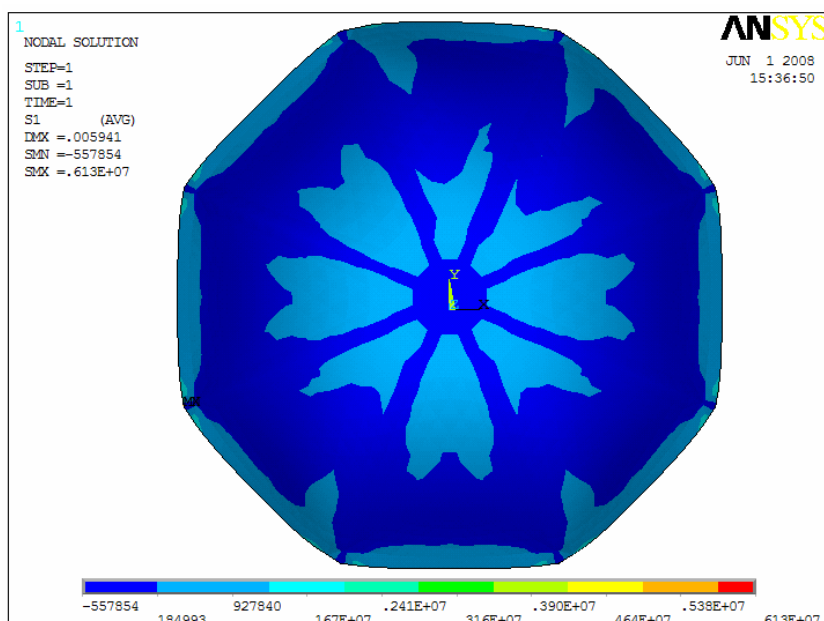
NODE	FX	FY	FZ	MX	MY	MZ
	0.0000	0.0000	0.27441E+06	0.0000	0.0000	0.0000

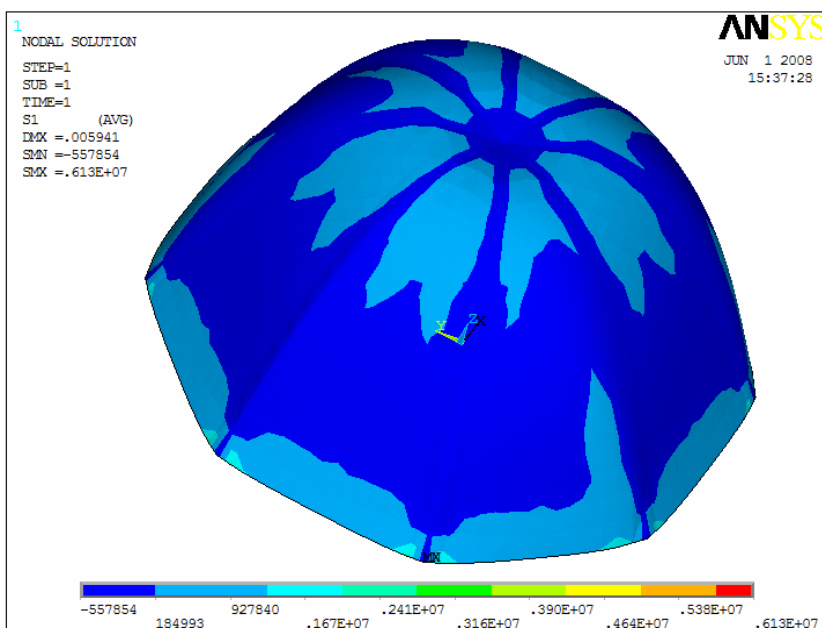
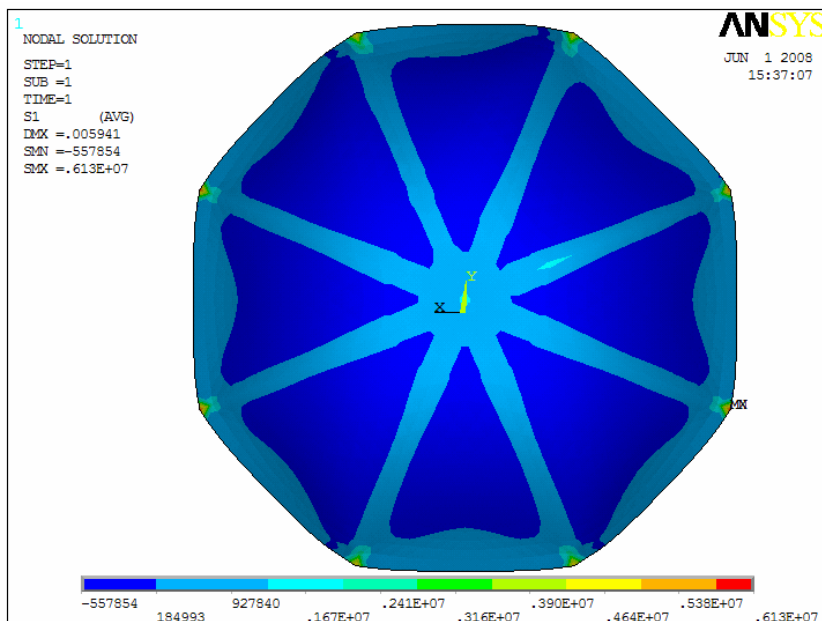
S'obté un total de 274410 N, un valor molt pròxim al calculat manualment, 288040 N, procedent de la suma del pes propi i les cargues aplicades, 47040 i 241000 N.

En aquest cas és més difícil arribar a un resultat similar entre el càlcul manual i el de l'ANSYS i resta una diferència de 13,63 KN, aquest fet és degut a que la geometria de la cúpula és més complicada.

5.3.3. Tensions

Els resultats obtinguts en el model de la cúpula són els que es mostren en les següents imatges. Cal remarcar que la distribució de forces no és totalment simètrica ja que tampoc ho és el mallat que s'ha aconseguit. Tanmateix no té especial influència en els resultats.





Igual que en l'anàlisi de tensions fet per la volta de quatre punts (en l'anterior apartat), es respecta la mateixa simbologia del color.

El color vermell és el que indica la localització dels valors més alts de tensions a tracció que es donen en la cúpula. El valor màxim a tracció és de $0,613E+07$ Pa, equivalent a $6,13 \text{ MPa} = 0,61 \text{ Kg/mm}^2$. Els punts sotmesos a majors traccions es troben en la cara interior dels recolzaments.

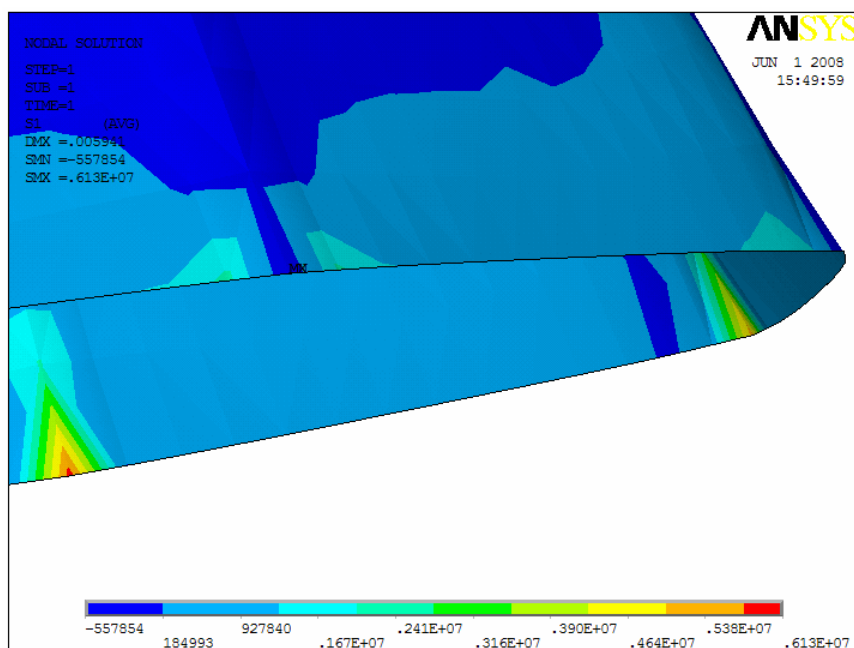


FIG 81: Resultat de les tensions en els recolzaments.

Pel que fa al color blau, que identifica els valors més alts per a compressions, es concentra principalment a tot la part central dels costats i a tota la longitud d'on estan situades les costelles (que coincideix amb la posició de les arestes de la cúpula). El valor numèric més alt que es produeix a compressió és de -557851 Pa, equivalent a 0,055 Kg/mm². És un valor molt baix si es compara amb el màxim a tracció.

Si es fa una comparació simple entre els dos casos, la volta de quatre punts i la semiesfèrica, els valors a tracció son força semblants. Per contra, si es fa una comparativa segons el pes la volta de quatre punts, tot i ser molt menys pesada, reacciona amb traccions igual d'altas; aquest fet és degut a que treballa amb menys superfície de recolzament i com a tal és més difícil de redistribuir els esforços.

Pel que fa als valors de compressions, es pensa que si es modelitzés la cúpula amb elements sòlids s'arribaria a resultats més ajustats a la realitat. Per tal de mostrar una aproximació general del que s'aconseguiria, s'ha redactat l'apartat que ve a continuació.

6. ANÀLISI ESTÀTIC LINEAL DE LA CÚPULA – SOLID 45

Aquest model que es pretén realitzar té com a fi demostrar que l'aplicació de l'element *solid 45* en la modelització de volta semiesfèrica aporta resultats més ajustats a la forma de treball real de les voltes en comparació al model realitzat amb elements *shell 63*.

6.1. CREACIÓ DEL MODEL

Tal i com ja s'ha dit en els altres anàlisis ja desenvolupats, el primer pas a fer un cop obert el programa i indicat el directori on es guardaran els arxius que es creen, és activar el marcador *structural*.

6.1.1. Elements tipus

Pel que fa a l'elecció de l'element tipus, en aquest cas es modelitzarà la cúpula amb només elements *solid 45*. En la modelització anterior de la cúpula també s'han mallat les costelles però en aquest cas no s'ha cregut oportú, degut a que convertiria el model analitzat en una geometria molt complexa de treballar.

6.1.2. Propietats del material

En aquest apartat s'elegeixen les mateixes propietats que s'han anat citant fins ara, un mòdul elàstic de 6000 MPa i un coeficient de Poisson 0,3.

6.1.3. Constants reals

Per treballar amb elements sòlids no es requereix la introducció de cap paràmetre referent a les constants reals.

6.1.4. Geometria

Per a la realització de la geometria cal que primer s'introdueixin els mateixos elements ja citats en la realització de la cúpula amb elements *shell 63*.

Posteriorment es procedeix a copiar la geometria realitzada i situar-la a a una distància de 4 cm en l'eix Z, tal i com s'indica en la figura 82.

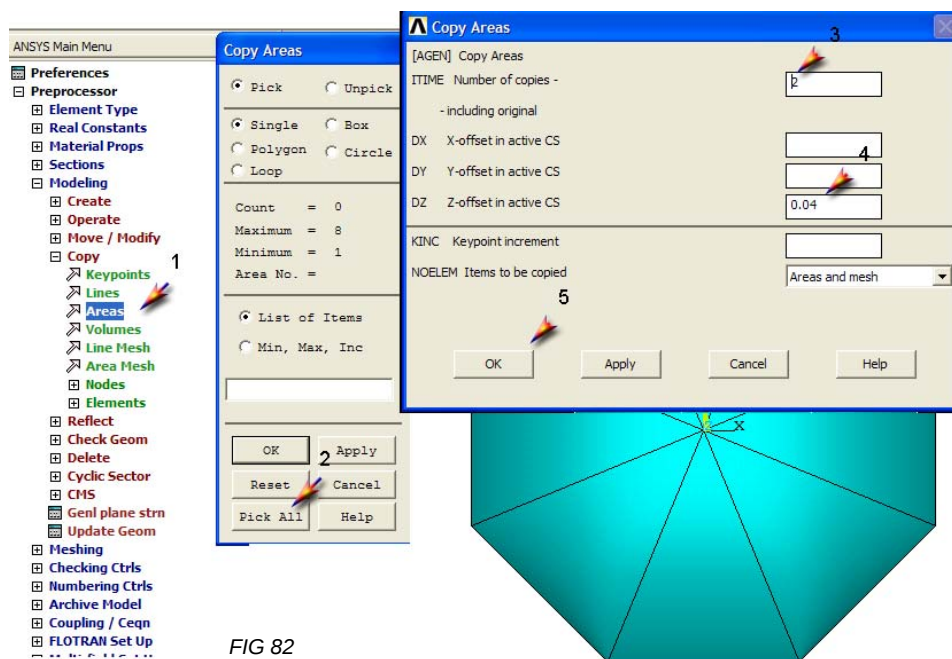


FIG 82

Un cop fet aquest pas, es creen les vuit àrees que tancaran el perímetre de la base que ha quedat obert en duplicar la volta:

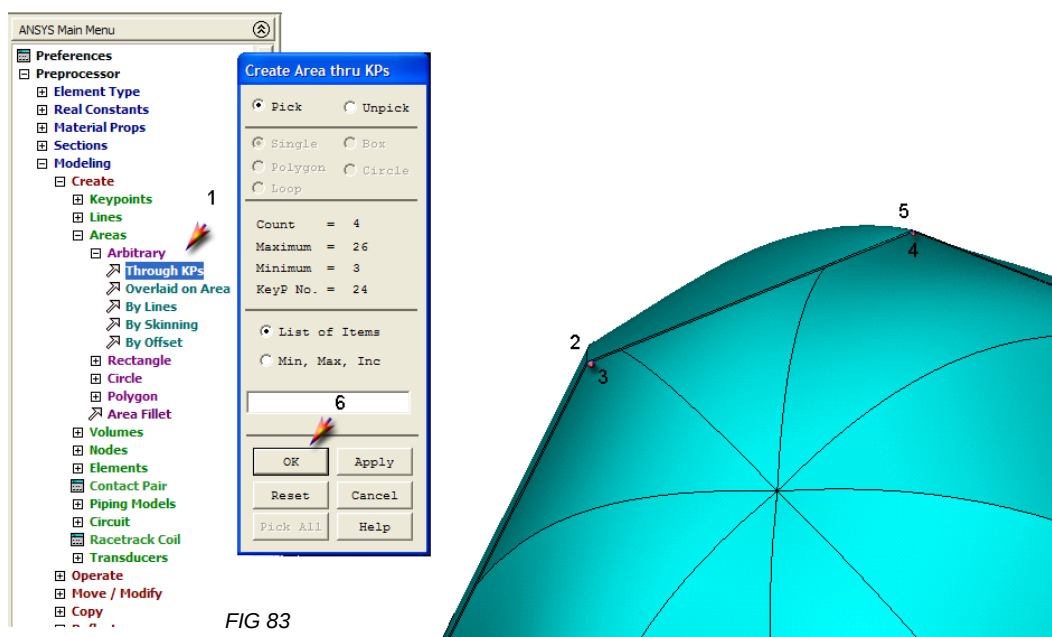


FIG 83

Finalment, s'estableix que les àrees creades formen un volum:

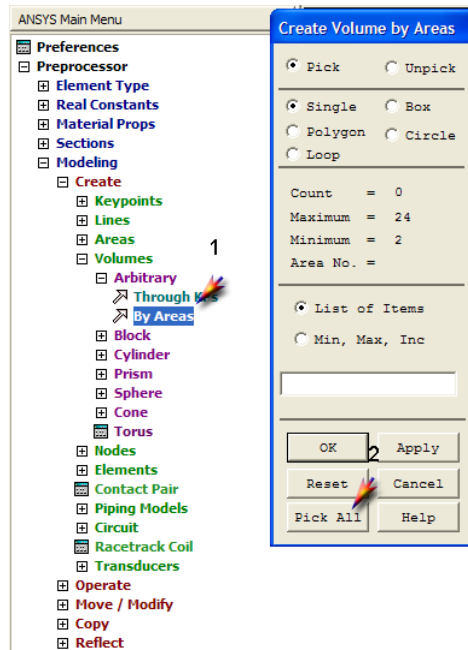


FIG 84

6.1.5. Mallat

Es realitza el mallat a partir de la opció *MeshTool*. En aquest cas només caldrà discretitzar el volum i una de les línies de la base, per tal de dividir el gruix de la volta en cinc parts.

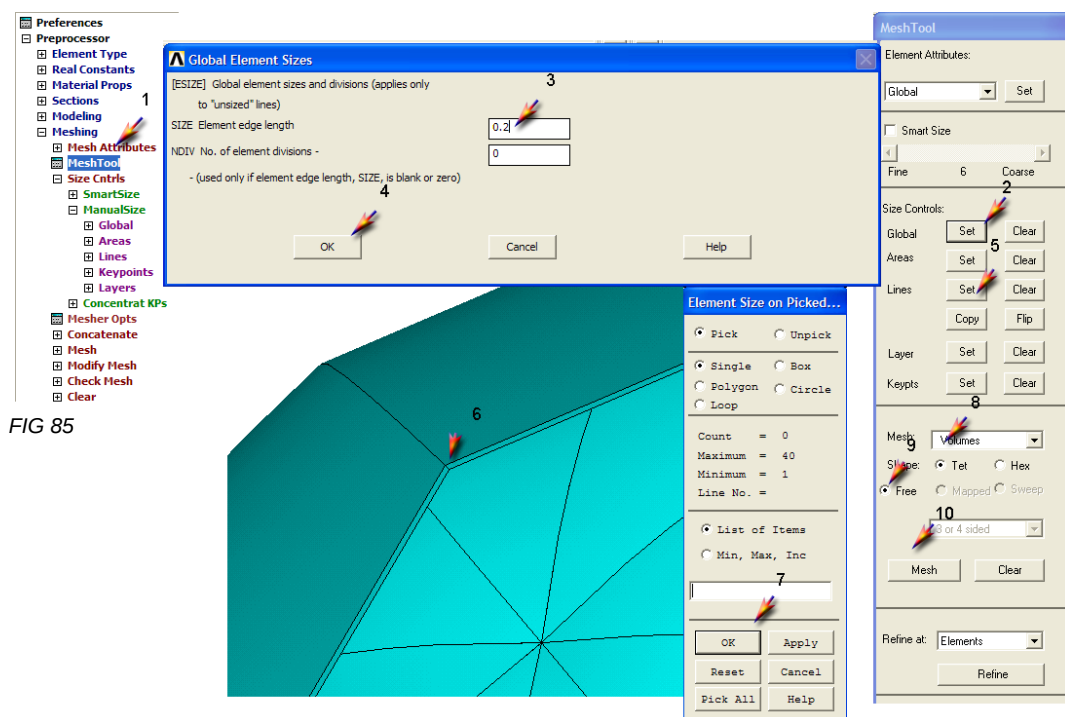


FIG 85

D'aquesta manera s'obté el següent volum mallat, que conformarà la geometria de la cúpula. Cal remarcar que el mallat realitzat és molt dens, però necessari per evitar complicacions quan s'usa una geometria més complexa.

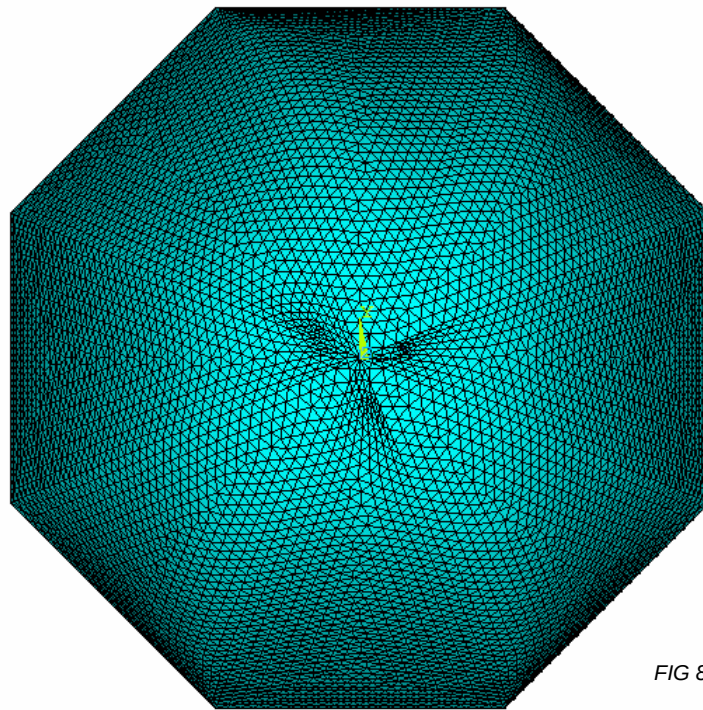


FIG 86: Mallat obtingut.

6.2. DEFINICIÓ DE LES CONDICIONS DE CONTORN

Per a la realització d'aquest anàlisi s'inicia el segon processador de l'ANSYS, el *solve*. En primer lloc s'ha d'elegir el tipus d'anàlisi que es vol realitzar, marcant la opció *structural* dins el menú *solution>analysis type*. En segon lloc, es bloquegen les línies que formen la base octogonal interior, en l'eix Z.

Posteriorment s'aplica la gravetat en l'eix Z, de $9,8 \text{ m/s}^2$. És imprescindible aplicar considerar la gravetat si es vol que el programa reconegui el pes propi. Es pot determinar aquest pes propi de forma manual i d'aquesta manera comprovar posteriorment que els resultats que proporciona l'ANSYS són fiables. Es pren com a densitat 1200 kg/m^3 , i com a dimensions reals de la volta una àrea aproximada de 100 m^2 :

$$\text{Àrea semiesfera: } 2 \times \pi \times r^2 = 2 \times \pi \times 4^2 = 100 \text{ m}^2$$

$$\text{Pes propi} = 100 \text{ m}^2 \times 1200 \times 0.04 = 4800 \text{ kg}$$

Si un kg equival a 9,8 N, 4800 kg equivalen a 47040 N.

Per calcular la càrrega a aplicar s'ha partit de que el pes que es transmetia era de 2,41 Kn/m²¹¹, obtenint una carga total de 241000 N.

En aquest cas, per tant, s'ha recorregut a un mallat lliure i conseqüentment no s'han controlat les divisions fetes en el model. Degut a aquest fet, s'ha cregut més oportú realitzar una aplicació de càrregues de forma uniforme en tota la superfície, tal i com es mostra a continuació:

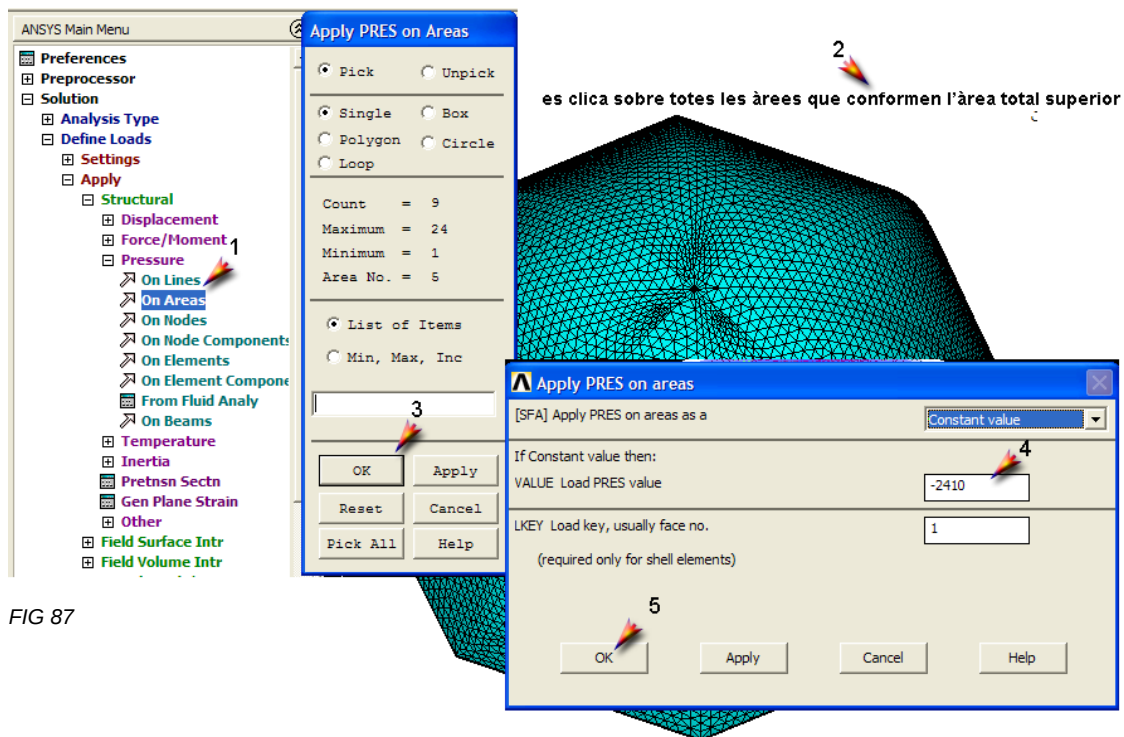


FIG 87

¹¹ Aquesta, ha estat calculada en l'apartat de introducció tècnica.

6.3. LECTURA DE RESULTATS

6.3.1. Deformada

La deformada obtinguda amb el model realitzat és mínima, i pràcticament no s'aprecia en els gràfics. El valor resultant és de 0,001 metres, equivalents a 1 mil·límetre. La forma de deformació, en que la volta pateix una disminució general de volum es manté, tot i que en aquest cas quasi no s'obre cap els laterals en la base.

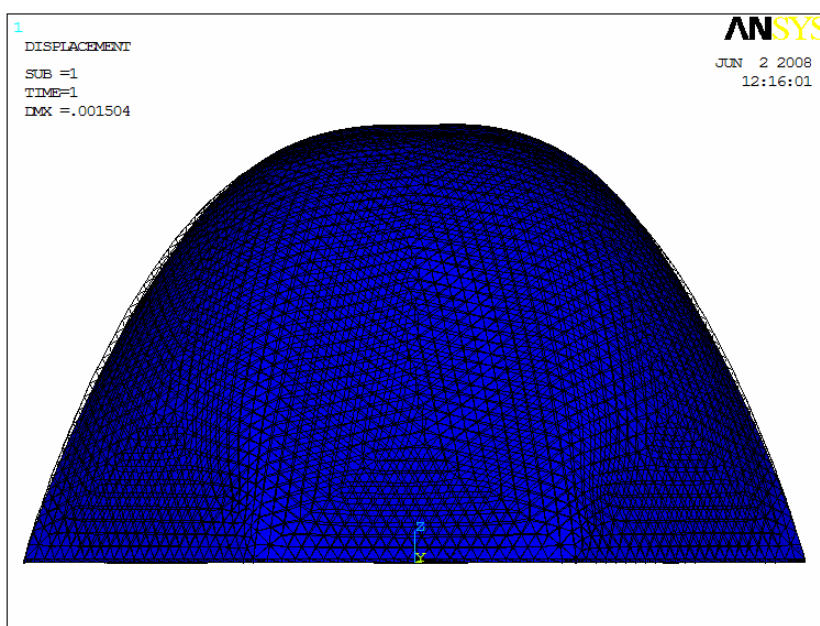


FIG 88: Deformada de la cúpula amb element SOLID 45.

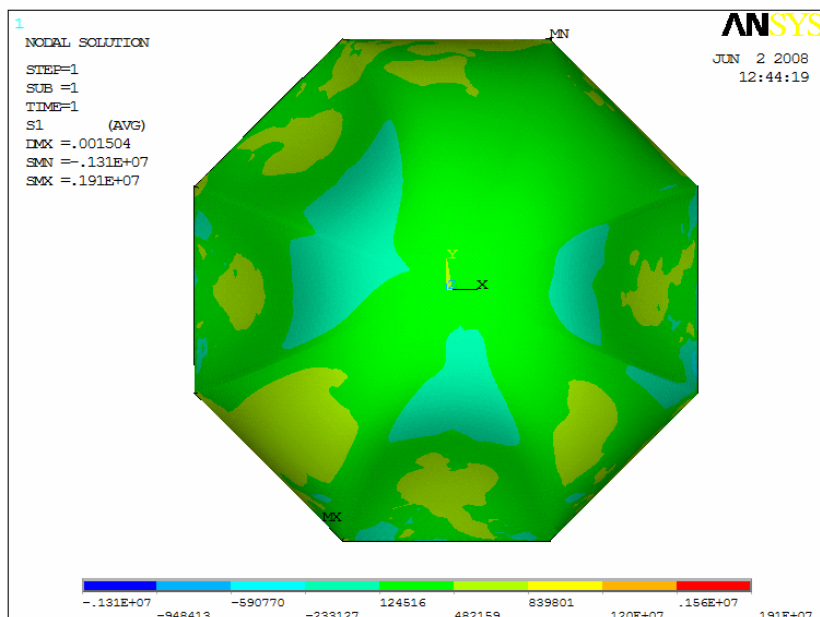
6.3.2. Reaccions

Ja que aquest model té múltiples punts de recolzament, en aquest cas tan sols es mostren els valors totals resultants. Cal recordar que tan sols s'ha fixat l'eix Z i per tant, l'únic valor diferent a 0 serà la reacció en aquest eix:

NODE	FX	FY	FZ	MX	MY	MZ
	0.0000	0.0000	0.28023E+06	0.0000	0.0000	0.0000

S'obté un total de 280230 N, un valor molt pròxim al calculat manualment, 288040 N, procedent de la suma del pes propi i les cargues aplicades, 47040 i 241000 N. En aquest cas la diferència de resultats és menor, 7,81 Kn.

6.3.3. Tensions



Aquest model és millorable i tan sols s'ha realitzat per demostrar que treballant amb elements *solid 45* els resultats de les tensions s'ajusten més als valors reals de treball de la ceràmica. En aquest cas, els valors a compressió han augmentat considerablement i arriben a 1,31 MPa. Per tant s'aproximen més als obtinguts amb la volta de quatre punts en base *solid 45*.

Les forces a tracció més altes es concentren en els recolzaments, per la cara interior i arriben a valors de 1,91 MPa. En canvi, les de compressió es concentren també en els recolzaments, però a la cara exterior.

7. INTRODUCCIÓ A L'ANÀLISI NO LINEAL

L'anàlisi que es durà a terme a continuació té en compte la no linealitat del material, és a dir que la relació entre tensió i deformació, a mesura que la primera creix, no es manté constant. Aquest anàlisi, degut a la seva complexitat, tan sols s'ha realitzat amb la volta de quatre punts.

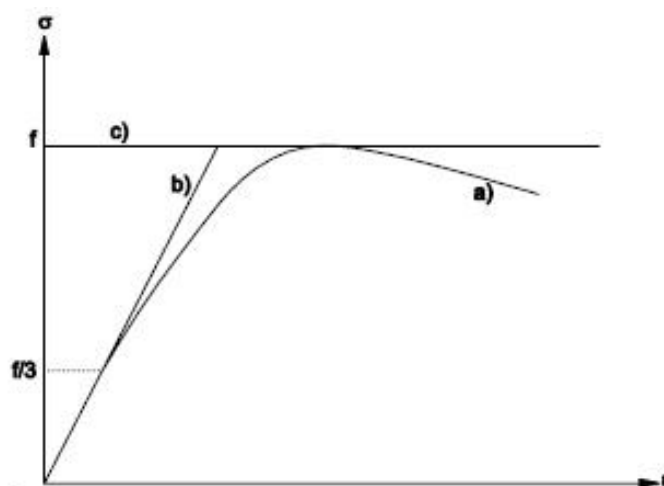


FIG 90: Diagrama tensió - deformació de la fàbrica. Per al càlcul estàtic no lineal es suposa el comportament del diagrama "a".

Si bé en la majoria de casos l'anàlisi lineal és suficient, en determinades ocasions és necessari un anàlisi més detallat que valori un comportament més ajustat a les propietats intrínseques del material o que contempli la influència de les deformacions de l'estructura.

Les estructures d'obra de fàbrica estan constituïdes per elements ceràmics o petris adherits mitjançant capes de morters o similars. No obstant això, una de les metodologies per a la seva modelització es basa en considerar el comportament del conjunt com un material homogeni amb unes propietats que deriven de la dels seus constituents. El comportament de l'obra de fàbrica és clarament no lineal, amb plastificació per compressió i fissuració per tracció.¹²

En aquest PFC les autores han realitzat nombroses proves amb diferents elements i composicions, moltes d'elles sense resultat òptim.

Per tant, a continuació s'exposarà l'anàlisi no lineal amb el que s'ha arribat a aconseguir un resultat més ajustat al comportament real de les voltes ceràmiques de quatre punts.

¹² Cal remarcar que és un comportament no lineal degut al material, que no es capaç de seguir la llei de Hooke (tensió – deformació); en cap cas es considera no linealitat deguda a la geometria de la volta.

8. ANÀLISI ESTÀTIC NO - LINEAL DE LA VOLTA – SOLID 45

Com ja s'ha introduït, l'anàlisi no lineal és un estudi molt complex. Tot i així, s'ha aconseguit realitzar un model òptim utilitzant com a element el SOLID 45.

Com que la geometria i mallat és idèntica a la exposada en l'anàlisi lineal de la volta amb elements SOLID 45, tan sols s'exposaran aquells apartats que siguin diferents.

8.1. CREACIÓ DEL MODEL – PREPROCESSOR

El primer pas a fer un cop obert el programa i indicat el directori on guardaran els arxius que creïn, és activar el marcador *structural*.

8.1.1. Propietats del material

Per dur a terme l'anàlisi no lineal - elàstic, les propietats ha introduir són el mòdul de Young (E), el mòdul de Poisson (ν) i la densitat (d), que són 6000 MPa (valor a introduir en Pa), 0,3 i 1200 Kg/m³ respectivament, a més dels valors referents al límit a tracció i a compressió:

Límit a tracció: 0.6 MPa

Límit a compressió: 6 MPa

Aquests s'introdueixen de la forma com s'indica en la figura 91:

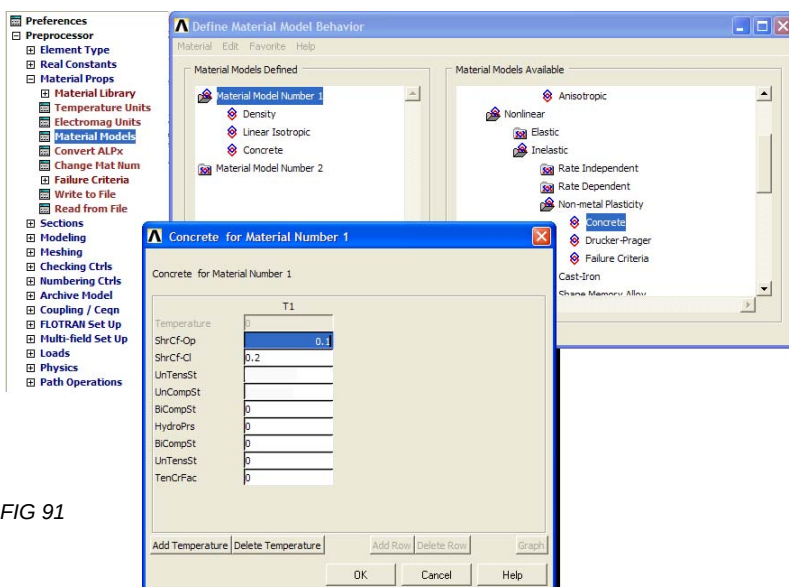


FIG 91



8.1.2. Constants reals

Al treballar amb elements *solid* no es requereix la introducció de constants reals.

8.1.3. Geometria

La geometria a introduir i el procediment per fer-ho, és idèntic al aplicat en l'anàlisi estàtic lineal de la volta de quatre punts amb *solid 45*, que queda recollit en l'apartat 4.1.4.

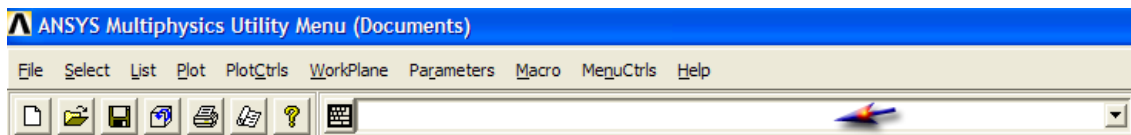
8.1.4. Mallat

El mallat a realitzar és el mateix descrit en l'apartat 4.1.5, ja que es treballa amb la mateixa geometria i procediment.

8.2. DEFINICIÓ DE LES CONDICIONS DE CONTORN - SOLVE

Les condicions de contorn, amb la pretensió de respectar al màxim possible les condicions reals en que es troba la volta, seran les mateixes definides en l'anàlisi lineal de la volta amb element *SOLID 45*.

Tanmateix, caldrà afegir que en aquest anàlisi es contemplaran les no linealitats geomètriques. Per tant, s'hauran d'introduir en la barra d'entrada d'ordres, les indicacions que s'exposen a continuació:



```
NLGEOM, ON  
SOLCONTROL, OFF  
NSUBST, 100  
OUTRES, ALL, ALL  
/STATUS, SOLU
```

FIG 92

Finalment, s'executarà la opció *solve* i l'ANSYS buscarà una solució. És un procés lent ja que en ordinadors d'ús domèstic sol durar unes 3h, durant les quals el programa mostrarà les indicacions de com es va desenvolupant el problema a través de la finestra *output window*.

Aquesta finestra és com la que es mostra en la figura 93. El valor *time* va avançant a mesura que es va acostant a la solució del problema, quan la finestra mostri que el programa està a punt d'arribar a 1, el problema estarà quasi resol.

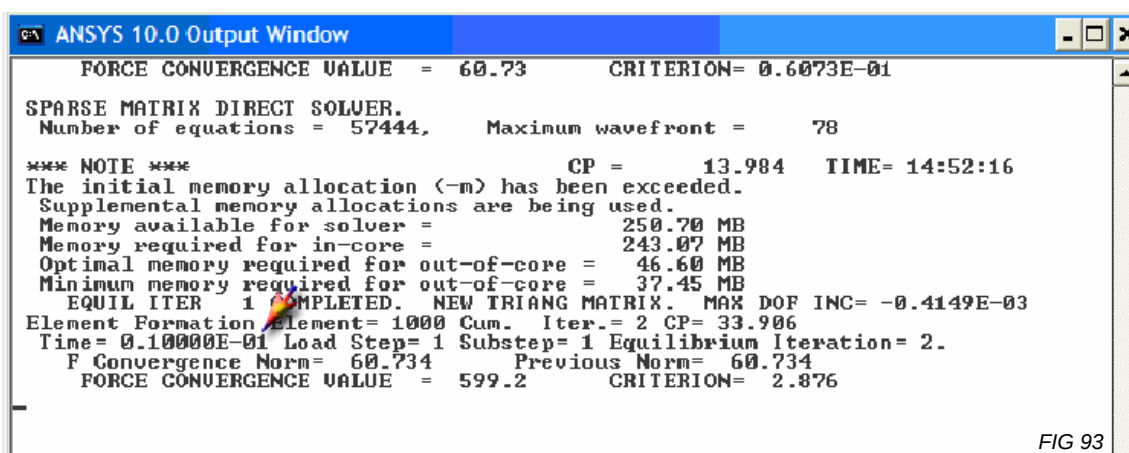


FIG 93

Si el problema té solució, finalment apareixerà una finestra on es podrà llegir: *Solution is done*. A més, el programa mostrarà un gràfic com el de la figura 94:

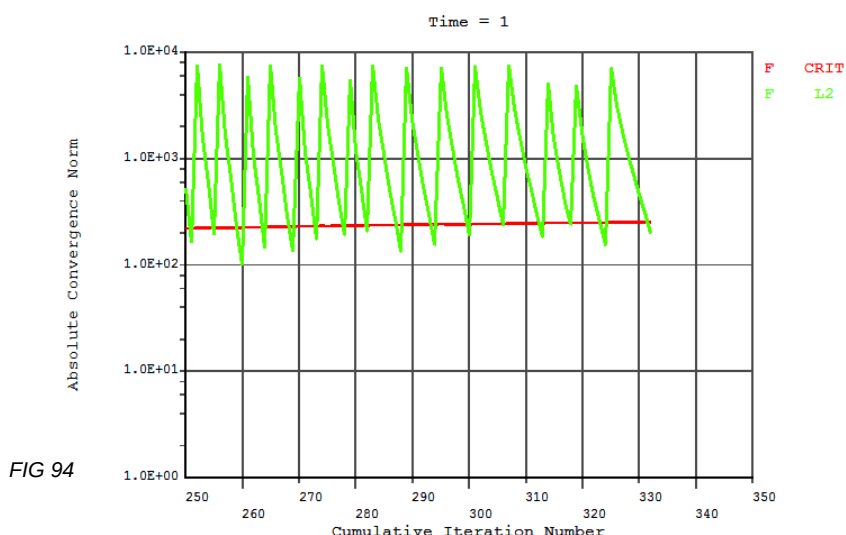


FIG 94

En aquest gràfic l'ANSYS reflexa les iteracions que ha fet fins a arribar a la convergència, és a dir, a la solució del problema. Cal remarcar que en aquest cas sí és molt important l'elecció del mòdul de Young i dels límits a tracció i a compressió, ja que

quan més alt és aquest, més facilitat tindrà el programa a convergir, degut a que haurà de realitzar menys redistribucions d'esforços i conseqüentment la deformació serà menor. A continuació es mostra una iteració per a mòdul de Young 15000 MPa, al ser un mòdul de Young més alt que el mostrat en la figura 93, la convergència és més uniforme.

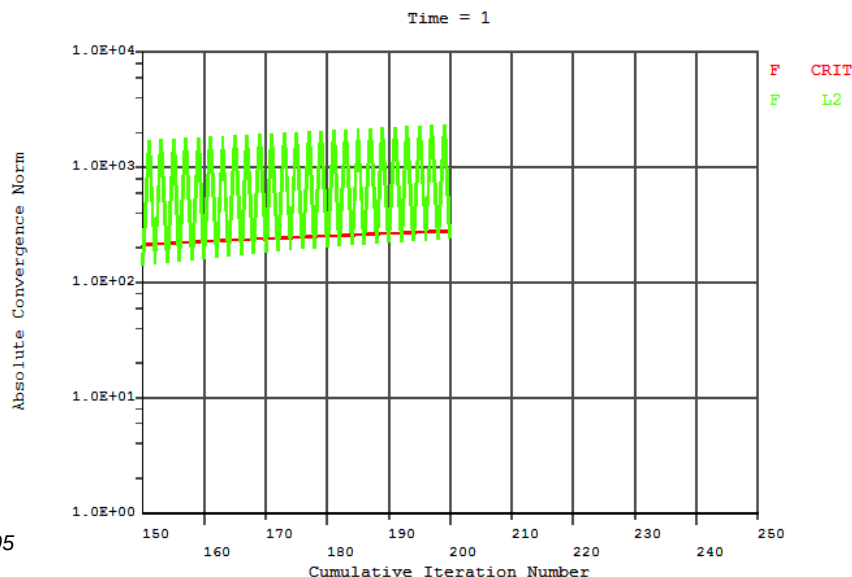


FIG 95

8.3. LECTURA DE RESULTATS – POSTPROCESSOR

En les anàlisis no lineals, l'ANSYS permet observar l'evolució de la redistribució de càrregues. Per tal de poder accedir-hi caldrà fer-ho de la següent forma:

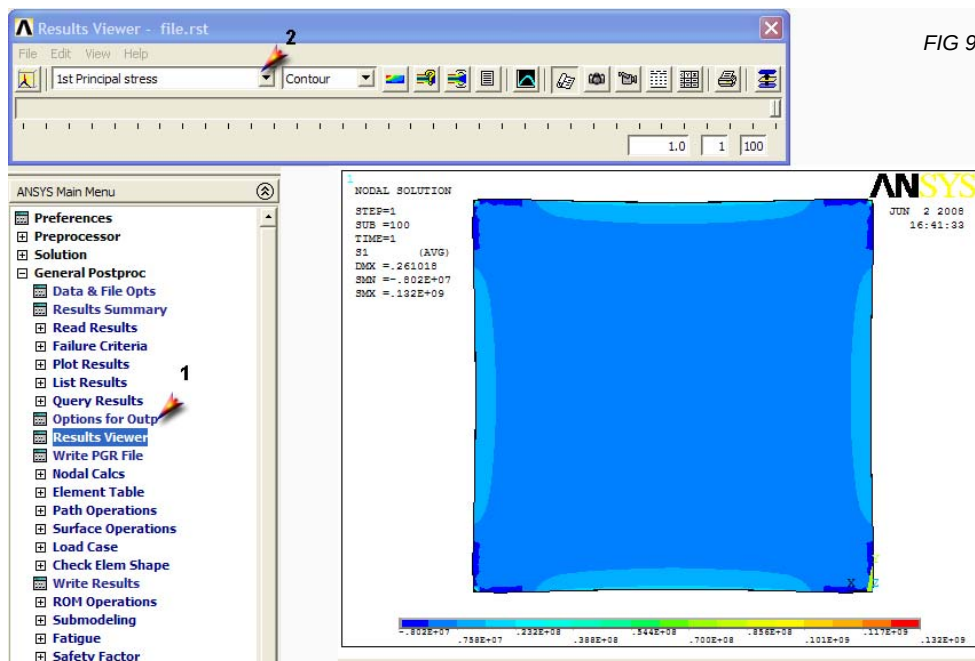


FIG 96

8.3.1. Deformada

La deformada de la volta és el canvi més significatiu produït en l'anàlisi no lineal respecte al lineal.

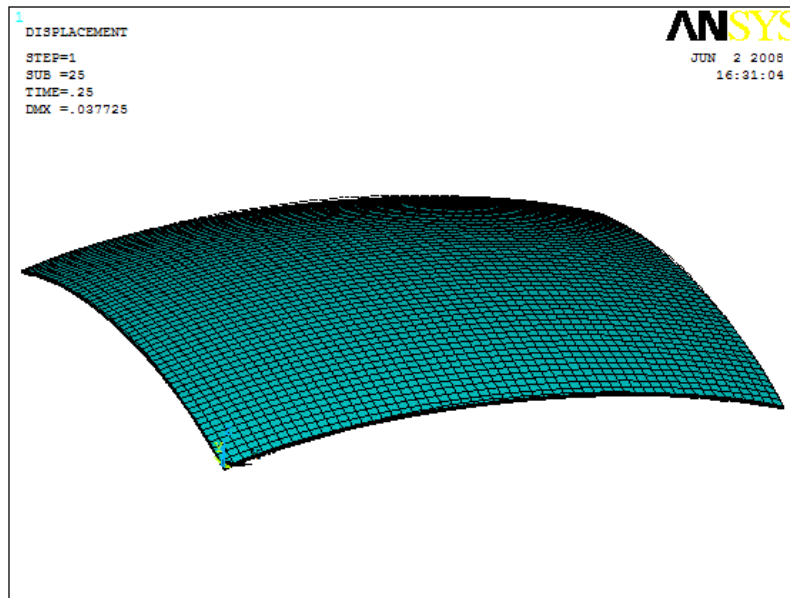


FIG 97: Es mostra el SUB 25, que presenta una deformada de 0,0377 metres.

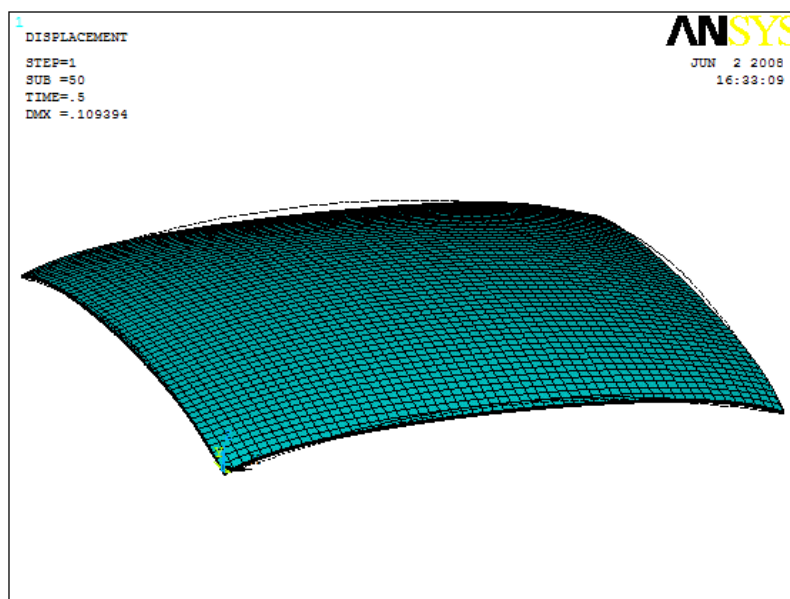


FIG 98: Es mostra el SUB 50, que presenta una deformada de 0,1093 metres.

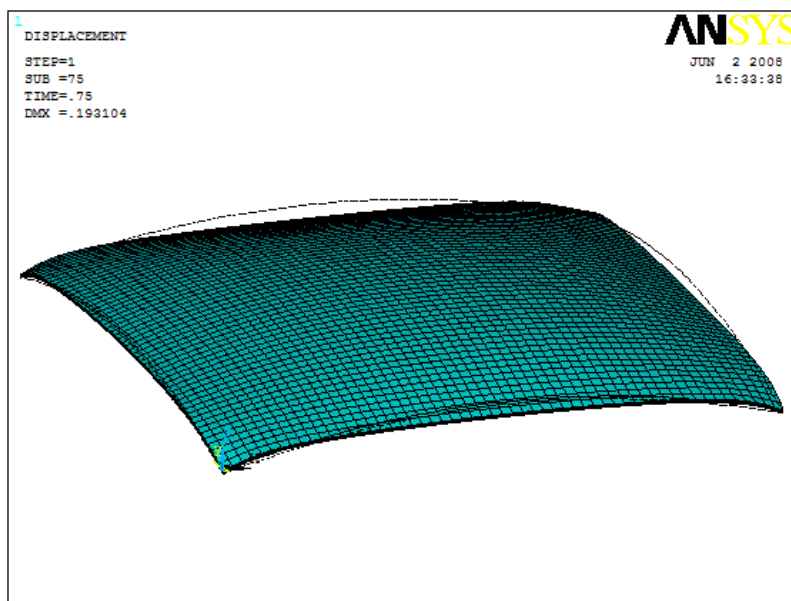


FIG 99: Es mostra el SUB 75, que presenta una deformada de 0,1931 metres.

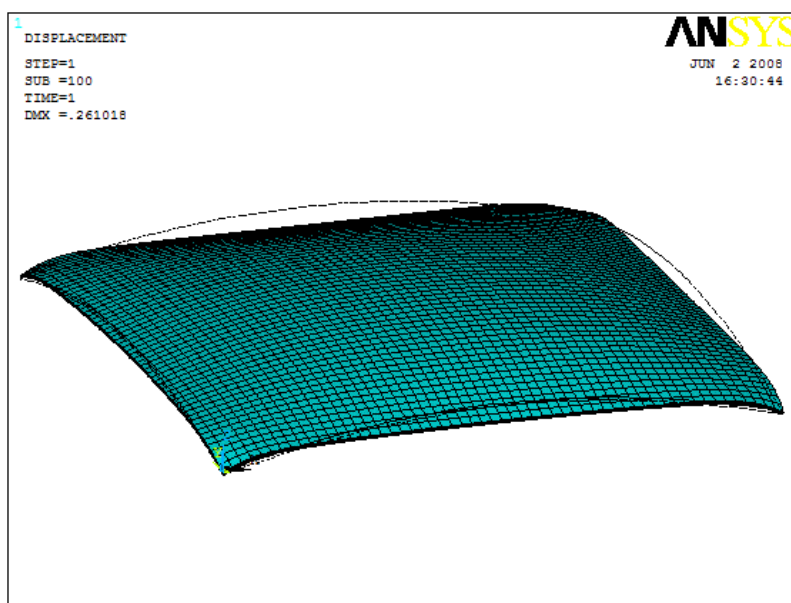


FIG 100: Es mostra el SUB 100, que presenta una deformada de 0,2610 metres.

Com es veu la deformació no és tant evident a simple vista. Com a resultat final es conclou que la deformació és de 0,2610 m, equivalents a 26,1 cm. És una deformació superior a la dels anàlisis lineals; així que serà convenient que s'observi en quines zones s'arriba a un valor de deformació més alt. És una deformació força alta i estaria bé que en un futur anàlisi s'estudiés la influència de les parets en la restricció de la deformació, ja que en aquest cas no s'ha tingut en compte.

A continuació s'exposa la deformació per a l'eix Z, per analitzar els punts que pateixen major deformació. Les zones de color blau fosc són les que arriben a patir major deformació i ho fan amb la mateixa direcció que la força de la gravetat. En canvi, els punts que es deformen més en direcció contrària són els situats en les zones de color vermell.

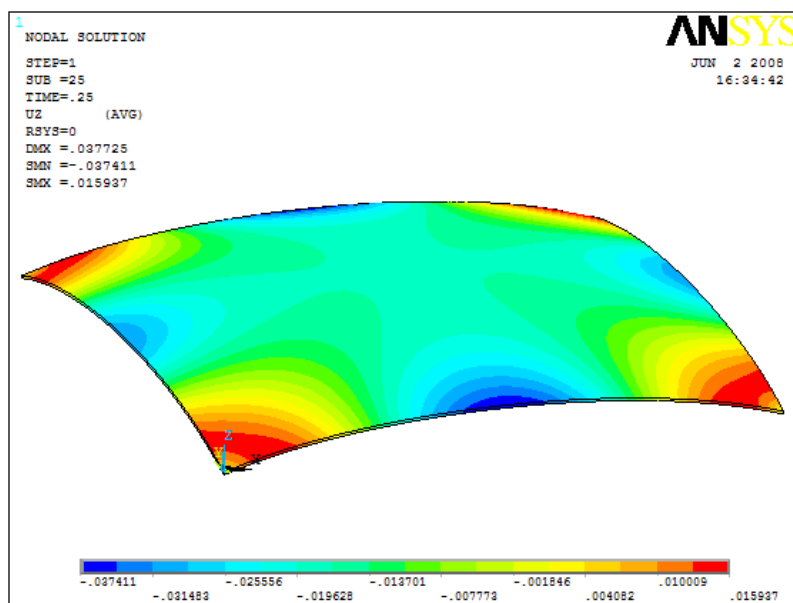


FIG 101: Es mostra el SUB 25, Amb unes deformacions de SMN: -0,0377 m i SMX: 0,0159 m.

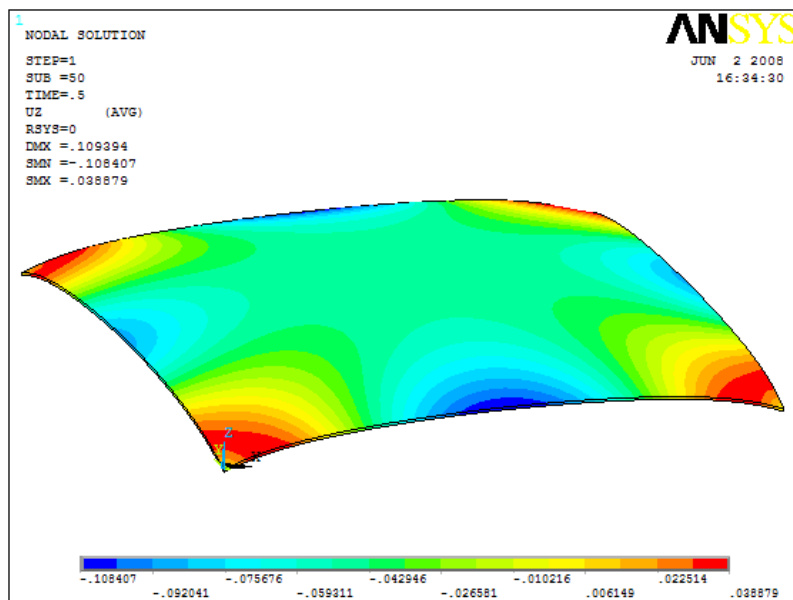


FIG 102: Es mostra el SUB 50, Amb unes deformacions de SM: -0,1084 m i SMX 0,0388 m.

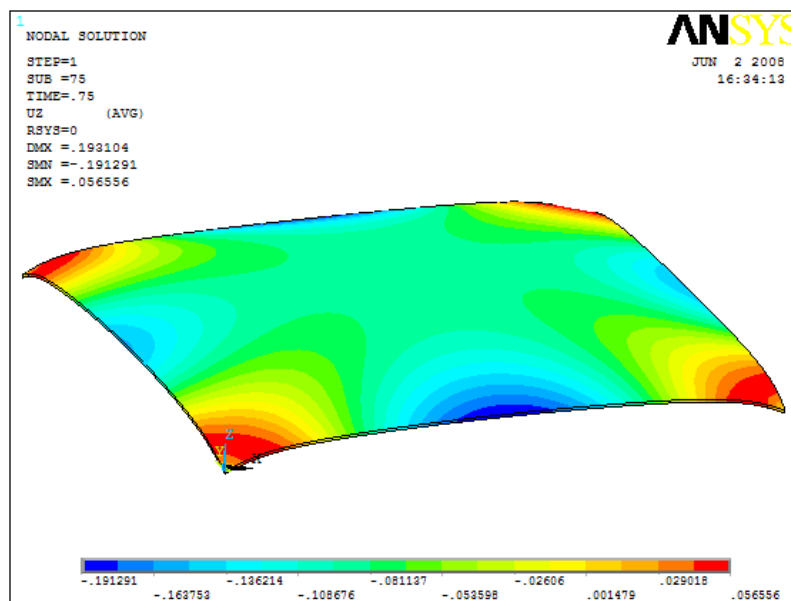


FIG 103: Es mostra el SUB 75, Que presenta una deformació de SMN -0,1912 m i SMX 0.0565 m.

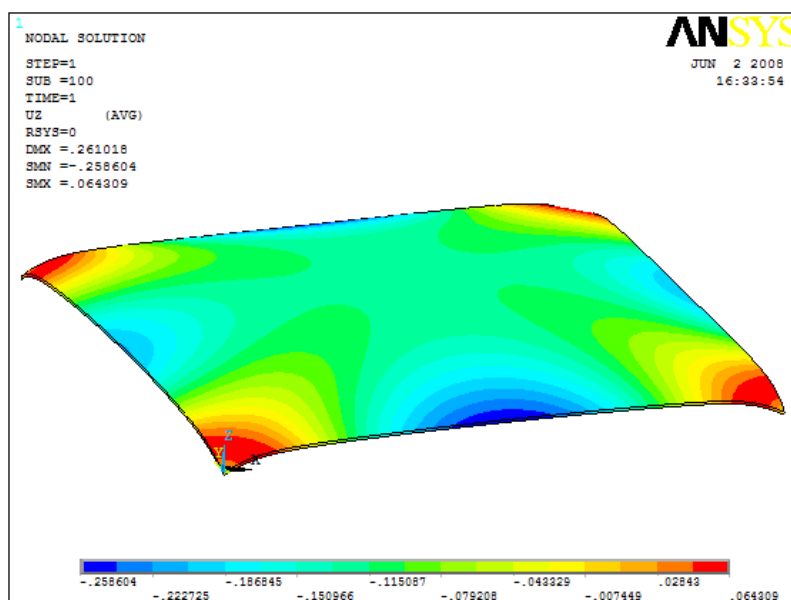


FIG 104: Es mostra el SUB 100, que presenta una deformació de SMN -0,2586 m i SMX 0,0643 m.

Pel que es pot observar en la sèrie d'imatges, la deformació evoluciona de forma uniforme en tota la volta. Les zones que acusen més la càrrega són els punts centrals dels costats, de color blau fosc, que es desplacen cap "a baix", és normal que succeeixi així ja que són els punts més llunyans als recolzaments. En direcció contrària, les zones que pateixen major deformació "cap a munt" són les representades amb el color vermell, aquestes àrees estan situades en els recolzaments i el valor resultant del desplaçament no es tan acusat, ja que és de 6 centímetres.

Per demostrar que amb mòduls d'elasticitat majors la deformació no es tan gran, es mostra la següent fotografia, que correspon a un EX de 15000 MPa.

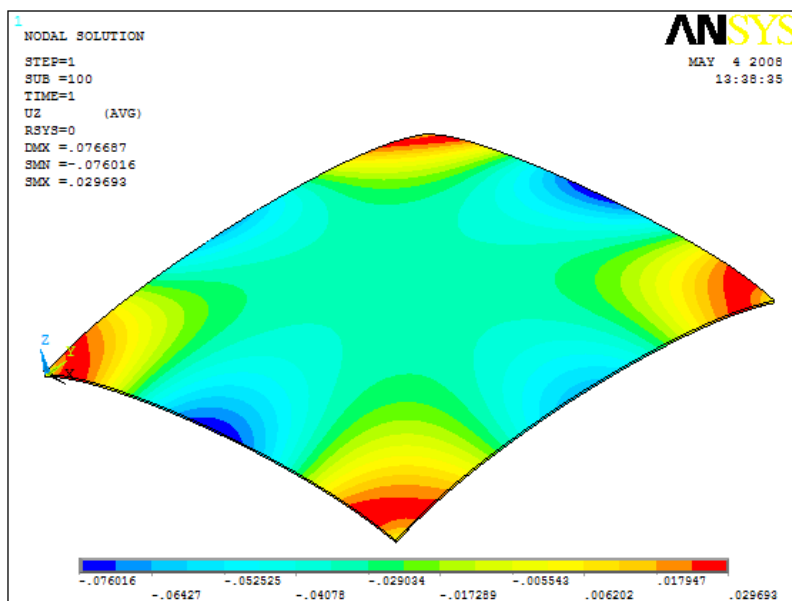


FIG 105: Es mostra el SUB 100 per a un mòdul de Young de 15000 MPa, obtenint una deformació de 7cm.

8.3.2. Reaccions

Les reaccions generades en la iteració 100 en els punts de recolzament són les següents:

LOAD STEP= 1 SUBSTEP= 100
TIME= 1.0000 LOAD CASE= 0

NODE	FX	FY	FZ
6433	99166.	85621.	48565.
6438	99166.	-85621.	48565.
6718	-99166.	-85621.	48565.
6993	-99166.	85621.	48565.

TOTAL VALUES

VALUE -0.20883E-04 -0.10840E-04 0.19426E+06

Per tant s'obté un valor molt aproximat al calculat manualment: 194260 N enfront 194848,71 N, procedent de la suma del pes propi i les cargues aplicades, 31820,87 i 163027,28 N, així que es pot afirmar que s'ha aconseguit un model vàlid per a l'anàlisi.

8.3.3. Tensions

Les tensions generades segueixen el següent desenvolupament:

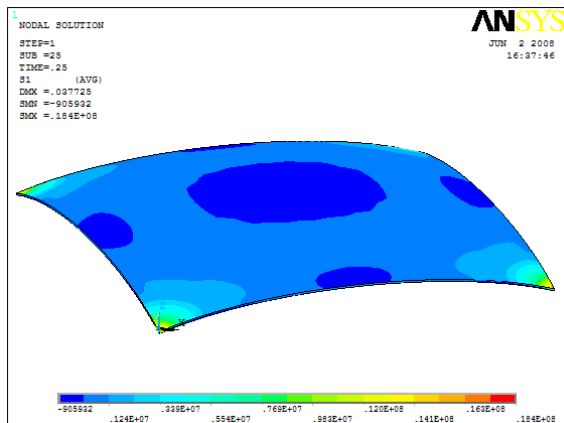


FIG 106: SUB 25, vista isomètrica cara superior.

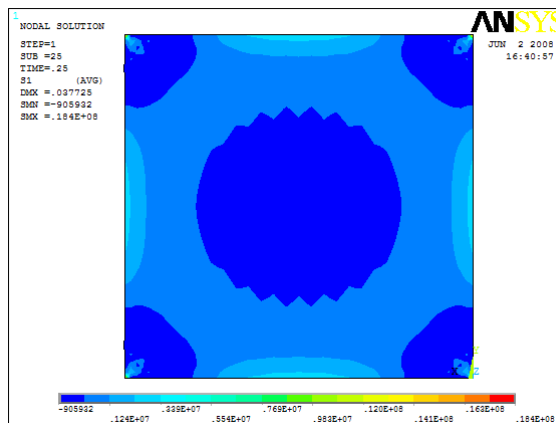


FIG 107: SUB 25, vista en planta cara inferior.

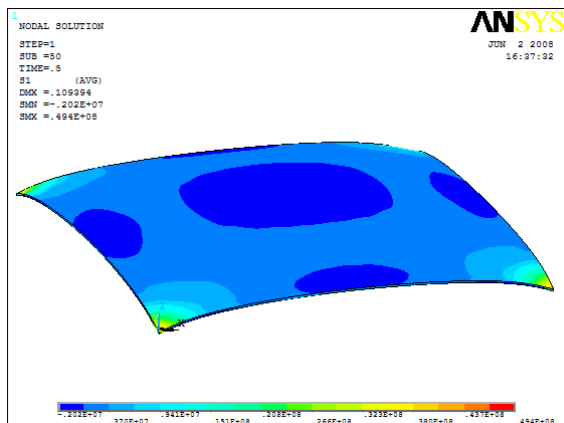


FIG 108: SUB 50, vista en planta cara superior.

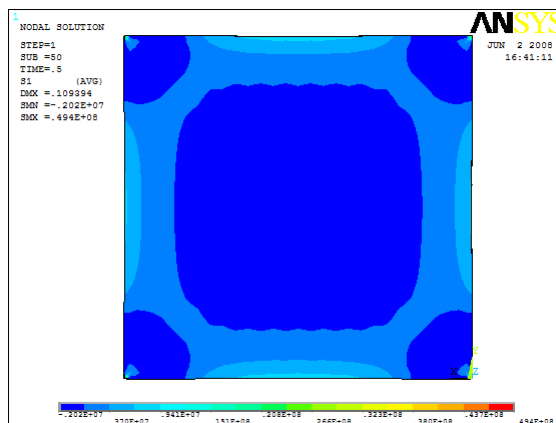


FIG 109: SUB 50, vista en planta cara inferior.

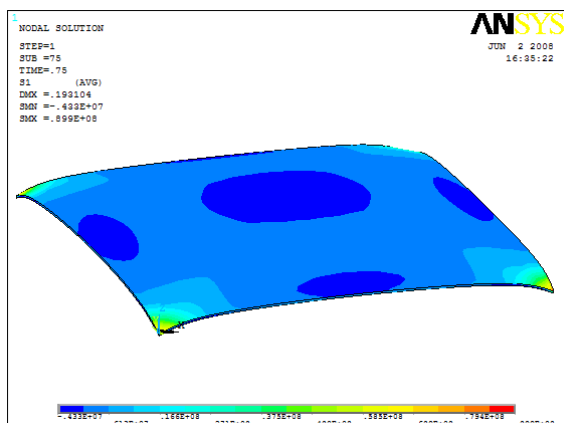


FIG 110: SUB 75, vista en planta cara superior.

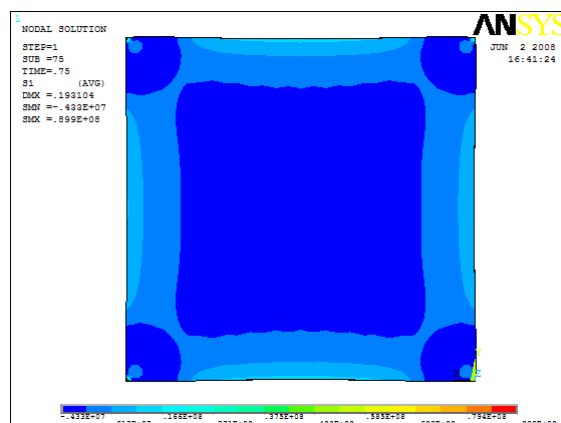


FIG 111: SUB 75, vista en planta cara inferior.

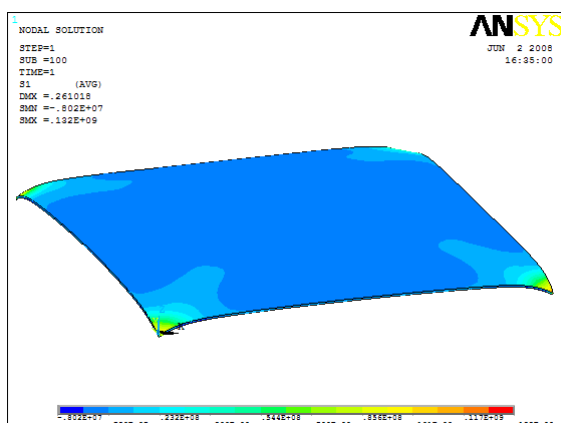


FIG 112: SUB 100, vista isomètrica cara superior.

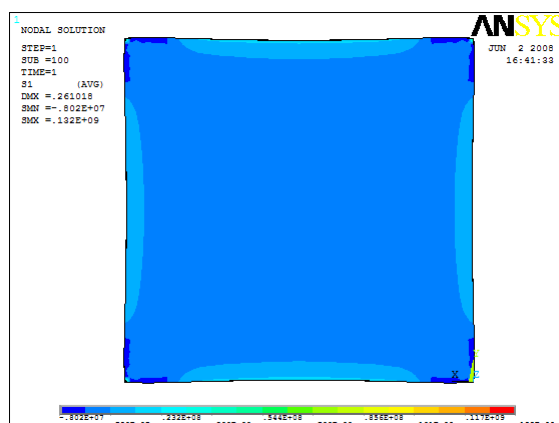


FIG 113: SUB 100, vista en planta cara inferior.

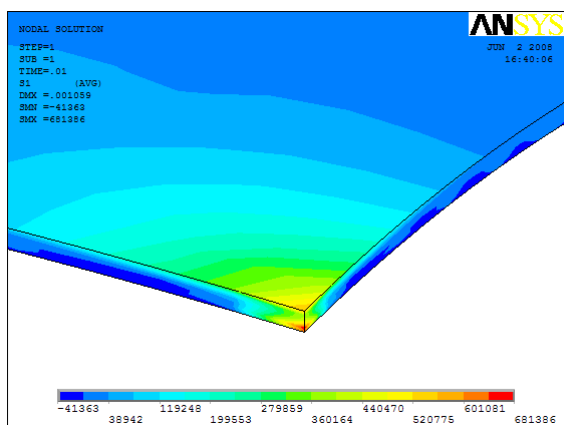


FIG 114: SUB 25, vista isomètrica cara superior cantonada.

- Si es comença la descripció per la primera seqüència, el substep 25, s'observa com la distribució de càrregues en la cara superior es caracteritza per concentrar les compressions màximes en els punts més llunyans als recolzaments; a mesura que les càrregues es redistribueixen cap als recolzaments les tensions a compressió perden força,

passen per una zona neutra, i acaben transformant-se en traccions. La cara inferior concentra les compressions en la zona central, i en punts pròxims als recolzaments, tot i que les traccions mínimes (blau clar) han quedat força repartides, tan sols arriben a valors alts just en el punt de recolzament. Els esforços més alts a compressió en aquesta iteració són de 0,041 Pa i 0,68 MPa a tracció.

- En el substep 50, la cara superior de la volta quasi no varia la seva distribució respecte l'anterior iteració esmentada; tanmateix, en la cara inferior, les zones a compressions màximes s'estenen més, degut a que s'augmenta la càrrega i la volta acusa una major deformació. Si s'observa la zona de recolzament es pot veure que el punt de tracció màxima comença a desplaçar-se de la cara inferior cap a la superior.

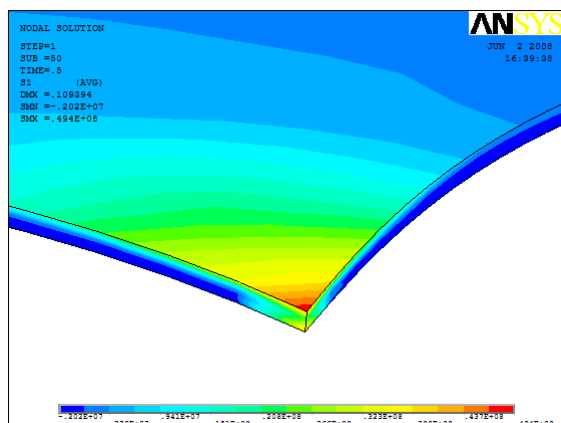


FIG 115: SUB 50, vista isomètrica cara superior cantonada.

Els valors màxims a compressió en aquesta iteració 50 són de 2,02 MPa i 49,4 MPa per a traccions. Per tant, es pot dir que en aquest punt la volta entra realment en càrrega ja que el salt de tensions produït és força gran.

Aquí es pot comprovar el primer error que es produiria en el model de volta creat, ja que s'acaben de superar els límits a tracció. Tot i que l'element *solid 45* no és capaç d'exemplificar el trencament i/o aixafament que es produiria degut a les seves característiques, es pot saber quins són aquests punts ja que l'ANSYS proporciona els nodes on es produeixen aquestes traccions màximes.

Per tant, els punts on es produiria el primer trencament serien els situats just a la meitat dels costats de la volta; com que aquesta és rectangular, el punt màxim es situaria en el centre del costat més llarg amb una deformació de 10 centímetres.

En la resta d'iteracions, els valors a compressió i a tracció continua augmentant, fins arribar als 123 MPa en les zones a compressió i a 8,02 MPa a tracció.

Aquest fet arriba a determinar que la volta, tal i com s'ha modelitzat, no suporta el pes de la coberta dimensionat i trenca durant la redistribució d'esforços.

Cal remarcar que tots els paràmetres considerats han estat el més aproximats possible a la realitat, però no existeix una base extensa de càlcul sobre la qual recolzar-se. Així que seria bo poder continuar l'estudi realitzant una anàlisi experimental prèvia que determinés, entre altres, les característiques mecàniques exactes dels maons i del morter utilitzat en la construcció de l'edifici.

9. ANÀLISI DE LA PATOLOGIA DEL PILAR

En aquest apartat es procedirà a una anàlisi molt diferent al que s'ha realitzat fins ara. En aquest cas es pretén simular de la patologia del pilar de pedra artificial que es dona de una forma generalitzada a tots els pilars d'aquest material que trobem a l'església, aquesta afectació ha quedat descrita en l'apartat de patologies.

La simulació del la qual es parla es durà a terme mitjançant el programa informàtic ANSYS, que mostrarà d'una manera gràfica i numèrica l'explicació del que succeeix.

9.1. CREACIÓ DEL MODEL DE PILAR

9.1.1. Elements tipus

L'elecció de l'element tipus determina com es discretitzarà la volta.

Dos dels factors més rellevants que influeixen en l'elecció de l'element tipus de mallat són la modelització de l'objecte en 2-D o 3-D, i els graus de llibertat desitjats segons el tipus de càlcul a realitzar.

D'aquesta manera, s'arriba a determinar l'element més adequat per aquesta anàlisi és el *solid 45*, un hexaedre compost per 8 nodes, de tres dimensions, i amb els graus de llibertat: UX, UY, UZ.

Figure 45.1 SOLID45 Geometry

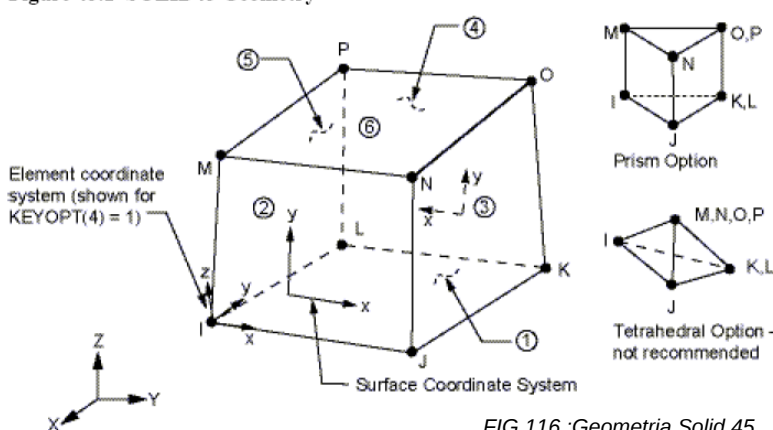


FIG 116 :Geometria Solid 45.

A més, quan s'arriba a l'opció de mallat, el programa permet elegir si es vol que l'element sòlid adopti forma de tetraedre o de prisma; en aquest cas s'escull la de tetraedre.

9.1.2. Propietats del material

Aquestes depenen del tipus d'anàlisi que es vulgui realitzar i de les propietats intrínseques del material que compona l'element a estudiar. Per dur a terme l'anàlisi estructural – lineal – elàstic d'aquest pilar, les propietats a introduir són el mòdul de Young (E), el mòdul de Poisson (ν) i la densitat (d), que són 23000 MPa (valor a introduir en Pa), 0,3 i 2400 Kg/m³ respectivament.

Cal recordar que tot i que el pilar té un recobriment exterior de pedra artificial, la seva part interna està formada per una secció circular d'uns 33 cm de diàmetre, que és sobre la qual es realitza l'anàlisi.

9.1.3. Constants reals

Per al cas de sòlids no es requereix introduir cap valor referent a les constants reals.

9.1.4. Geometria

Per tal de modelitzar el pilar es farà directament amb les opcions de crear volum amb forma de cilindre, ja que si el model ho permet, és una forma molt més senzilla i s'evita haver de situar keypoints, crear línies, àrees...

Per crear el cilindre s'introdueix a l'ANSYS una longitud de 5 metres i un radi de 33 cm, que es corresponen amb les dimensions reals. El radi de 33 centímetres és el resultat de restar el gruix de la secció del recobriment de pedra artificial (3,5 cm) al diàmetre total que té exteriorment, 40 cm.

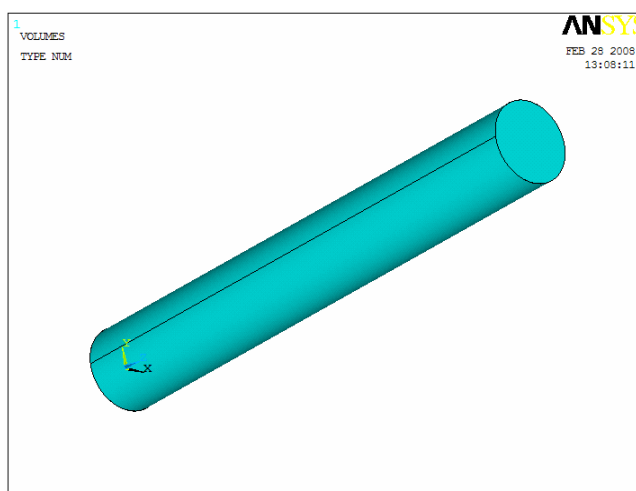


FIG 117: Geometria del pilar.

9.1.5. Mallat

Un cop s'obté el volum de l'element es procedeix a mallar-lo, obtenint la següent discretització:

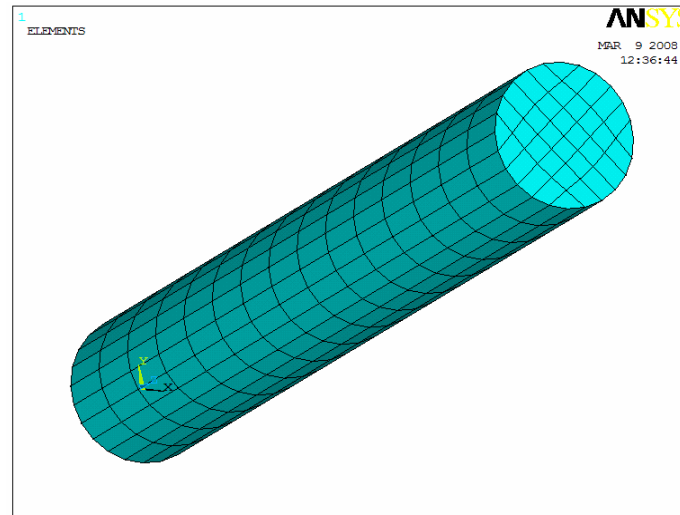


FIG 118: Geometria
mallada.

9.2. ANÀLISI AMB CÀRREGA CENTRADA

La pretensió d'aquest anàlisi és arribar a demostrar que la patologia produïda té com a origen la desviació del punt de transmissió de càrregues, que hauria d'estar situat sobre l'eix longitudinal del pilar. Per tant es començarà fent l'anàlisi amb la situació ideal, que és la càrrega centrada.

9.2.1. Condicions de contorn

Per dur-lo a terme s'haurà d'aplicar les condicions de contorn que influeixen. La primera d'elles és la gravetat, que serà de $9,8 \text{ m/s}^2$. L'aplicació de la gravetat permetrà a l'ANSYS considerar el pes propi de l'element.

El pes propi es pot calcular de forma manual, sabent que té una alçada de 5 metres, un radi de 33 centímetres i una densitat de 2400 kg/m^3 :

$$\text{Pes propi} = 5,00 \times \pi \times r^2 \times 2400 = 4105,43 \text{ kg}$$

Si un kg equival a 9,8 N, 4150,43 kg equivalen a 40233,25 N.

A més del pes propi, s'haurà de fixar la base del pilar en l'eix Z i aplicar la càrrega puntual. S'ha fet un càlcul aproximat per tal d'aplicar un valor ajustat a la realitat: si es considera que aquest rebrà una tensió d'uns 8 kg/cm^2 en el cap superior, i disposa d'una base de recolzament de $\pi \times r^2$, s'obté:

$$8,00 \text{ kg/cm}^2 \times \pi \times r^2 = 27300 \text{ kg}$$

Si un kg equival a 9,8 N, 27300 kg equivalen a 267540 N.

S'introdueix a l'ANSYS la càrrega centrada, el resultat de totes aquestes condicions es pot observar en la figura següent:

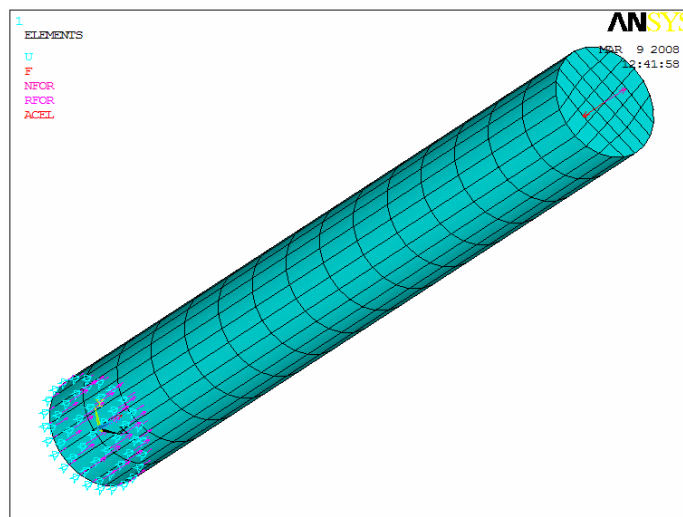


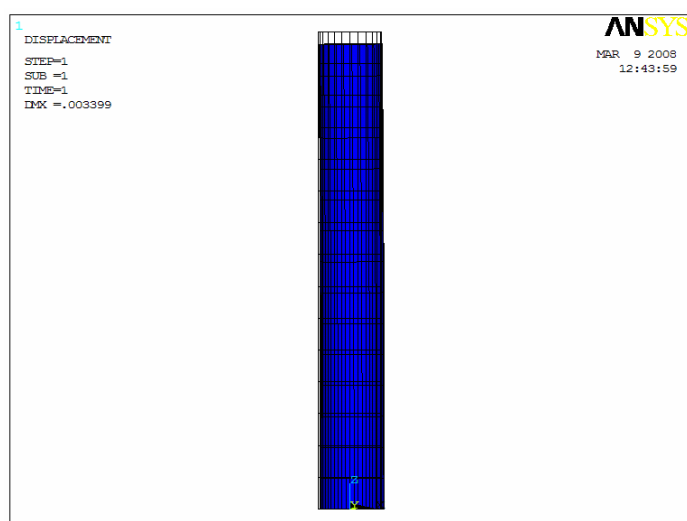
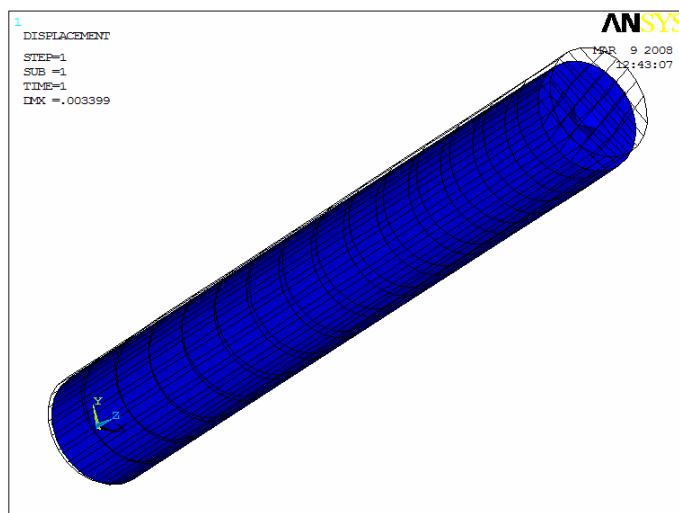
FIG 119: Pilar amb condicions de contorn aplicades.

9.2.2. Lectura de resultats

a) Deformada

Tal i com es veu a la deformada, el pilar patiria un efecte de compressió que faria reduir-ne la seva longitud, però que en cap cas pandejaria. Pel que fa a l'àrea de la secció, aquesta ni augmentaria ni disminuiria.

L'ANSYS, a més, indica que per la càrrega aplicada i el pes propi descrit, es produiria una deformació de 3,399 mm.



b) Reaccions

Les reaccions serveixen tant per conèixer la magnitud dels esforços, com per verificar que el model ha estat realitzat adequadament, ja que es comprovarà que el resultat de les reaccions dels nodes situats a la base és igual a la suma de les pes propi i de la càrrega puntual aplicada. Per tant, el resultat proporcionat per l'ANSYS, coma suma dels valors de les reaccions dels nodes situats en la base, és de:

TOTAL VALUE 0.30732E+06

El valor mostrat, equival a 307320 N, força aproximat al càlcul manual, ja que la suma del pes propi, de 40233 N, i la càrrega puntual, de 267540 N, dóna com a resultat 307773 N, així que es pot afirmar que el model aconseguit és vàlid.

9.3. ANÀLISI AMB CÀRREGA DESCENTRADA

A continuació es procedirà a l'estudi del model amb la càrrega descentrada respecte l'eix longitudinal del pilar.

9.3.1. Condicions de contorn

Les condicions de contorn a aplicar són les mateixes que per al cas anterior. Però com que l'objectiu d'aquest anàlisi es demostrar que aplicant la càrrega descentrada el pilar pateix una deformació, caldrà que aquesta es desplaci de l'eix longitudinal del pilar, obtenint unes condicions de contorn com les que es mostren en la figura 122.

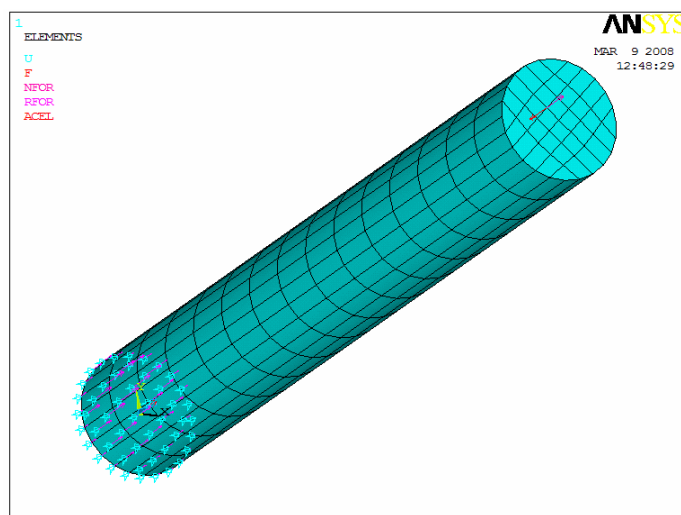


FIG 122: Pilar amb condicions de contorn aplicades.

9.3.2. Lectura de resultats

a) Deformada

En la figura 123 es pot comprovar com el model comença a flexionar a l'alçada del primer terç del pilar i conseqüentment es produeix un desplaçament horitzontal de l'extrem superior; així que es pot certificar que l'origen de les fissures que s'observen en el pilar és el que s'havia plantejat en l'apartat de patologies.

L'ANSYS, a més, indica que per la càrrega aplicada i el pes propi descrit, es produeix una deformació de 18,672 mm, molt superior al valor del model anterior.

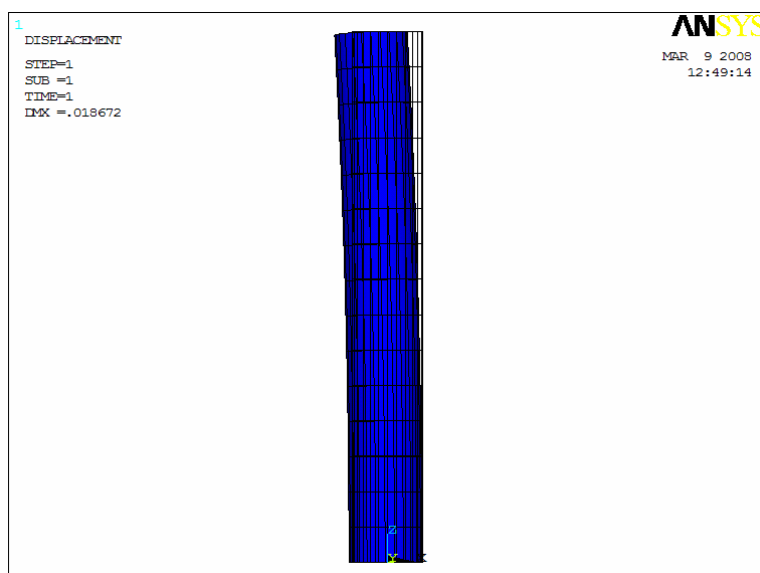


FIG 123: Pilar resultant, vista en alçat.

b) Reaccions

El valor de les reaccions que s'obté és el mateix que per al cas anterior, així que es pot afirmar que el model realitzat és correcte.

D. INTERPRETACIÓ DE RESULTATS

1. INTRODUCCIÓ

Per tal d'entendre tot els anàlisis desenvolupats, s'exposa la següent esquema a mode de recordatori:

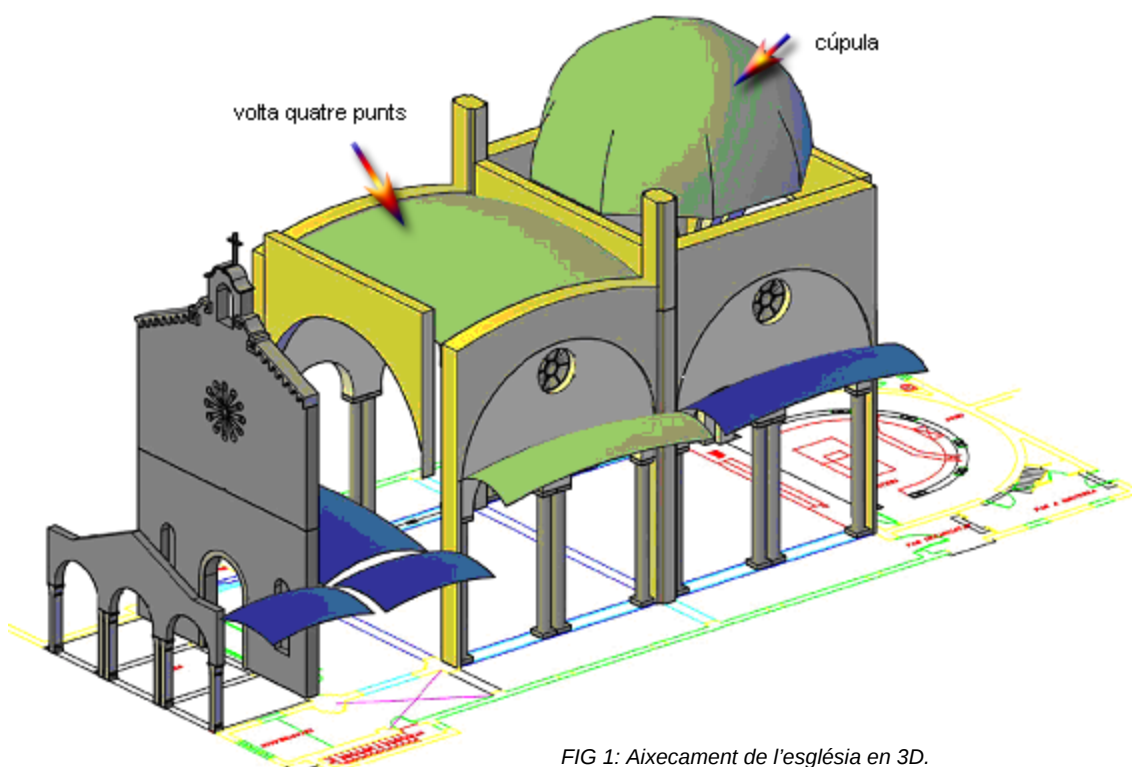


FIG 1: Aixecament de l'església en 3D.

VOLTA QUATRE PUNTS

- ANÀLISI LINEAL
 - SHELL 63
 - SOLID 45

ANÀLISI NO LINEAL

- SOLID 45

CÚPULA

- ANÀLISI LINEAL
 - SHELL 63
 - SOLID 45

PILAR DE PEDRA ARTIFICIAL

- ANÀLISI LINEAL SHELL 63
 - CÀRREGA CENTRADA
 - CÀRREGA DESCENTRADA

Els aspectes a analitzar són molts i molt variats i depenen del coneixement del lector poden ser difícils d'entendre, així que s'intentarà explicar els diferents resultats de la forma més bàsica possible.

Cal esmentar que degut a la manca d'experiència prèvia en l'ús de programes de càlcul de la tipologia de l'ANSYS, ha provocat que s'hagi hagut de partir d'una base de coneixement nul·la, que ha dificultat molt l'avanç de l'estudi i que en molts casos no ha permès arribar a resultats perfectes.

El treball dut a terme, a més, recull el procediment dut a terme amb la indicació dels diferents passos seguits amb la fi de facilitar al futur estudiant una base teòrica i practica de què és l'ANSYS i com es desenvolupa una anàlisi amb aquest programa.

2. TIPOLOGIA D'ELEMENT

2.1. MODELS SHELL

En un principi es va creure més oportú iniciar l'estudi partint de la modelització amb elements *shell*, ja que la pràctica habitual de l'estudi de voltes consisteix en fer un tractament lineal amb elements del tipus esmentat i introduint el gruix com a dada característica de l'element. A més, són més fàcils de modelitzar les diferents geometries. En contra, els resultats obtinguts amb aquesta composició *shell* no s'ajusten tant a la forma de treball real de les voltes. Per exemple, les forces de compressió obtingudes disten molt dels valors reals de treball. Aquest fet és degut a que tot i que en el càlcul s'ha introduït que la volta té un cert gruix, aquest no s'ha pogut mallar perquè no queda reflexat en la geometria i conseqüentment sorgeixen errors en la distribució d'esforços.

2.2. MODELS SOLID

Un cop es va comprovar que l'element *shell* no acabava d'ajustar-se a les tensions reals, es va optar per aplicar una modelització amb elements sòlids, que en un principi hauria de permetre obtenir resultats més satisfactoris.

Durant tot el procés s'ha intentat reflectir al màxim les condicions reals a les que estan sotmeses les dues voltes (tan la de quatre punts com la semiesfèrica), així que es van dimensionar les càrregues que suportaven i es va fer un anàlisi previ de la seva forma de treball.

El resultat final que proporciona el programa determina que segons la geometria introduïda i les condicions de contorn aplicades, la volta no arribaria a suportar tot el pes que descansa sobre ella.

Aquest resultat es dóna en totes les anàlisi. Tot i que en l'anàlisi lineal es normal que actuï així, es pretenia eradicar el problema amb el desenvolupament de l'anàlisi no lineal. Finalment s'ha comprovat que l'origen és degut a l'elecció de l'element amb que es treballa, el *solid 45*. Aquest element no és capaç de comportar-se de forma plàstica i redistribuir els esforços sense superar els límits imposats, tot i que permet la introducció d'aquests per determinar-ne la corba de deformació.

S'ha intentat desenvolupar el model amb l'ús de l'element *concrete 65*, que permet l'anàlisi de models amb consideració plàstics. Tanmateix, només s'ha arribat a desenvolupar el model amb càrregues molt menors a les que realment suporta, així que no s'ha considerat oportú introduir-lo en el projecte.

Arribat a aquest punt, es plantegen diverses causes que també poden ser l'origen d'aquesta dispersió de resultats:

- Que el dimensionat de càrregues, tot i haver-se ajustat al màxim a les característiques dels materials, sigui molt menor.
- Que les dues voltes, tan la de quatre punts com la semiesfèrica, s'ajudin d'algun altre element de treball aliè, i que com a tal, la volta de quatre punts deixi de treballar com a tal.
- Que els límits a tracció i a compressió de la fàbrica de ceràmica utilitzada siguin superiors als adoptats, fet que s'hauria de comprovar mitjançant un estudi experimental que permeti determinar-los.

3. TIPOLOGIA D'ANÀLISI

3.1. ANÀLISI LINEAL

Inicialment es va plantejar una anàlisi lineal, que permet reflectir de forma senzilla l'estat tensional, deformada...de l'element estudiat. Aquest és la tipologia més usada en els diferents estudis, ja que permet conèixer els esforços interns que actuen en l'element estructural envers les càrregues verticals aplicades i el pes propi considerat.

El model obtingut, per a elements sòlids, és més correcte que l'obtingut amb l'element *shell*. Permet veure la forma de treball de les voltes en tot el seu desenvolupament i els resultats s'ajusten més a la realitat. Tot i així, caldria considerar quin límit s'imposa a la ceràmica per tal de conèixer si la volta trencaria amb les càrregues aplicades. Si el límit proposat fos el mateix que per al càlcul no lineal, la volta es trencaria a tracció en els punts més dèbils, corresponents al centre dels laterals.

Un cop finalitzat l'estudi de les voltes amb la tipologia d'anàlisi lineal, es va creure oportú ampliar la dimensió de l'estudi i intentar resoldre una anàlisi no lineal per a la volta de quatre punts.

3.2. ANÀLISI NO LINEAL

En aquesta anàlisi es té en compte la no linealitat del material, és a dir, que la relació entre tensió i deformació, a mesura que la primera creix, no es manté constant. Si bé en la majoria de casos l'anàlisi lineal és suficient, el no lineal permet detallar millor el comportament de la geometria i del material segons les propietats intrínseques i, a més, permet contemplar la influència de les deformacions en l'estructura.

L'anàlisi permet estudiar l'evolució de la deformació i la redistribució de les càrregues per a la tipologia de la volta de quatre punts i comprovar que en contra del que es creu habitualment, la volta ceràmica és un element que treballa a flexió en gran part de la seva extensió.

4. TIPOLOGIA DE VOLTA

Pel que fa a la tipologia de volta, cal recordar que s'han escollit dos tipus de voltes diferents (la de quatre punts i la semiesfèrica) però amb moltes similituds entre elles; no només perquè es varen construir en el mateix moment dins el mateix edifici, sinó perquè les dues són voltes de maó de pla, una forma de treball molt característica de Catalunya.

Tot i que les cúpules resisteixen majors esforços, cal remarcar la seva inviabilitat per aplicar a qualsevol altre tipus de construcció, ja no només per la dificultat constructiva envers la resta de voltes, sinó per la gran dimensió que ocupen. És per aquest motiu que normalment la seva construcció es redueix només a esglésies, ja que s'han de salvar grans llums i alhora és un element que ajuda a remarcar la majestuositat de l'edifici.

5. PILAR PEDRA ARTIFICIAL

Pel que fa al pilar de pedra artificial, la descripció de la seva patologia queda recollida en l'apartat de patologies, dins el capítol 3; i l'exemplificació del que succeeix s'exposa en l'apartat de desenvolupament de càlcul, dins aquest mateix capítol 4.

5. CONCLUSIONS

Després de realitzar l'anàlisi estructural de voltes ceràmiques i patologies de l'església de Sant Narcís de Girona i ja per finalitzar el present projecte, es plasmaran aquelles conclusions que s'han pogut extreure de la seva realització.

Per a començar es pot dir que el barri de Sant Narcís és molt interessant d'analitzar ja que és una mostra viva d'una situació delicada que va patir l'estat espanyol durant la primera meitat del segle XX, alhora que permet estudiar com un conjunt de factors conduïren a l'aplicació de noves tècniques constructives basades en la senzillesa de l'execució i la disminució del cost del material.

Pel que fa a l'estudi centrat en l'església de Sant Narcís s'ha aconseguit explicar de forma escrita i grafiada els elements de que es compona i la funcionalitat d'aquests dins l'edifici. A més, s'han analitzat les diferents patologies que té l'edifici i s'ha arribat a determinar que la moltes d'elles són degudes a la deficiència de l'execució sumat a una falta de manteniment.

En la part estructural s'han concretat tots aquells paràmetres per dur a terme els diferents anàlisis que s'han acabat desenvolupant, i de tots aquests s'ha determinat que és el més òptim per al càlcul de la capacitat portant d'aquesta tipologia de voltes és el no lineal en base l'elecció del *solid 45* com a tipologia d'element per fer el mallat.

Finalment, com a idea general de tot el que s'ha après en aquest treball, es voldria destacar que moltes vegades la optimització de les estructures no eradica en grans desenvolupaments de noves fórmules i materials, si no que molts cops la solució es troba en la senzillesa de la geometria junt a la utilització de materials tradicionals.

6. BIBLIOGRAFIA

AJUNTAMENT DE GIRONA, 1983: Girona i els seus barris.

ARIZA MORENO, Pilar; SÁEZ PÉREZ, Andrés, 2004: *Método de los elementos finitos. Introducción a Ansys*. Universidad de Sevilla, Secretariado de Publicaciones.

ARXIU HISTÒRIC DEL COL·LEGI OFICIAL D'ARQUITECTES DE CATALUNYA, Demarcació de Girona.

BARCONS FÍGOLS, Martí; CASELLES NADEU, Aleix: *Recerca Arxivística sobre Ignasi Bosch i Reitg*. Recurs electrònic biblioteca de la Universitat de Girona.

BLANCAFORT FONT, Arnau, 2006: *Disseny i anàlisi estructural d'una volta ceràmica*. Recurs electrònic biblioteca de la Universitat de Girona.

BOSCH REITG, Ignasi, 1949: *Bóvedas vaidas tabicadas*. Trabajo para el concurso bienal del colegio oficial de arquitectos de Cataluña y Baleares.

CABRERA MASFERRER, Albert; SALA MARGUÍ, Marta; JORDI COLLELL, Carles, 2005: *Les voltes de quatre punts. Estudi constructiu i estructural de les cases barates*. Monogràfics de la Història de la Construcció del Col·legi d'aparelladors i arquitectes tècnics de Girona.

DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIÓN Y TECNOLOGÍA ARQUITECTÓNICAS DCTA-UPM, 1998: *Tratado de rehabilitación. Tomo 3. Patología y técnicas de intervención. Elementos estructurales*. Munilla-Iería.

FRAGUELL, Rosa M^a, 1988: *La ciutat jardí de l'obra sindical del hogar a l'època franquista. El grup Sant Narcís de Girona*. Edicions quaderns del cercle.

HEYMAN, Jacques, 1995: *Teoría, historia y restauración de estructuras de fábrica*. Juan de Herrera.

RIERA COROMINES, Marina; DEFRANCHI ANSALDO, Gigliola, 2004: *La plaça de l'Assumpció i església de Sant Narcís*. Recurs electrònic biblioteca de la Universitat de Girona.



SERRA I PARDÀS, Manel, 2002: *El grup de Sant Narcís de Girona. 50anys (1952-2002)*. Ajuntament de Girona.

SURROCA, José; LAJO, Rosina, 1990: *Léxico de Arte*. Ediciones Akal.

TRUÑO, Ángel, 2004: *Construcción de bóvedas tabicadas*. Instituto Juan de Herrera.



7. AGRAÏMENTS

Volem agrair l'ajut i la col·laboració de:

Els nostres tutors Miquel Llorens i Xavier Vinyoles, que ens han guiat en la realització del treball i ens han aconsellat durant el curs per poder dur a terme aquest treball.

Al professor Albert Cabrera per facilitar-nos fotografies antigues de la construcció del grup.

Al mossèn Benet Galí de la parròquia de Sant Narcís, que ens ha facilitat l'accés a l'església sempre que li hem demanat per tal de realitzar els plànols d'aixecament de l'estat actual.

Al Departament d'Urbanisme de l'Ajuntament de Girona i a l'UMAT per facilitar-nos els plànols d'urbanisme del barri.

A l'Arxiu Històric Municipal de Girona per facilitar-nos fotografies del barri.

A la regidora del Barri de Sant Narcís Sra. Pilar Prats i Torrents per avalar-nos i ajudar-nos a buscar un edifici sobre el qual realitzar l'estudi.

També volem agrair als nostres familiars i amics el seu suport durant aquest curs que ens ha permès tirar endavant aquest projecte.



Universitat de Girona
Escola Politècnica Superior

Projecte/Treball Final de Carrera

Estudi: Arquitectura Tècnica

Títol:

ANÀLISI ESTRUCTURAL DE VOLTES CERÀMIQUES
I PATOLOGIES DE L'ESGLÉSIA DE SANT NARCÍS

Document: ANNEX I

Alumne:

AMÈLIA QUINTANA MATAMOROS
ALBA ROMAGÓS AIRA

Director/Tutor: MIQUEL LLORENS SULIVERA

Departament: EMCI

Àrea: Mecànica de medis continus i teoria de les estructures

Convocatòria: Juliol de 2008



0. ÍNDEX ANNEX I

1.	VOLTA SHELL 63 LINEAL	pàg.1
2.	VOLTA SOLID 45 LINEAL	pàg.7
3.	CÚPULA SHELL 63 LINEAL	pàg.11
4.	CÚPULA SOLID 45 LINEAL	pàg.15
5.	VOLTA SOLID 45 NO LINEAL	pàg.20
6.	PILAR DESCENTRAT	pàg.25



Universitat de Girona
Escola Politècnica Superior

Projecte/Treball Final de Carrera

Estudi: Arquitectura Tècnica

Títol:

ANÀLISI ESTRUCTURAL DE VOLTES CERÀMIQUES
I PATOLOGIES DE L'ESGLÉSIA DE SANT NARCÍS

Document: ANNEX I

Alumne:

AMÈLIA QUINTANA MATAMOROS
ALBA ROMAGÓS AIRA

Director/Tutor: MIQUEL LLORENS SULIVERA

Departament: EMCI

Àrea: Mecànica de medis continus i teoria de les estructures

Convocatòria: Juliol de 2008



1. ORDRES PER A LA GEOMETRIA DE L'ANÀLISI LINEAL DE LA VOLTA AMB ELEMENT SHELL 63

1.1. Puntualitats

- Geometria volta nau principal amb l'eix z com a altura i repartint el pes de la coberta mitjançant carregues puntuals que simulen la transmissió d'aquestes a través de les costelles.
- Les costelles estan situades cada 0.6m i les carregues puntuals, que simulen ser uniformes repartides, cada 0.5m.
- Per calcular la carrega hem partit de que el pes que es transmetia era de $2,41\text{Kn/m}^2$, que en la nostra volta donada una carrega total de 163027,82N, repartit en 13 i 14 parts per simular la distribució descrita, obtenim que cada carrega puntual equival a un valor de -783,78N.
- S'ha suposat que el desenvolupament real de la volta té unes dimensions de 8.29 x 8.06m.

1.2. Ordres

!*****INICI DEL PREPROCESSADOR

/PREP7

ET,1,SHELL63

!ELECCIÓ TIPUS D'ELEMENT FINIT

R,1,0.04,0.04,0.04,0.04, , ,

!ELECCIÓ GRUIX DE L'ELEMENT

RMORE, , , ,

RMORE

RMORE, ,

MPTMP, , , , , , , ,

!ELECCIÓ DE LES PROPIETATS DEL MATERIAL

MPTMP,1,0

MPDATA,EX,1,,6.000e9

!Mòdul de Young (Pa)

MPDATA,PRXY,1,,0.3

!Coeficient de Poisson

MPTMP, , , , , , , ,

MPTMP,1,0

MPDATA,DENS,1,,1200

!Densitat del material kg/m^3

K,1,0,0,0,

!!INICI GEOMETRIA

K,3,8.180,0,0,

!Situació del keypoints que donaran forma a la volta

K,2,4.090,0,0.570,

K,4,0,4.030,0.570,

K,5,8.180,4.030,0.570,

K,6,0,8.060,0,

K,7,4.090,8.060,0.570,

K,8,8.180,8.060,0,

K,9,4.090,4.030,1.140,

FLST,3,3,3

!Creació de línies que donaran forma a les àrees

FITEM,3,1

FITEM,3,2

FITEM,3,3



```
BSPLIN, ,P51X
FLST,3,3,3
FITEM,3,1
FITEM,3,4
FITEM,3,6
BSPLIN, ,P51X
FLST,3,3,3
FITEM,3,6
FITEM,3,7
FITEM,3,8
BSPLIN, ,P51X
FLST,3,3,3
FITEM,3,8
FITEM,3,5
FITEM,3,3
BSPLIN, ,P51X
FLST,2,4,4
FITEM,2,1
FITEM,2,2
FITEM,2,3
FITEM,2,4
```

```
AL,P51X
```

!Creació de les areas que donen forma a la volta

```
TYPE, 1
MAT, 1
REAL, 1
ESYS, 0
SECNUM,
TSHAP,LINE
!*
/PNUM,KP,1
/PNUM,LINE,0
/PNUM,AREA,0
/PNUM,VOLU,0
/PNUM,NODE,0
/PNUM,TABN,0
/PNUM,SVAL,0
/NUMBER,0
!*
/PNUM,ELEM,0
/REPLOT
!*
/REPLO
```

!Creació del conjunt format com un element únic

```
MOPT,AMESH,DEFA
MOPT,QMESH,DEFA
MOPT,VMESH,DEFA
MOPT,TIMP,1
MOPT,PYRA,ON
MOPT,AORD,0
MOPT,SPLIT,1
MSHKEY,1
MSHMID,0
MSHPATTERN,0
KEYW,ACCEPT,0
!*
MSHAPE,0,2D
MSHAPE,0,3D
!*
FLST,5,2,4,ORDE,2
FITEM,5,2
FITEM,5,4
CM,_Y,LINE
LSEL, , , P51X
CM,_Y1,LINE
```

!!INICI DEL MALLAT



```
CMSEL,,_Y
!*
LESIZE,_Y1,,30,,,,1      !Mallat de una de les arestes en 30 parts
!*
FLST,5,2,4,ORDE,2
FITEM,5,1
FITEM,5,3
CM,_Y,LINE
LSEL,,,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
!*
LESIZE,_Y1,,28,,,,1      !Mallat de una de les arestes en 28 parts
!*
MSHKEY,0
CM,_Y,AREA
ASEL,,,,1
CM,_Y1,AREA
CHKMSH,'AREA'
CMSEL,S,_Y
!*
AMESH,_Y1
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
!*
FINISH
!*****FINAL DEL PREPROCESSADOR

!*****INICI DE LA SOLUCIÓ
/SOL
FLST,2,4,3,ORDE,4      !Restricció desplaçament 4 keypoints cantoners
FITEM,2,1
FITEM,2,3
FITEM,2,6
FITEM,2,8
!*
/GO
DK,P51X,,0,,0,UX,UY,UZ,,,,
ACEL,0,0,9.8,          !Introducció de l'acceleració, 9.8m/s²
FLST,2,208,1,ORDE,208  !Introducció dels punts on s'aplicara càrrega
FITEM,2,4
FITEM,2,6
FITEM,2,8
FITEM,2,10
FITEM,2,12
FITEM,2,14
FITEM,2,16
FITEM,2,18
FITEM,2,20
FITEM,2,22
FITEM,2,24
FITEM,2,26
FITEM,2,28
FITEM,2,62
FITEM,2,64
FITEM,2,66
FITEM,2,68
FITEM,2,70
FITEM,2,72
FITEM,2,74
FITEM,2,76
FITEM,2,78
FITEM,2,80
FITEM,2,82
```



FITEM,2,84
FITEM,2,86
FITEM,2,147
FITEM,2,149
FITEM,2,151
FITEM,2,153
FITEM,2,155
FITEM,2,157
FITEM,2,159
FITEM,2,161
FITEM,2,163
FITEM,2,165
FITEM,2,167
FITEM,2,169
FITEM,2,171
FITEM,2,173
FITEM,2,205
FITEM,2,207
FITEM,2,209
FITEM,2,211
FITEM,2,213
FITEM,2,215
FITEM,2,217
FITEM,2,219
FITEM,2,221
FITEM,2,223
FITEM,2,225
FITEM,2,227
FITEM,2,229
FITEM,2,231
FITEM,2,263
FITEM,2,265
FITEM,2,267
FITEM,2,269
FITEM,2,271
FITEM,2,273
FITEM,2,275
FITEM,2,277
FITEM,2,279
FITEM,2,281
FITEM,2,283
FITEM,2,285
FITEM,2,287
FITEM,2,289
FITEM,2,321
FITEM,2,323
FITEM,2,325
FITEM,2,327
FITEM,2,329
FITEM,2,331
FITEM,2,333
FITEM,2,335
FITEM,2,337
FITEM,2,339
FITEM,2,341
FITEM,2,343
FITEM,2,345
FITEM,2,347
FITEM,2,379
FITEM,2,381
FITEM,2,383
FITEM,2,385
FITEM,2,387
FITEM,2,389
FITEM,2,391
FITEM,2,393



FITEM,2,395
FITEM,2,397
FITEM,2,399
FITEM,2,401
FITEM,2,403
FITEM,2,405
FITEM,2,437
FITEM,2,439
FITEM,2,441
FITEM,2,443
FITEM,2,445
FITEM,2,447
FITEM,2,449
FITEM,2,451
FITEM,2,453
FITEM,2,455
FITEM,2,457
FITEM,2,459
FITEM,2,461
FITEM,2,463
FITEM,2,495
FITEM,2,497
FITEM,2,499
FITEM,2,501
FITEM,2,503
FITEM,2,505
FITEM,2,507
FITEM,2,509
FITEM,2,511
FITEM,2,513
FITEM,2,515
FITEM,2,517
FITEM,2,519
FITEM,2,521
FITEM,2,553
FITEM,2,555
FITEM,2,557
FITEM,2,559
FITEM,2,561
FITEM,2,563
FITEM,2,565
FITEM,2,567
FITEM,2,569
FITEM,2,571
FITEM,2,573
FITEM,2,575
FITEM,2,577
FITEM,2,579
FITEM,2,611
FITEM,2,613
FITEM,2,615
FITEM,2,617
FITEM,2,619
FITEM,2,621
FITEM,2,623
FITEM,2,625
FITEM,2,627
FITEM,2,629
FITEM,2,631
FITEM,2,633
FITEM,2,635
FITEM,2,637
FITEM,2,669
FITEM,2,671
FITEM,2,673
FITEM,2,675



```
FITEM,2,677
FITEM,2,679
FITEM,2,681
FITEM,2,683
FITEM,2,685
FITEM,2,687
FITEM,2,689
FITEM,2,691
FITEM,2,693
FITEM,2,695
FITEM,2,727
FITEM,2,729
FITEM,2,731
FITEM,2,733
FITEM,2,735
FITEM,2,737
FITEM,2,739
FITEM,2,741
FITEM,2,743
FITEM,2,745
FITEM,2,747
FITEM,2,749
FITEM,2,751
FITEM,2,753
FITEM,2,785
FITEM,2,787
FITEM,2,789
FITEM,2,791
FITEM,2,793
FITEM,2,795
FITEM,2,797
FITEM,2,799
FITEM,2,801
FITEM,2,803
FITEM,2,805
FITEM,2,807
FITEM,2,809
FITEM,2,811
FITEM,2,843
FITEM,2,845
FITEM,2,847
FITEM,2,849
FITEM,2,851
FITEM,2,853
FITEM,2,855
FITEM,2,857
FITEM,2,859
FITEM,2,861
FITEM,2,863
FITEM,2,865
FITEM,2,867
FITEM,2,869
!*
/GO
F,P51X,FZ,-783.78
/STATUS,SOLU
SOLVE                                     !Generació de la solució
!******FI DE LA SOLUCIÓ
```



2. ORDRES PER A LA GEOMETRIA DE L'ANÀLISI LINEAL DE LA VOLTA AMB ELEMENT SOLID 45

2.1. Puntualitats

- Geometria volta nau principal amb l'eix z com a altura i repartint el pes de la coberta mitjançant carregues puntuals que simulen la transmissió d'aquestes a través de les costelles.
- Les costelles estan situades cada 0.6m i les carregues puntuals, que simulen ser uniformes repartides, cada 0.5m.
- Per calcular la carrega hem partit de que el pes que es transmetia era de $2,41\text{Kn/m}^2$, que en la nostra volta donada una carrega total de $163027,82\text{N}$, repartit en 13 i 56 parts per simular la distribució descrita, obtenim que cada carrega puntual equival a un valor de $-223,93\text{N}$.
- S'ha suposat que el desenvolupament real de la volta té unes dimensions de $8.29 \times 8.06\text{m}$.

2.2. Ordres

```
!*****INICI DEL PREPROCESSADOR
/PREP7
!*
ET,1,SOLID45                !ELECCIÓ TIPUS D'ELEMENT FINIT
!*

MPTEMP,,,,,,,,              !ELECCIÓ DE LES PROPIETATS DEL MATERIAL
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,1,, 6.000e9       !Mòdul de Young (Pa)
MPDATA,PRXY,1,,0.3          !Coeficient de Poisson
MPDATA,DENS,1,,1200         !Densitat del material kg/m³
!*

K,1,0,0,0,                  !INICI GEOMETRIA
K,3,8.180,0,0,              !Situació del keypoints que donaran forma a la volta
K,2,4.090,0,0.570,
K,4,0,4.030,0.570,
K,5,8.180,4.030,0.570,
K,6,0,8.060,0,
K,7,4.090,8.060,0.570,
K,8,8.180,8.060,0,
K,9,4.090,4.030,1.140,

FLST,3,3,3                  !Creació de línies que donaran forma a les àrees
FITEM,3,1
FITEM,3,2
FITEM,3,3
BSPLIN, ,P51X
FLST,3,3,3
```



```
FITEM,3,1
FITEM,3,4
FITEM,3,6
BSPLIN, ,P51X
FLST,3,3,3
FITEM,3,6
FITEM,3,7
FITEM,3,8
BSPLIN, ,P51X
FLST,3,3,3
FITEM,3,8
FITEM,3,5
FITEM,3,3
BSPLIN, ,P51X
FLST,2,4,4
FITEM,2,1
FITEM,2,2
FITEM,2,4
FITEM,2,3

AL,P51X                                !Creació de les areas que donen forma a la volta
!*

FLST,2,1,5,ORDE,1                      !Extrusió de l'àrea en 4cm
FITEM,2,1
VEXT,P51X, , ,0,0,-0.04,,

TYPE, 1                                !Creació del conjunt format com un element únic
MAT, 1
! TSHA

ESIZE,0.15,0,                          !!INICI DEL MALLAT
FLST,5,1,4,ORDE,1                      !Elements amb dimensió màxima 0.15
FITEM,5,10
CM,_Y,LINE
LSEL, , , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
!*
LESIZE,_Y1, , ,5, , , ,1
!*
CM,_Y,VOLU
VSEL, , , ,1
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
!*
VSWEEP,_Y1
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
!*
FINISH
!*****FINAL DEL PREPROCESSADOR

!*****INICI DE LA SOLUCIÓ
/SOL
!*
ANTYPE,0
ACEL,0,0,9.8,                          !Introducció de l'acceleració, 9.8m/s2
FLST,2,2,3,ORDE,2                      !Restricció desplaçament 4 keypoints cantoners
FITEM,2,10
FITEM,2,-11
!*
```



```
/GO
DK,P51X, ,0, ,0,ALL, , , , ,
FLST,2,2,3,ORDE,2
FITEM,2,12
FITEM,2,-13
!*
/GO
DK,P51X, ,0, ,0,ALL, , , , ,

FLST,2,54,1,ORDE,2          !Introdució dels puntrs on s'aplicara càrrega
FITEM,2,5725
FITEM,2,-5778
!*
/GO
F,P51X,FZ,-223.939
FLST,2,54,1,ORDE,2
FITEM,2,5509
FITEM,2,-5562
!*
/GO
F,P51X,FZ,-223.939
FLST,2,54,1,ORDE,2
FITEM,2,5293
FITEM,2,-5346
!*
/GO
F,P51X,FZ,-223.939
FLST,2,54,1,ORDE,2
FITEM,2,5077
FITEM,2,-5130
!*
/GO
F,P51X,FZ,-223.939
FLST,2,54,1,ORDE,2
FITEM,2,4861
FITEM,2,-4914
!*
/GO
F,P51X,FZ,-223.939
FLST,2,54,1,ORDE,2
FITEM,2,4645
FITEM,2,-4698
!*
/GO
F,P51X,FZ,-223.939
FLST,2,54,1,ORDE,2
FITEM,2,4429
FITEM,2,-4482
!*
/GO
F,P51X,FZ,-223.939
FLST,2,54,1,ORDE,2
FITEM,2,4213
FITEM,2,-4266
!*
/GO
F,P51X,FZ,-223.939
FLST,2,54,1,ORDE,2
FITEM,2,3997
FITEM,2,-4050
!*
/GO
F,P51X,FZ,-223.939
FLST,2,54,1,ORDE,2
FITEM,2,3781
FITEM,2,-3834
```



```
!*  
/GO  
F,P51X,FZ,-223.939  
FLST,2,54,1,ORDE,2  
FITEM,2,3565  
FITEM,2,-3618  
!*  
/GO  
F,P51X,FZ,-223.939  
FLST,2,2,1,ORDE,2  
FITEM,2,3349  
FITEM,2,3402  
FINISH  
/PREP7  
FINISH  
/SOL  
FLST,2,54,1,ORDE,2  
FITEM,2,3349  
FITEM,2,-3402  
!*  
/GO  
F,P51X,FZ,-223.939  
FLST,2,54,1,ORDE,2  
FITEM,2,3133  
FITEM,2,-3186  
!*  
/GO  
F,P51X,FZ,-223.939  
FLST,2,13,1,ORDE,13  
FITEM,2,5944  
FITEM,2,5948  
FITEM,2,5952  
FITEM,2,5956  
FITEM,2,5960  
FITEM,2,5964  
FITEM,2,5968  
FITEM,2,5972  
FITEM,2,5976  
FITEM,2,5980  
FITEM,2,5984  
FITEM,2,5988  
FITEM,2,5992  
!*  
/GO  
F,P51X,FZ,-223.939  
FLST,2,13,1,ORDE,13  
FITEM,2,6055  
FITEM,2,6059  
FITEM,2,6063  
FITEM,2,6067  
FITEM,2,6071  
FITEM,2,6075  
FITEM,2,6079  
FITEM,2,6083  
FITEM,2,6087  
FITEM,2,6091  
FITEM,2,6095  
FITEM,2,6099  
FITEM,2,6103  
!*  
/GO  
F,P51X,FZ,-223.939  
  
SOLVE !Generació de la solució  
!*****FI DE LA SOLUCIÓ
```

3. ORDRES PER A LA GEOMETRIA DE L'ANÀLISI LINEAL DE LA CUPULA AMB ELEMENT SHELL 63 I BEAM 4

3.1. Puntualitats

- Geometria cupula amb l'eix z com a altura i repartint el pes de la coberta mitjançant carregues puntuals que simulen la transmissió d'aquestes a través de les costelles.
- Hi han 8 costelles, i 14 carregues puntuals a cada una de les costelles, simulant càrregues lineals
- Per calcular la carrega hem partit de que el pes que es transmetia era de $2,41\text{Kn/m}^2$, que en la nostra volta donada una carrega total de 241000N , repartit en 13 i 14 parts per simular la distribució descrita, obtenim que cada carrega puntual equival a un valor de $-2151,786\text{N}$.
- S'ha suposat que el desenvolupament real de la volta té unes dimensions de:

Àrea semiesfera: $2 \times \pi \times r^2 = 2 \times \pi \times 4^2 = 100m^2$

3.2. Ordres

```

/PREP7
!*
ET,1,SHELL63
!*
ET,2,BEAM4
!*

R,1,0.04, , , , ,
RMORE, , , ,
RMORE
RMORE, ,
!*
!*
!*

MPTEMP, , , , , ,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,1,, 6.000e9
MPDATA,PRXY,1,,0.3
MPTEMP, , , , , ,
MPTEMP, , , , , ,
MPTEMP,1,0
MPDATA,DENS,1,,1200

K,1,0,0,0,
K,2,-4.02,1.66,0,
K,3,-4.02,-1.66,0,
K,4,-1.66,-4.02,0,
K,5,1.66,-4.02,0,

```



K,6,4.02,-1.66,0,
K,7,4.02,1.66,0,
K,8,1.66,4.02,0,
K,9,-1.66,4.02,0,
K,1,0,0,4.35,
K,10,-0.83,2.01,3.77,
K,11,0.83,2.01,3.77,
K,12,2.01,0.83,3.77,
K,13,2.01,-0.83,3.77,
K,14,0.83,-2.01,3.77,
K,15,-0.83,-2.01,3.77,
K,16,-2.01,0.83,3.77,
K,17,-2.01,-0.83,3.77,

LSTR, 2, 3
LSTR, 3, 4
LSTR, 4, 5
LSTR, 5, 6
LSTR, 6, 7
LSTR, 7, 8
LSTR, 8, 9
LSTR, 9, 2

!Creació de les línies que formen la base octogonal

FLST,3,3,3
FITEM,3,9
FITEM,3,10
FITEM,3,1
BSPLIN, ,P51X
FLST,3,3,3
FITEM,3,8
FITEM,3,11
FITEM,3,1
BSPLIN, ,P51X
FLST,3,3,3
FITEM,3,7
FITEM,3,12
FITEM,3,1
BSPLIN, ,P51X
FLST,3,3,3
FITEM,3,6
FITEM,3,13
FITEM,3,1
BSPLIN, ,P51X
FLST,3,3,3
FITEM,3,5
FITEM,3,14
FITEM,3,1
BSPLIN, ,P51X
FLST,3,3,3
FITEM,3,4
FITEM,3,15
FITEM,3,1
BSPLIN, ,P51X
FLST,3,3,3
FITEM,3,3
FITEM,3,17
FITEM,3,1
BSPLIN, ,P51X
FLST,3,3,3
FITEM,3,2
FITEM,3,16
FITEM,3,1
BSPLIN, ,P51X
FLST,3,3,3
FITEM,3,2
FITEM,3,16

!Creació de les costelles



FITEM,3,1
BSPLIN, ,P51X

FLST,2,3,4 !Creació de les àrees

FITEM,2,15

FITEM,2,14

FITEM,2,2

AL,P51X

FLST,2,3,4

FITEM,2,3

FITEM,2,13

FITEM,2,14

AL,P51X

FLST,2,3,4

FITEM,2,12

FITEM,2,13

FITEM,2,4

AL,P51X

FLST,2,3,4

FITEM,2,5

FITEM,2,12

FITEM,2,11

AL,P51X

FLST,2,3,4

FITEM,2,11

FITEM,2,10

FITEM,2,6

AL,P51X

FLST,2,3,4

FITEM,2,10

FITEM,2,7

FITEM,2,9

AL,P51X

FLST,2,3,4

FITEM,2,8

FITEM,2,16

FITEM,2,9

AL,P51X

FLST,2,3,4

FITEM,2,1

FITEM,2,16

FITEM,2,15

AL,P51X

TYPE, 1 !Creació dels elements

MAT, 1

REAL, 1

ESYS, 0

SECNUM,

TSHAP,LINE

FLST,5,8,4,ORDE,2 !!INICI DEL MALLAT

FITEM,5,9

FITEM,5,-16

CM,_Y,LINE

LSEL, , , ,P51X

CM,_Y1,LINE

CMSEL,,_Y

!*

LESIZE,_Y1, , ,14, , , ,1 !Mallat de les costelles en 14 parts

!*

MSHAPE,1,2D

MSHKEY,1

!*

FLST,5,8,5,ORDE,2

FITEM,5,1



```
FITEM,5,-8
CM,_Y,AREA
ASEL,,,P51X
CM,_Y1,AREA
CHKMSH,'AREA'
CMSEL,S,_Y
!*
AMESH,_Y1
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
!*
!*****FINAL DEL PREPROCESSADOR

!*****INICI DE LA SOLUCIÓ
/SOL
ANTYPE,0
ACEL,0,0,9.8,          !Introducció de l'acceleració, 9.8m/s2

FLST,2,8,4,ORDE,2      !Restricció desplaçament 4 keypoints cantoners
FITEM,2,1
FITEM,2,-8
!*
/GO
DL,P51X,,UZ,0

FLST,2,78,1,ORDE,12    !Introducció dels punts on s'aplicara càrrega
FITEM,2,3
FITEM,2,-15
FITEM,2,17
FITEM,2,-29
FITEM,2,184
FITEM,2,-196
FITEM,2,325
FITEM,2,-337
FITEM,2,492
FITEM,2,-504
FITEM,2,954
FITEM,2,-966
!*
/GO
F,P51X,FZ,-2151.786
FLST,2,26,1,ORDE,4
FITEM,2,633
FITEM,2,-645
FITEM,2,787
FITEM,2,-799
!*
/GO
F,P51X,FZ,-2151.786
/STATUS,SOLU
SOLVE                  !Generació de la solució
!*****FI DE LA SOLUCIÓ
```



4. ORDRES PER A LA GEOMETRIA DE L'ANÀLISI LINEAL DE LA CUPULA AMB ELEMENT SOLID 45

4.1. Puntualitats

- Geometria cúpula amb l'eix z com a altura i repartint el pes de la coberta mitjançant carrega uniformement repartida.
- Hi han 8 costelles
- Per calcular la carrega hem partit de que el pes que es transmetia era de $2,41\text{Kn/m}^2$, que en la nostra volta donada una carrega total de 241000N.
- S'ha suposat que el desenvolupament real de la volta té unes dimensions de:

$$\text{Àrea semiesfera: } 2 \times \pi \times r^2 = 2 \times \pi \times 4^2 = 100\text{m}^2$$

4.2. Ordres

```

/PREP7
!*
ET,1,Solid45                                !ELECCIO TIPUS D'ELEMENT FINIT
!*
MPTEMP,,,,,,,,                              !ELECCIÓ DE LES PROPIETATS
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,1,, 6.000e9                        !Mòdul de Young (Pa)
MPDATA,PRXY,1,,0.3                          !Coeficient de Poisson
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,DENS,1,,1200                          !Densitat del material kg/m3

K,1,0,0,0,
K,2,-4.02,1.66,0,
K,3,-4.02,-1.66,0,
K,4,-1.66,-4.02,0,
K,5,1.66,-4.02,0,
K,6,4.02,-1.66,0,
K,7,4.02,1.66,0,
K,8,1.66,4.02,0,
K,9,-1.66,4.02,0,
K,1,0,0,4.35,
K,10,-0.83,2.01,3.77,
K,11,0.83,2.01,3.77,
K,12,2.01,0.83,3.77,
K,13,2.01,-0.83,3.77,
K,14,0.83,-2.01,3.77,
K,15,-0.83,-2.01,3.77,
K,16,-2.01,0.83,3.77,
K,17,-2.01,-0.83,3.77,
LSTR, 2, 3                                  !Creació de les linies que formen la base
octogonal
LSTR, 3, 4
LSTR, 4, 5

```



LSTR, 5, 6
LSTR, 6, 7
LSTR, 7, 8
LSTR, 8, 9
LSTR, 9, 2

FLST,3,3,3
FITEM,3,9
FITEM,3,10
FITEM,3,1
BSPLIN, ,P51X
FLST,3,3,3
FITEM,3,8
FITEM,3,11
FITEM,3,1

BSPLIN, ,P51X
FLST,3,3,3
FITEM,3,7
FITEM,3,12
FITEM,3,1
BSPLIN, ,P51X
FLST,3,3,3
FITEM,3,6

FITEM,3,13
FITEM,3,1
BSPLIN, ,P51X
FLST,3,3,3
FITEM,3,5
FITEM,3,14
FITEM,3,1

BSPLIN, ,P51X
FLST,3,3,3
FITEM,3,4
FITEM,3,15
FITEM,3,1
BSPLIN, ,P51X
FLST,3,3,3
FITEM,3,3

FITEM,3,17
FITEM,3,1
BSPLIN, ,P51X
FLST,3,3,3
FITEM,3,2
FITEM,3,16
FITEM,3,1

BSPLIN, ,P51X
FLST,3,3,3
FITEM,3,2
FITEM,3,16
FITEM,3,1
BSPLIN, ,P51X
FLST,2,3,4

FITEM,2,15
FITEM,2,14
FITEM,2,2
AL,P51X
FLST,2,3,4
FITEM,2,3

FITEM,2,13
FITEM,2,14
AL,P51X
FLST,2,3,4
FITEM,2,12
FITEM,2,13
FITEM,2,4
AL,P51X
FLST,2,3,4

!Creació de les costelles

!Creació de les àreas



FITEM,2,5
FITEM,2,12
FITEM,2,11
AL,P51X
FLST,2,3,4
FITEM,2,11
FITEM,2,10
FITEM,2,6
AL,P51X
FLST,2,3,4
FITEM,2,10
FITEM,2,7
FITEM,2,9
AL,P51X
FLST,2,3,4
FITEM,2,8
FITEM,2,16
FITEM,2,9
AL,P51X
FLST,2,3,4
FITEM,2,1
FITEM,2,16
FITEM,2,15
AL,P51X
FLST,3,8,5,ORDE,2
FITEM,3,1
FITEM,3,-8

AGEN,2,P51X, , , ,0.04, ,0
inferior

!Duplicat de les areas que conformen la cara

FLST,2,16,5,ORDE,2
FITEM,2,1
FITEM,2,-16
VA,P51X
FLST,2,4,3
FITEM,2,26
FITEM,2,2
FITEM,2,3
FITEM,2,18
A,P51X
FLST,2,4,3
FITEM,2,18
FITEM,2,3
FITEM,2,4
FITEM,2,20
A,P51X
FLST,2,4,3
FITEM,2,20
FITEM,2,4
FITEM,2,5
FITEM,2,21
A,P51X
FLST,2,4,3
FITEM,2,5
FITEM,2,21
FITEM,2,22
FITEM,2,6
A,P51X
FLST,2,4,3
FITEM,2,6
FITEM,2,22
FITEM,2,23
FITEM,2,7
A,P51X
FLST,2,4,3
FITEM,2,7



```
FITEM,2,23
FITEM,2,24
FITEM,2,8
A,P51X
FLST,2,4,3
FITEM,2,9
FITEM,2,25
FITEM,2,24
FITEM,2,8
A,P51X
FLST,2,4,3
FITEM,2,26
FITEM,2,2
FITEM,2,9
FITEM,2,25
A,P51X

MSHKEY,0
MSHAPE,1,3d
FLST,2,24,5,ORDE,2
FITEM,2,1
FITEM,2,-24
VA,P51X

ESIZE,0.15,0,
FLST,5,1,4,ORDE,1
FITEM,5,37
CM,_Y,LINE
LSEL,, , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
!*
LESIZE,_Y1, , ,5, , , ,1
!*
CM,_Y,VOLU
VSEL, , , , 1
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
!*
VMESH,_Y1
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
!*

FINISH
!*****FINAL DEL PREPROCESSADOR

!*****INICI DE LA SOLUCIÓ
/SOL
FLST,2,8,4,ORDE,8
FITEM,2,5
FITEM,2,-6
FITEM,2,19
FITEM,2,-20
FITEM,2,23
FITEM,2,29
FITEM,2,-30
FITEM,2,32
!*
/GO
DL,P51X, ,ALL,0
FLST,2,8,5,ORDE,7
```

¡Creació del volum

!!INICI DEL MALLAT
¡Divisió dels elements en tamany 0.15

¡Divisió del gruix en 5 parts

!Restricció desplaçament en la base

¡Aplicació de la càrrega uniformament repartida



```
FITEM,2,2
FITEM,2,4
FITEM,2,7
FITEM,2,-9
FITEM,2,11
FITEM,2,13
FITEM,2,-14
/GO
!*
SFA,P51X,1,PRES,-2410

ACEL,0,0,-9.8,          !Introducció de l'acceleració, 9.8m/s2
/STATUS,SOLU
SOLVE                  !Generació de la solució
!*****FI DE LA SOLUCIÓ
```

5. ORDRES PER A LA GEOMETRIA DE L'ANÀLISI NO LINEAL DE LA VOLTA AMB ELEMENT SOLID 45

5.1. Puntualitats

- Geometria volta nau principal amb l'eix z com a altura i repartint el pes de la coberta mitjançant carregues puntuals que simulen la transmissió d'aquestes a través de les costelles.
- Les costelles estan situades cada 0.6m i les carregues puntuals, que simulen ser uniformes repartides, cada 0.5m.
- Per calcular la carrega hem partit de que el pes que es transmetia era de $2,41\text{Kn/m}^2$, que en la nostra volta donada una carrega total de 163027,82N, repartit en 13 i 56 parts per simular la distribució descrita, obtenim que cada carrega puntual equival a un valor de -223,93N.
- S'ha suposat que el desenvolupament real de la volta té unes dimensions de 8.29 x 8.06m.

5.2. Ordres

```
!*****INICI DEL PREPROCESSADOR
/PREP7
!*
ET,1,SOLID45                !ELECCIÓ TIPUS D'ELEMENT FINIT
!*

MPTEMP,,,,,,,,              !ELECCIÓ DE LES PROPIETATS DEL MATERIAL
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,1,, 6.000e9       !Mòdul de Young (Pa)
MPDATA,PRXY,1,,0.3          !Coeficient de Poisson
MPDATA,DENS,1,,1200         !Densitat del material kg/m³
!*
TB,CONC,1,1,9,
TBTEMP,0
TBDATA,,0.1,0.2,6e5,6e6,,   !Indicació dels límits de ruptura a tracció i a compressió
TBDATA,,,,,,,,
!*
!*
K,1,0,0,0,                  !!INICI GEOMETRIA
K,3,8.180,0,0,              !Situació del keypoints que donaran forma a la volta
K,2,4.090,0,0.570,
K,4,0,4.030,0.570,
K,5,8.180,4.030,0.570,
K,6,0,8.060,0,
K,7,4.090,8.060,0.570,
K,8,8.180,8.060,0,
K,9,4.090,4.030,1.140,

FLST,3,3,3                  !Creació de línies que donaran forma a les àrees
```



```
FITEM,3,1
FITEM,3,2
FITEM,3,3
BSPLIN, ,P51X
FLST,3,3,3
FITEM,3,1
FITEM,3,4
FITEM,3,6
BSPLIN, ,P51X
FLST,3,3,3
FITEM,3,6
FITEM,3,7
FITEM,3,8
BSPLIN, ,P51X
FLST,3,3,3
FITEM,3,8
FITEM,3,5
FITEM,3,3
BSPLIN, ,P51X
FLST,2,4,4
FITEM,2,1
FITEM,2,2
FITEM,2,4
FITEM,2,3

AL,P51X                                !Creació de les areas que donen forma a la volta
!*

FLST,2,1,5,ORDE,1                      !Extrusió de l'a`rea en 4cm
FITEM,2,1
VEXT,P51X, , ,0,0,-0.04,,,,

TYPE, 1                                !Creació del conjunt format com un element únic
MAT, 1
! TSHA

                                           !!INICI DEL MALLAT
                                           !Elements amb dimensió màxima 0.15
ESIZE,0.15,0,
FLST,5,1,4,ORDE,1
FITEM,5,10
CM,_Y,LINE
LSEL, , , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
!*
LESIZE,_Y1, , ,5, , , , ,1
!*
CM,_Y,VOLU
VSEL, , , , 1
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
!*
VSWEEP,_Y1
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
!*
FINISH
!*****FINAL DEL PREPROCESSADOR

!*****INICI DE LA SOLUCIÓ
/SOL
!*
ANTYPE,0
```



ACEL,0,0,9.8,
FLST,2,2,3,ORDE,2
FITEM,2,10
FITEM,2,-11
!*
/GO
DK,P51X, ,0, ,0,ALL, , , , , ,
FLST,2,2,3,ORDE,2
FITEM,2,12
FITEM,2,-13
!*
/GO
DK,P51X, ,0, ,0,ALL, , , , , ,

FLST,2,54,1,ORDE,2
FITEM,2,5725
FITEM,2,-5778
!*
/GO
F,P51X,FZ,-223.939
FLST,2,54,1,ORDE,2
FITEM,2,5509
FITEM,2,-5562
!*
/GO
F,P51X,FZ,-223.939
FLST,2,54,1,ORDE,2
FITEM,2,5293
FITEM,2,-5346
!*
/GO
F,P51X,FZ,-223.939
FLST,2,54,1,ORDE,2
FITEM,2,5077
FITEM,2,-5130
!*
/GO
F,P51X,FZ,-223.939
FLST,2,54,1,ORDE,2
FITEM,2,4861
FITEM,2,-4914
!*
/GO
F,P51X,FZ,-223.939
FLST,2,54,1,ORDE,2
FITEM,2,4645
FITEM,2,-4698
!*
/GO
F,P51X,FZ,-223.939
FLST,2,54,1,ORDE,2
FITEM,2,4429
FITEM,2,-4482
!*
/GO
F,P51X,FZ,-223.939
FLST,2,54,1,ORDE,2
FITEM,2,4213
FITEM,2,-4266
!*
/GO
F,P51X,FZ,-223.939
FLST,2,54,1,ORDE,2
FITEM,2,3997
FITEM,2,-4050
!*

!Introducció de l'acceleració, 9.8m/s^2
!Restricció desplaçament 4 keypoints cantoners

!Introducció dels puntrs on s'aplicara càrrega



/GO
F,P51X,FZ,-223.939
FLST,2,54,1,ORDE,2
FITEM,2,3781
FITEM,2,-3834
!*
/GO
F,P51X,FZ,-223.939
FLST,2,54,1,ORDE,2
FITEM,2,3565
FITEM,2,-3618
!*
/GO
F,P51X,FZ,-223.939
FLST,2,2,1,ORDE,2
FITEM,2,3349
FITEM,2,3402
FINISH
/PREP7
FINISH
/SOL
FLST,2,54,1,ORDE,2
FITEM,2,3349
FITEM,2,-3402
!*
/GO
F,P51X,FZ,-223.939
FLST,2,54,1,ORDE,2
FITEM,2,3133
FITEM,2,-3186
!*
/GO
F,P51X,FZ,-223.939
FLST,2,13,1,ORDE,13
FITEM,2,5944
FITEM,2,5948
FITEM,2,5952
FITEM,2,5956
FITEM,2,5960
FITEM,2,5964
FITEM,2,5968
FITEM,2,5972
FITEM,2,5976
FITEM,2,5980
FITEM,2,5984
FITEM,2,5988
FITEM,2,5992
!*
/GO
F,P51X,FZ,-223.939
FLST,2,13,1,ORDE,13
FITEM,2,6055
FITEM,2,6059
FITEM,2,6063
FITEM,2,6067
FITEM,2,6071
FITEM,2,6075
FITEM,2,6079
FITEM,2,6083
FITEM,2,6087
FITEM,2,6091
FITEM,2,6095
FITEM,2,6099
FITEM,2,6103
!*
/GO



```
F,P51X,FZ,-223.939
NLGEOM, ON          ! activa les no linealitats geometriques
SOLCONTROL,OFF      ! desactiva optimitzacio de la solucio no lineal
NSUBST,100          ! realitza l'anàlisi amb 100 iteracions
OUTRES,ALL,ALL
/STATUS,SOLU
SOLVE               !Generació de la solució
!*****FI DE LA SOLUCIÓ
```



6. ORDRES PER A L'EXEMPLIFICACIÓ DE LA PATOLOGIA SOFERTA PELS PILARS DE PEDRA ARTIFICIAL AMB ELEMENT SOLID 45

6.1. Ordres pilar amb pes centrat

```
!*****INICI DEL PREPROCESSADOR
/PREP7
!*
ET,1,SOLID45                                !ELECCIÓ TIPUS D'ELEMENT FINIT
!*
!*
MPTEMP,,,,,,,,                               !ELECCIÓ DE LES PROPIETATS DEL MATERIAL
MPTEMP,1,0
MPDATA,DENS,1,,2400                         !Densitat del material kg/m3
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,1,, 2300000000                   !Mòdul de Young (Pa)
MPDATA,PRXY,1,,0.3                         !Coeficient de Poisson

CYLIND,0.33, ,0,5,0,360,                  !!INICI GEOMETRIA

MOPT,AMESH,DEFA                             !!INICI DEL MALLAT
MOPT,QMESH,DEFA
MOPT,VMESH,DEFA
MOPT,TIMP,1
MOPT,PYRA,ON
MOPT,AORD,0
MOPT,SPLIT,1
MSHKEY,1
MSHMID,0
MSHPATTERN,0
KEYW,ACCEPT,0
!*
MSHAPE,0,2D
MSHAPE,0,3D
!*
MSHKEY,0
CM,_Y,AREA
ASEL, , , , 2
CM,_Y1,AREA
CHKMSH,'AREA'
CMSEL,S,_Y
!*
AMESH,_Y1
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
!*
CM,_Y,VOLU
VSEL, , , , 1
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
!*
VSWEEP,_Y1
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
!*
```



FINISH

!*****FINAL DEL PREPROCESSADOR

!*****INICI DE LA SOLUCIÓ

/SOL

FLST,2,1,5,ORDE,1

FITEM,2,1

DA,P51X,UZ,0

!Restricció desplaçament

FLST,2,1,5,ORDE,1

FITEM,2,1

ACEL,0,0,9.8,

!Introducció de l'acceleració, 9.8m/s²

FLST,2,1,1,ORDE,1

FITEM,2,13

!*
/GO

F,P51X,FZ,-267540

!Introducció de la càrrega

/STATUS,SOLU

SOLVE

6.2. Ordres pilar amb pes descentrat

!*****INICI DEL PREPROCESSADOR

/PREP7

!*
ET,1,SOLID45

!ELECCIÓ TIPUS D'ELEMENT FINIT

!*
!*
MPTMP,,,,,,,,

MPTMP,1,0

!ELECCIÓ DE LES PROPIETATS DEL MATERIAL

MPDATA,DENS,1,,2400

!Densitat del material kg/m³

MPTMP,,,,,,,,

MPTMP,1,0

MPDATA,EX,1,, 23000000000

!Mòdul de Young (Pa)

MPTMP,1,0

MPDATA,PRXY,1,,0.3

!Coeficient de Poisson

CYLIND,0.33, ,0,5,0,360,

!!INICI GEOMETRIA

MOPT,AMESH,DEFA

!!INICI DEL MALLAT

MOPT,QMESH,DEFA

MOPT,VMESH,DEFA

MOPT,TIMP,1

MOPT,PYRA,ON

MOPT,AORD,0

MOPT,SPLIT,1

MSHKEY,1

MSHMID,0

MSHPATTERN,0

KEYW,ACCEPT,0

!*
MSHAPE,0,2D

MSHAPE,0,3D

!*
MSHKEY,0

CM,_Y,AREA

ASEL, , , , 2

CM,_Y1,AREA

CHKMSH,'AREA'

CMSEL,S,_Y

!*
AMESH,_Y1!*
CMDELE,_Y



```
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
!*
CM,_Y,VOLU
VSEL,,,1
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
!*
VSWEEP,_Y1
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
!*
FINISH
```

```
/SOL
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,1
DA,P51X,UZ,0
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,1
ACEL,0,0,9.8,
FLST,2,1,1,ORDE,1
FITEM,2,13
!*
FLST,2,1,1,ORDE,1
FITEM,2,12
!*
/GO
F,P51X,FZ,-267540
/STATUS,SOLU
SOLVE
```

!Restricció desplaçament

!Introducció de l'acceleració, 9.8m/s^2

¡Introducció de la càrrega