

Treball final de grau

Estudi: Grau en Arquitectura Tècnica

Títol: SIMULACIÓ DE FÀBRICA POSTTESADA. ESGLÉSIA DEL SAGRAT
COR DE JESÚS A VISTABELLA

Document: Memòria i annexos

Alumne: Jordi van Leeuwen Bernat

Tutor: Miquel Llorens Sulivera

Departament: Enginyeria Mecànica i de la Construcció Industrial

Àrea: MMCTE

Convocatòria (mes/any): Setembre 2017

RESUM

L'església del Sagrat Cor de Jesús (Vistabella, 1923) és un edifici modernista projectat per Josep Maria Jujol, un dels màxims exponents de l'arquitectura modernista catalana i col·laborador d'Antoni Gaudí. El campanar d'aquesta icònica església és especialment vulnerable als esforços creats pel vent, degut a la seva esveltesa i als materials utilitzats en la seva construcció, fet que ja es va fer evident el 1934, quan part d'aquest campanar va esfondrar-se i va haver de ser reconstruït afegint-hi un sistema de reforç passiu amb barres d'acer.

A partir d'un estudi estructural del campanar, l'any 2015, es conclou que aquest sistema passiu no és suficient per assegurar l'estabilitat del campanar, per la qual cosa es dissenya un sistema de barres gradualment tesades, que proporcioni una precompressió en tot el campanar i millori el seu comportament enfront d'aquests esforços rasants, disminuint o eliminant les traccions produïdes per l'acció del vent.

Aquest treball és un estudi del comportament del campanar enfront de l'acció del vent en l'estat previ i un cop tesat, per tal d'avaluar en quin grau s'aconsegueix mitigar aquesta problemàtica associada al campanar des de la seva construcció.

ABSTRACT

The Sacred Heart Church (Vistabella, 1923) is a modernist building designed by Josep Maria Jujol, one of the masters of Catalan Modernism and collaborator of Antoni Gaudí. The steeple of this iconic church is especially vulnerable to the stain produced by the wind action, due to its slenderness and the materials that were used by its construction. It became obvious in 1934, when the upper part of the steeple crumbled away and it was rebuilt adding a reinforced system with passive steel bars fixed in the structure.

Based on a structural study of this steeple, in 2015, it came to the conclusion that the reinforced passive system was not enough to ensure its stability. Therefore, a new reinforced active system with gradually prestressed iron bars around the steeple was implemented in order to provide a certain degree of precompression and improvement against the action of the wind, reducing or removing its tensile stresses from the masonry of the steeple.

This dissertation is a study of the behavior of the steeple against the action of the wind during both scenarios to evaluate the improvement achieved on this intrinsic issue shown since its first construction.

Tots tenim al darrere un equip de persones que, essent del ram o no, ens ajuden a encendre una espurna de llum quan el camí sembla que és completament fosc.

Vull mostrar el meu més sincer agraïment:

- Al Dr. Arquitecte Miquel Llorens, per haver estat el meu tutor i vertader guia en aquest treball i en el camp de les estructures en edificació.
- Al Dr. Arquitecte Roger Señís, de la Universitat Politècnica de Catalunya, per la seva disposició per ajudar-me i orientar-me com a cap portant del projecte real a l'obra de Vistabella.
- A la meva mare Maricarmen i a la meva germana Mireia, per haver cregut sempre en mi i ser-hi sempre.
- Als meus companys Alba, Martí i Anna, per estar allà en tots els meus petits dubtes i treure'm sempre un somriure.
- Als meus companys i companyes de classe, per tots aquests anys plegats.
- Al Dr. Arquitecte Tècnic Albert Ribera Roget i a la Dolors Pujol Bertolí, així com a tot el personal docent que m'ha ajudat, ensenyat i motivat durant tots aquests anys d'aprenentatge constant. Ha estat un plaer i un honor ser el vostre alumne.

Índex

1. Introducció	3
1.1. Antecedents	3
1.2. Objecte	3
1.3. Objectius	3
2. Estat de l'art	4
2.1. Aproximació teòrica del problema	4
2.2. El posttesat	4
2.2.1. Avantatges i inconvenients	5
2.2.2. Durabilitat	5
2.2.3. Canvis de les forces de tesat: pèrdues i guanys	5
2.3. Exemples de fàbrica posttesada	6
2.3.1. La torre de Pisa	6
2.3.2. La torre de l'oficina central de Correus, a Sydney	6
2.3.3. El campanar de l'església de San Giorgio, a Trignano	7
3. Campanar de Vistabella: història i geometria	8
3.1. Josep M. Jujol, un arquitecte singular	8
3.2. Les traces de Jujol	9
3.3. L'església del Sagrat Cor de Vistabella	9
4. Documentació gràfica	11
4.1. Costelles principals: cotes verticals	12
4.2. Costelles principals: cotes horitzontals	13
4.3. Costelles secundàries: cotes verticals	14
4.4. Costelles secundàries: cotes horitzontals	15
4.5. Costella secundària central: cotes verticals	16
4.6. Costella secundària central: cotes horitzontals	17
4.7. Replà: cotes verticals	18
4.8. Replà: cotes horitzontals	19
4.9. Coronament: cotes verticals	20
4.10. Coronament: cotes horitzontals	21
4.11. Creu de coronament: cotes verticals	22
4.12. Creu de coronament: cotes horitzontals	23
5. Paràmetres mecànics dels materials utilitzats	24
5.1. Fàbrica	24
5.1.1. Determinació experimental del mòdul d'elasticitat, E	24
5.1.2. Densitat	31
5.1.3. Resistència a compressió	32
5.1.4. Resistència a tallant	32
5.1.5. Resistència a flexió	33
5.1.6. Coeficient de Poisson	34
5.1.7. Coeficient de seguretat	34

5.1.8. Accions reològiques i tèrmiques de la fàbrica	35
5.2. Acer AISI 316	36
6. Realització del tesat a obra	37
6.1. Estat de l'obra durant l'execució del tesat	37
6.2. Treballs previs a l'operació de tesat	39
6.3. Tesat	41
7. Realització del tesat a obra	43
7.1. Pes propi	43
7.1.1. Definició	43
7.1.2. Obtenció del pes del campanar	43
7.1.3. Tensió teòrica a la base del campanar	43
7.2. Tesat	44
7.2.1. Definició	44
7.2.2. Anàlisi de l'efecte de la gravetat als tirants	44
7.2.3. Anàlisi de la tensió aplicada	47
7.2.4. Esforços equivalents al model	49
7.3. Vent	52
7.3.1. Definició	52
7.3.2. Vents dominants a la zona	52
7.3.3. L'acció del vent segons el CTE	53
8. Creació i desenvolupament dels models	58
8.1. Geometria	58
8.1.1. Elements del sistema de tesat	62
8.1.2. Exportació de geometria a ANSYS Workbench	65
8.2. Paràmetres mecànics dels materials utilitzats	66
8.3. Sistema de coordenades de referència	67
8.4. Contactes	68
8.5. Mallat	70
8.6. Aplicació de les forces al model	73
8.6.1. Característiques de l'anàlisi	73
8.6.2. Suports	74
8.6.3. Gravat	78
8.6.4. Tesat	78
8.6.5. Vent	79
9. Anàlisi dels resultats obtinguts	80
9.1. Principi teòric: els cercles de Mohr	80
9.2. Comparació dels models	81
9.2.1. Pes propi	81
9.2.2. Pes propi / pes propi + tesat	81
9.2.3. Pes propi + vent O/E / pes propi + tesat + vent O/E	86
9.2.4. Pes propi + vent N/S / pes propi + tesat + vent N/S	92

10. Conclusions	98
10.1. Aprenentatge	98
10.2. Resultats obtinguts	98
10.3. Noves línies d'investigació	99
11. Bibliografia	100
12. Annexes	101
Annex 1. Resultats de les anàlisis realitzades	102
Annex 2. Documentació gràfica utilitzada	132

1. Introducció

1.1 Antecedents

L'església del Sagrat Cor de Jesús de Vistabella, al municipi de la Secuita, és un edifici modernista projectat per Josep Maria Jujol i Gibert l'any 1918. Aquesta església, que ostenta la qualificació patrimonial de Bé Cultural d'Interès Local (BCIL) i actualment està en tràmit per ser inclosa com a Bé Cultural d'Interès Nacional (BCIN), és un edifici realitzat íntegrament amb pedra i obra de fàbrica ceràmica, que actualment és objecte de treballs de conservació, restauració i consolidació estructural emmarcats dins del *Pla Director per obres de Reparació i Restauració de l'Església del Sagrat Cor de Vistabella*, el qual ha estat impulsat per l'Arquebisbat de Tarragona.

En aquest Pla Director, elaborat pels arquitectes Josep Llinàs Carmona i Roger Miralles Jori, s'hi descriuen diferents patologies detectades, que posen en risc la conservació de l'església, tant per l'entrada d'humitats que malmeten les pintures que hi ha a l'interior, com per l'acció del vent contra el campanar, que provoca traccions en l'element, que poden posar en qüestió la seva estabilitat.

D'això, se'n deriva el *Projecte de restauració de l'església del Sagrat Cor de Vistabella*, redactat per l'arquitecte Santi Prats i Rocavert, on queden definits els treballs de consolidació estructural: un sistema de vuit tirants tesats vistos que comprimeixen el campanar permanentment, dissenyat pel doctor arquitecte Roger Señís López.

1.2 Objecte

Aquest treball té per objecte l'estudi del tesat aplicat al campanar de Vistabella. S'elaboraran dos models 3D simultàniament, a través de programari de modelització específic, simulant l'estat previ a l'actuació i l'estat tesat, i se'ls sotmetrà als esforços creats pel vent per avaluar quin grau de millora es va aconseguir amb l'aplicació d'aquest reforç estructural.

Com a part complementària, s'explicarà la realització dels treballs de tesat dels tirants a obra, la justificació dels paràmetres dels materials utilitzats i del càlcul de les accions aplicades, segons la normativa aplicable i el procés d'obtenció dels models utilitzats.

1.3 Objectius

- Aprofundir en el coneixement del camp de les estructures en obres d'edificació
- Introduir-se en tècniques diferents de les ensenyades als estudis de Grau en Arquitectura Tècnica i Edificació, concretament al Mètode d'Elements Finitos (MEF)
- Identificar el comportament del campanar enfront dels esforços produïts pel vent
- Identificar les mancances del campanar enfront de l'acció del vent en relació amb el material utilitzat
- Avaluar objectivament l'efecte de tesat realitzat i la millora respecte de l'estat previ

2. Estat de l'art

2.1 Aproximació teòrica del problema

Segons s'indica en el *Pla Director per obres de Reparació i Restauració de l'Església del Sagrat Cor de Vistabella*, el vent provoca en el campanar uns esforços rasants que poden posar en dubte la seva estabilitat. Aquest problema, des d'un punt de vista teòric, pot motivar essencialment dos grans tipus d'intervenció: l'augment de les seccions dels elements portants o l'aplicació d'un esforç de compressió que contraresti els rasants produïts pel vent.

El raonament darrere de l'augment de les seccions de les costelles rau en la fórmula per la determinació del moment resistent de la fàbrica, que depèn de la dimensió paral·lela a l'eix estudiat de l'element portant, t , al quadrat. També, si assimilem, a grans trets, el campanar a una barra en voladís amb una càrrega uniformement repartida, s'observa que la inèrcia es troba al denominador de l'expressió de la fletxa màxima i , per tant, com més gran és la inèrcia, més petita és la fletxa produïda per la flexió.

Malauradament, aquest tipus d'intervenció té un gran impacte visual dels elements arquitectònics i en el cas d'un edifici catalogat sembla impensable plantejar una opció d'aquestes característiques.

Per altra banda, l'aplicació d'un esforç de compressió afavoreix que la fàbrica treballi constantment comprimida i, d'aquesta manera, és més complicat que les traccions apareguin. Això pot fer-se aplicant una càrrega per l'aportació de massa externa o per mitjà d'un sistema de tesat.

2.2 El posttesat

La fàbrica té grans qualitats com a material d'elements estructurals i ha estat molt utilitzada en l'arquitectura tradicional, que generalment consta de grans esforços axials de compressió i petites forces horitzontals aplicades.

Un cop aquestes circumstàncies varien i se li demana a la fàbrica que sigui capaç d'aguantar esforços laterals més elevats combinats amb poques forces o cap que li provoquin compressió, aquest material comença a quedar en entredit, degut a la seva baixa resistència a la flexió, al voltant d'un 10%, segons el Codi Tècnic de l'Edificació.

Amb l'objectiu de millorar l'eficàcia dels elements estructurals de fàbrica i també d'ampliar les seves aplicacions, al segle XVIII es va començar a introduir elements d'acer que resistissin les traccions que la fàbrica no podia. Introduint elements metàl·lics entre les juntes longitudinals de morter o afegint barres d'acer cosint diverses filades, la qual cosa s'anomena fàbrica armada, es va aconseguir millorar el seu comportament a la flexió.

Al final dels anys 60, es va començar a treballar amb un mètode alternatiu que també millora la resistència a la flexió de la fàbrica: el tesat. Aquest es basava a introduir una compressió addicional a l'element, de manera que els valors de tracció deguts a la flexió disminuïen. Constructivament, aquest mètode es basa a tensar barres metàl·liques subjectades als extrems de l'element, transferint-li una precompressió que fa més complicat que aquest es vincli. Aquestes barres, a diferència de la fàbrica armada, també poden ser col·locades per l'exterior de l'element, fet molt interessant per a la rehabilitació d'estructures, principalment patrimonials.

2.2.1 Avantatges i inconvenients

• Avantatges

- Amplia considerablement l'aplicació de la fàbrica estructural, degut al gran increment de resistència a les traccions produïdes per la flexió.
- No requereix de tecnologia sofisticada per a la seva aplicació.
- Provoca millors resultats d'eficiència estructural que la ceràmica armada convencional.
- Millora la durabilitat degut a la reducció de les microfissures en els elements.
- Permet utilitzar la fàbrica com a material principal per a elements de l'estructura que fins ara quedaven fora de l'abast o que necessitaven elements de formigó per a fer-los estructuralment estables.
- L'obra de fàbrica deixa de ser fràgil i passa a tenir una certa ductilitat, ja que podrà deformar-se sense col·lapsar.
- Es guanya robustesa en els elements i resistència a l'impacte, afavorint també el seu comportament enfront d'accions accidentals com l'impacte.

• Inconvenients

- En elements horitzontals de l'estructura, generalment és més difícil aconseguir ancoratges apropiats que en el cas de la fàbrica armada.
- Les pèrdues de tesat provoquen que aquest sistema no es pugui portar al límit i alhora es treballi amb coeficients de seguretat elevats.

2.2.2 Durabilitat

Una consideració important quan s'escullen els materials per a un sistema estructural és la durabilitat. Tal com succeeix també amb la fàbrica armada, juga un paper molt important la protecció del reforç, que generalment és de materials metàl·lics com l'acer. Cal analitzar l'ambient de la zona on es col·loca i quin és el grau d'exposició d'aquests elements, per poder escollir una solució que garanteixi la durabilitat del reforç, o optar per acers inoxidable que assegurin l'adequació dels tirants a l'entorn exposat.

2.2.3 Canvis de les forces del tesat: pèrdues i guanys

El valor de l'esforç de tesat variarà en funció de la vida útil de l'estructura. Les variacions que poden rebre les forces del tesat poden donar-se immediatament després de la seva primera aplicació o produir-se al llarg de la vida del sistema. Aquestes variacions, que normalment són pèrdues, poden ser degudes, generalment, per alguna de les següents causes:

- Deformació elàstica de la fàbrica
- Desplaçaments de la fàbrica
- Relaxament dels tirants
- Pèrdues de fricció
- Moviments produïts per la humitat
- Moviments tèrmics de la fàbrica, dels tirants o dels ancoratges
- Expansió de l'argila que conté les peces ceràmiques de la fàbrica

Generalment, la major pèrdua de la força del tesat es produeix degut a la contracció de la fàbrica. Aquesta pèrdua pot ser corregida retesant els tirants. Com que la fàbrica no és realment un material elàstic, aquesta no es contrau immediatament després de l'aplicació del tesat, sinó que ocorre de manera gradual.

El valor de totes les altres pèrdues sol estar entre un 20% i un 25% del valor total de la força aplicada. Això suposa una pèrdua molt significativa, però es mitiga pels coeficients de seguretat que se li apliquen, que tenen valors al voltant de 7.

2.3 Exemples de fàbrica posttesada

2.3.1 La torre de Pisa

Un cas d'un edifici mundialment conegut on s'ha aplicat un tesat mitjançant barres d'acer és la torre de Pisa, Itàlia (figura 1). Aquesta torre de 58,36 m i diàmetre exterior de 15,54 m ha tingut problemes geotècnics des que va ser construïda per la qual cosa es va començar a inclinar, la qual cosa alhora va induir a zones crítiques de concentracions de tensions en algunes parts de l'estructura.

El 1997, s'hi van disposar un sistema de 18 tirants posttesats d'acer de diàmetre 15 mm cadascun per a confinar les zones identificades com a crítiques i alhora per augmentar la resistència del conjunt.



Figura 1: Imatge exterior de la torre de Pisa

2.3.2 La torre de l'oficina central de Correus, a Sydney

Un altre cas important de fàbrica tesada a base de tirants d'acer és l'oficina central de Correus de Sydney. L'objectiu en aquest cas era el de millorar el comportament sísmic de la torre, per mitjà d'un complex sistema de barres que va donar a la torre un comportament molt més monolític enfront d'esforços rasants o de vibració.

A la figura 2, s'ensenya un esquema dels nivells de tesat que es van projectar, com també la localització en planta de les barres verticals, situades als quatre vèrtexs de la planta.

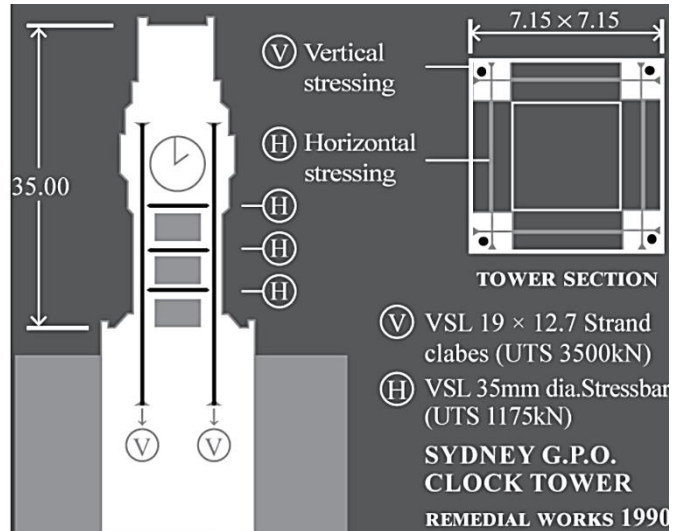


Figura 2: A l'esquerra, fotografia general de l'edifici. A la dreta, l'esquema dels tirants instal·lats a la torre

2.3.3 El campanar de l'església de San Giorgio, a Trignano

Aquest històric campanar està situat a Trignano, a Reggio Emilia, Italia. Té unes dimensions de 18,50 m per una secció en planta de 3,00 x 3,00 m i va quedar molt malmès arran d'un terratrèmol el 1996.

Tres anys més tard, es van començar els treballs de reparació de l'estructura, substituint les peces de fàbrica trencades i rejuntades amb morters de reparació per consolidar la zona. A part, es va dissenyar un elaborat sistema de consolidació estructural on les barres, col·locades a cada vèrtex del quadrat, anaven connectades a unes centraletes que regulaven la compressió de cada un dels tirants per tal de no crear descompensacions entre ells.

Aquesta solució ha estat considerada com la primera aplicació d'aquest mètode en una torre patrimonial d'obra de fàbrica.

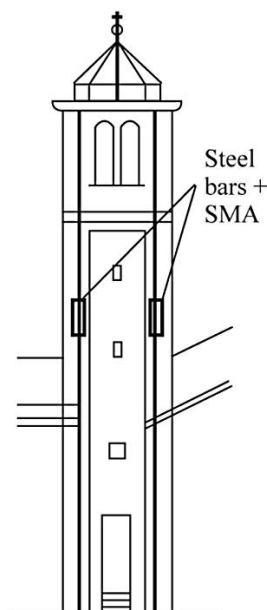


Figura 3: A l'esquerra, el campanar. Al centre, l'esquema dels elements del tesat. A la dreta, detall de la centraleta

3 Campanar de Vistabella: història i geometria

3.1 Josep M. Jujol, un arquitecte singular

Josep M. Jujol i Gibert neix a Tarragona el 16 de setembre de 1879. El 1888 la família Jujol es va traslladar a Barcelona, a la vila de Gràcia. El 1906 es va graduar juntament amb una promoció de futurs arquitectes, entre els quals destaca el seu amic Rafel Masó i Valentí.

La seva formació gira a l'entorn del mestratge de Lluís Domènech i Montaner, director en aquells anys de l'Escola d'Arquitectura de Barcelona, i d'Antoni Gaudí; encara que va fer les seves primeres pràctiques al taller d'Antoni M. Gallissà, deixeble de Domènech, entre el 1901 i el 1903, amb qui va complementar la seva formació acadèmica amb l'exercici del disseny. També va treballar amb l'arquitecte Josep Font i Gumà.

De la relació professional amb Antoni Gaudí, iniciada el 1906, existeix el debat sobre si cal definir-la en qualitat de deixeble o de col·laborador; ja que Jujol, gràcies al seu talent, obtindrà sota les ordres de Gaudí progressius marges de llibertat creadora. De Gaudí va heretar la manera d'entendre la construcció o el tractament dels materials, però amb el bagatge gaudinià Jujol aprèn a desenvolupar la seva pròpia obra feta amb materials i recursos pobres, la qual no busca sumptuositat: per això estudiosos de l'obra jujoliana, com Carlos Flores, afirmen que seria un error considerar l'arquitecte tarragoní un simple epígon de Gaudí.

La seva gran capacitat com a dibuixant va tenir una importància cabdal en la seva formació i un dels aspectes distintius de la seva obra és el seu domini del color i de la cal·ligrafia. Com a dissenyador va incorporar el ferro forjat en edificis o en treballs d'ebenisteria.

El seu primer encàrrec important com a arquitecte li va arribar el 1908 amb la construcció del Teatre per al Patronat Obrer de Tarragona. No es tracta d'enumerar en aquest apartat tots els projectes en els quals va participar, però resseguint la cronologia de la seva trajectòria professional queda palès que va treballar sobretot a les demarcacions de Tarragona i Barcelona, encara que també a Lleida, projectant obra nova, remodelant i fent tasques com a dissenyador.

Jujol va admirar l'art italià, especialment en l'època romana i barroca, la qual cosa el va impulsar a aprendre l'idioma i a fer-se soci de l'Institut Italià de Barcelona. Quan el 1927 es va casar amb Teresa Gibert no va dubtar a realitzar el seu viatge de noces per Itàlia.

Segons Carlos Flores, la innovació, el modernisme i la modernitat de l'obra de Jujol no va tenir un reflex lluït en el seu nivell de vida, que va ser modest. En el currículum, que el 1928 ell mateix va escriure a mà, apareix com a professor de l'Escola d'Arquitectura i de l'Escola de Treball, com a conferenciant, com a vocal de tribunal d'oposicions i hi fa una relació de les exposicions en què va participar; malgrat tot, en morir l'any 1949, la família no va quedar en una situació econòmica acomodada. Jujol havia estat arquitecte municipal sense sou a Sant Joan Despí i, segons la seva biografia, des de 1940 es va dedicar a restaurar esglésies destruïdes sense cobrar honoraris.

3.2 Les traces de Jujol

Seguint Ignasi de Solà-Morales, tot i que ni ideològicament ni tècnicament l'obra de Jujol es pugui associar oficialment a les avantguardes del segle XX ni que l'arquitecte tarragoní hi tingués cap intenció, les seves aportacions es poden interpretar com una certa anticipació, almenys formalment, dels moviments d'avantguarda posteriors, com ara en l'aplicació de la tècnica del *collage* o en el drenatge automàtic d'idees, que podria entroncar, salvant les distàncies, amb l'exteriorització del subconscient postulat per André Breton. Així mateix, fent una prolepsi temporal i observant les formes dels edificis de l'església de Vistabella i del museu Guggenheim de Bilbao, alguns autors com Dennis L. Dollens hi han vist similituds; encara que, segons aquest mateix autor, no es pugui afirmar que Jujol hagi influït en Gehry. No obstant això, sembla que alguns dels interessos de Jujol s'han actualitzat en la història de l'arquitectura més recent.

Josep M. Jujol utilitzava materials trencats o reciclats per crear. Aquesta praxi simple i austera unida a la seva convicció religiosa ha fet que s'utilitzés l'expressió "esperit franciscà" per referir-se als seus dissenys. Posteriorment, en la segona meitat de la dècada dels anys 60 a Itàlia, aquest tipus d'estètica donarà lloc a un moviment artístic conegut amb el nom d'*arte povera*.

La tradició conceptual en la qual es va formar Josep M. Jujol procedia del debat iniciat per Eugène Viollet-le-Duc, amb un interès més centrat en l'estructura que en els elements decoratius dels edificis. En el cercle de Gaudí la problemàtica estructural també esdevé un tema central. Per a Jujol aquesta prioritat per l'estructura adquireix més importància en els edificis públics i especialment en els temples que projecta, un dels quals és l'església del Sagrat Cor de Vistabella, un indret que pertany al municipi de la Secuita, en ple Camp de Tarragona.

3.3 L'església del Sagrat Cor de Vistabella

El període creatiu més destacat de Jujol va ser entre el 1913 i el 1923. Cinc edificis –la Torre de la Creu (1913), Casa Bofarull (1914), Casa Negra (1915), l'església de Vistabella (1918) i la Casa Planells (1923)– han estat titllats de fenomenologia arquitectònica perquè van conformar-se d'una manera molt diferent de la dels treballs dels arquitectes predecessors o contemporanis. El conjunt d'aquestes cinc construccions manifesten la visió arquitectònica personal de Jujol. L'arquitecte Josep M. Jujol buscava l'assoliment d'una obra d'art total o *gesamkunstwerk*. Perseguia la consecució de solucions unitàries on es fongués arquitectura i interiorisme.

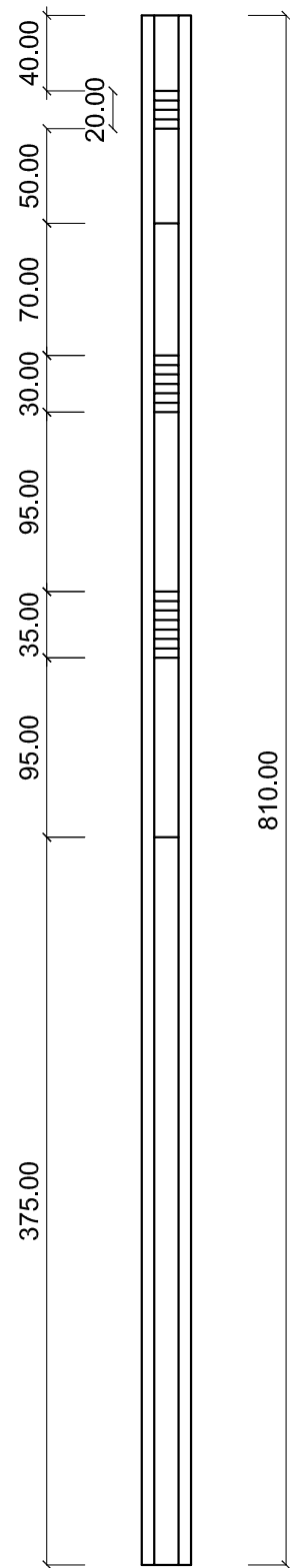
L'església parroquial de Vistabella està situada en un indret rural. Està considerada, juntament amb l'església de Montferri, l'edifici amb més complexitat de tota l'obra de Jujol. El temple va ser projectat el 1918 i va ser consagrat el 1923. El seu cost va ser sufragat bàsicament amb les aportacions de feligresos i propietaris locals.

L'entrada està situada en una cantonada. Aquest aprofitament del xamfrà per fer-hi l'entrada també es troba en molts edificis de l'arquitecte holandès Hendrik Petrus Berlage. Si bé Jujol només va viatjar a l'estranger en una ocasió, Ignasi de Solà-Morales afirma que és incontestable la curiositat que Jujol sentia per l'obra d'Olbrich, Makintosh o el mateix Berlage.

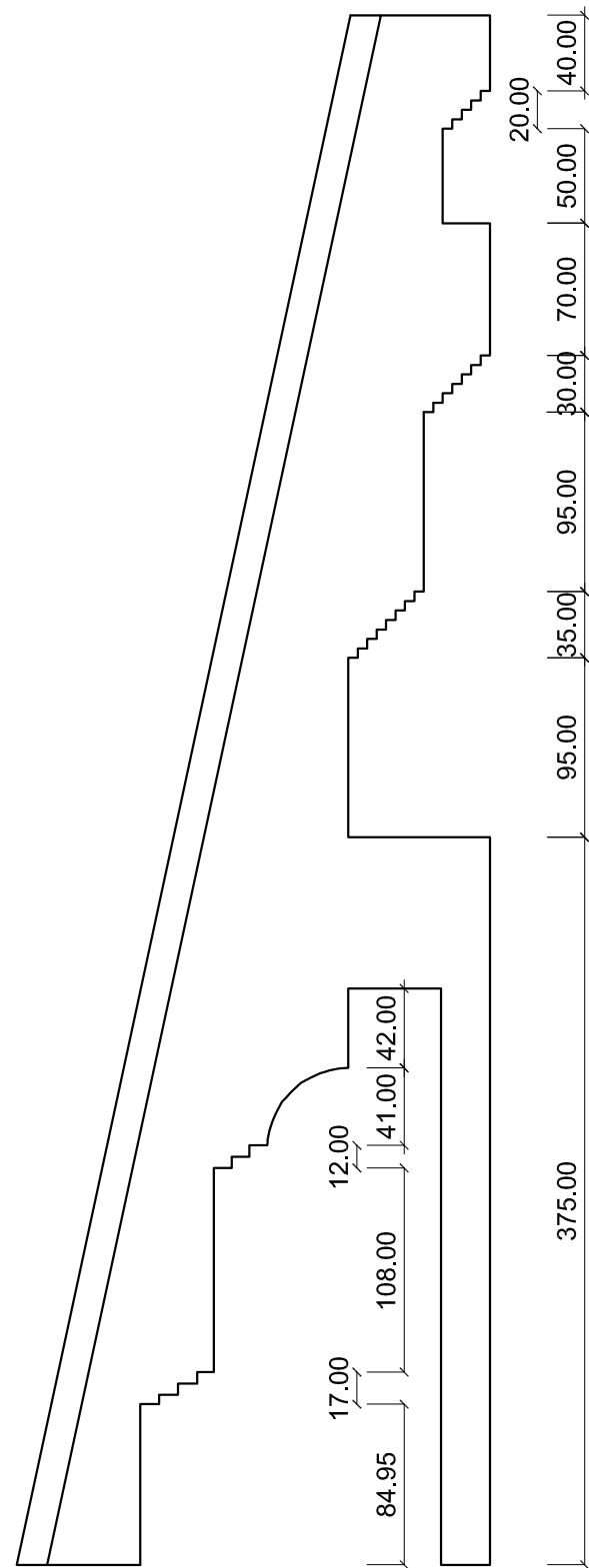
L'edifici conté una gran volta de creueria amb arcs parabòlics. Per damunt de l'encreuament dels dos arcs de la volta s'eleva el campanar, de planta hexagonal a la base i triangular a mesura que puja i convergeix en forma de pinacle. La biografia de l'arquitecte tarragoní explica que els seus progenitors li van inculcar els valors catòlics des de la infància. Aquesta dada vital és important perquè entronca amb la seva obra; ja que, l'edificació simple i tosca de Vistabella s'ha interpretat, per autors com Dennis L. Dollens, com una metàfora del camí tortuós cap a l'espiritualitat.

El temple té una planta romboïdal. El fet que Jujol convertís un quadrat en rombe li va permetre situar quatre pilars de manera que es formés una intersecció de braços que dibuixa una creu grega dins del rombe. L'església de Vistabella és una estructura amb parets fortificades, voltes catalanes i un campanar. Aquest intent d'utilitzar el *collage* arquitectònic, on les formes triangulars s'uneixen amb les formes rodones de les voltes, "constitueix una evolució evaporativa de les formes i situa Jujol dintre d'un petit grup d'artistes del segle XX." [Dollens et al., 1998]

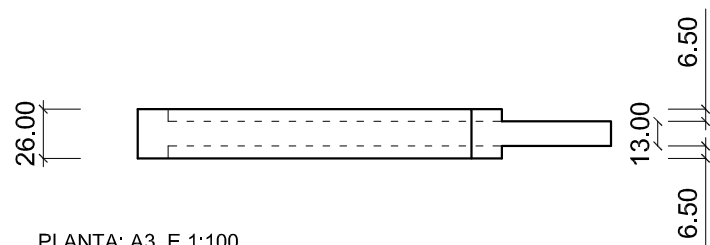
4. Documentació gràfica



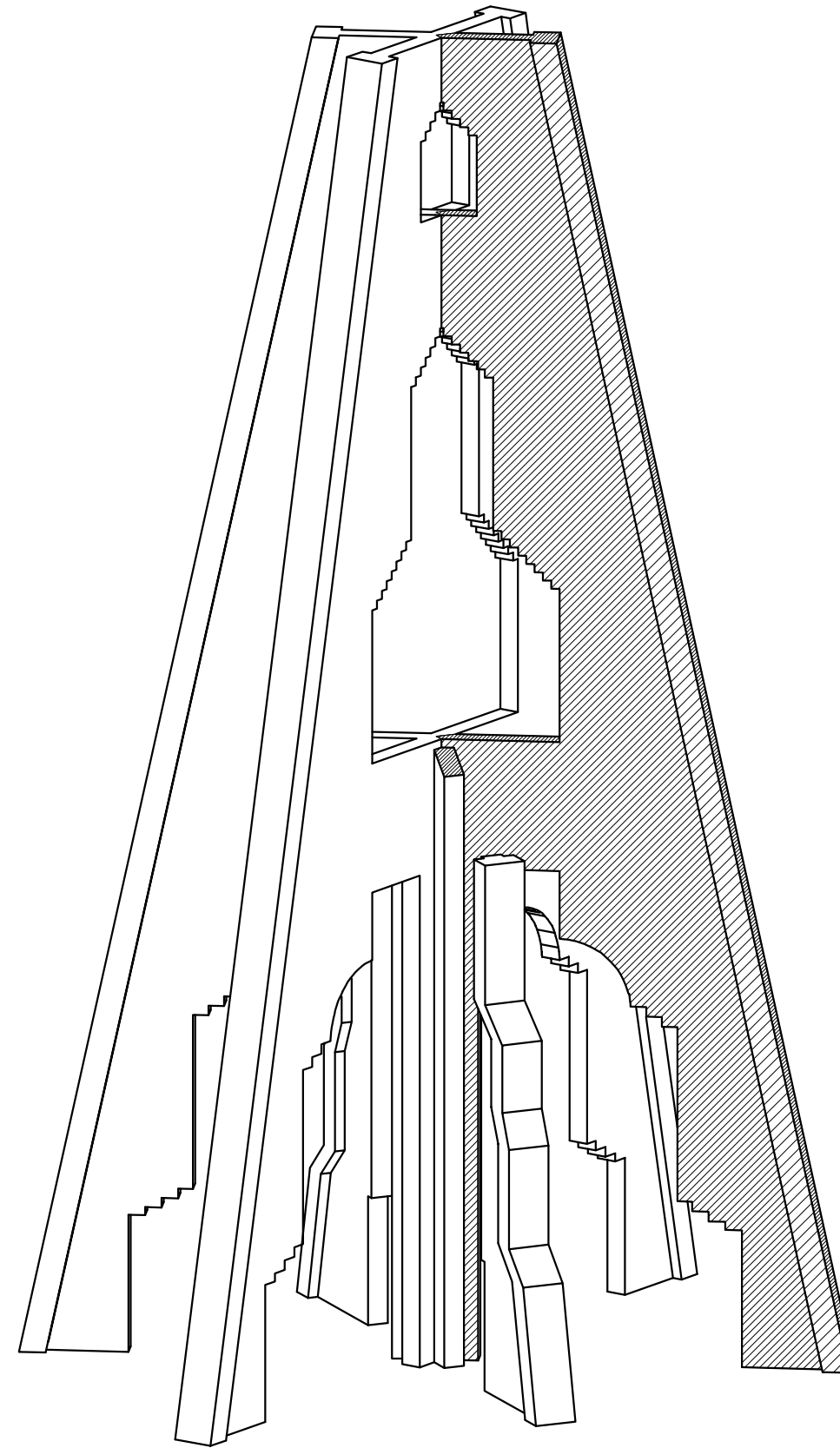
ALÇAT LATERAL: A3_E 1:100



ALÇAT FRONTAL: A3_E 1:100



PLANTA: A3_E 1:100



VISTA EN PERSPECTIVA

GEOMETRIA I COTES

E: VEURE DETALLS

COSTELLES DEL CAMPANAR
COTES VERTICALS

COSTELLES PRINCIPALS

01

Curs 2016/17

UNIVERSITAT DE GIRONA
Grau en Arquitectura Tècnica
Treball Final de Grau

6.50 6.40

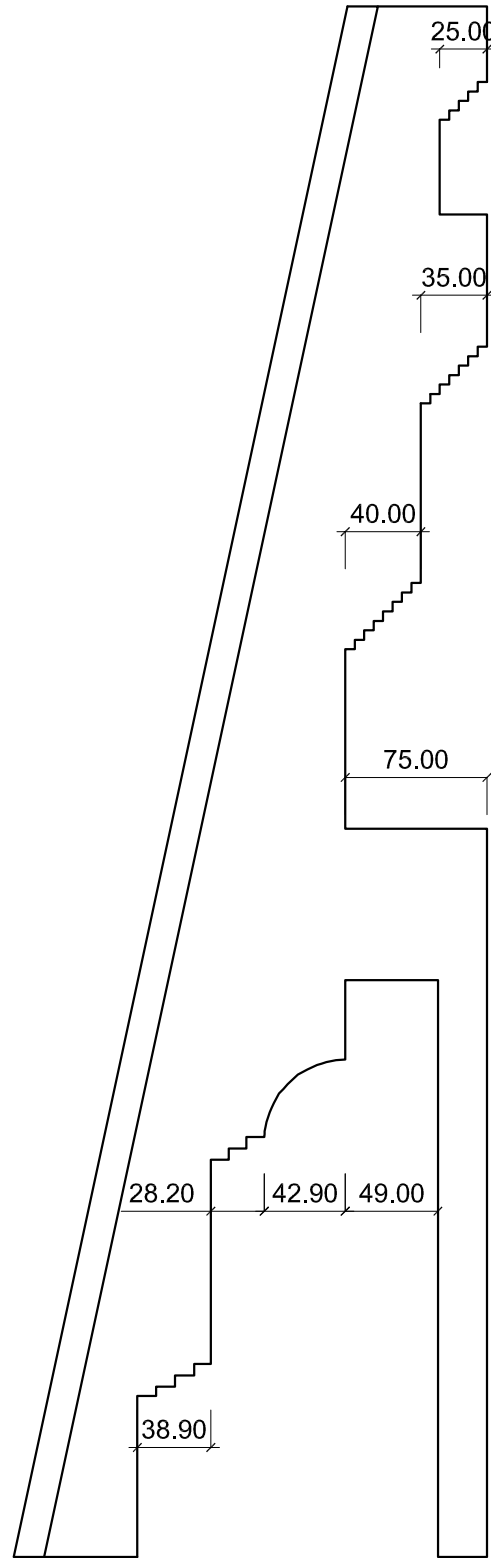
13.00



26.00

ALÇAT LATERAL: A3_E 1:100

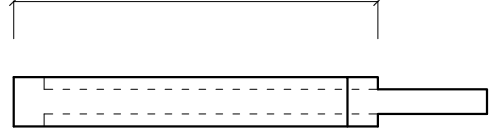
16.00 57.84



16.00 49.39 159.00 26.00

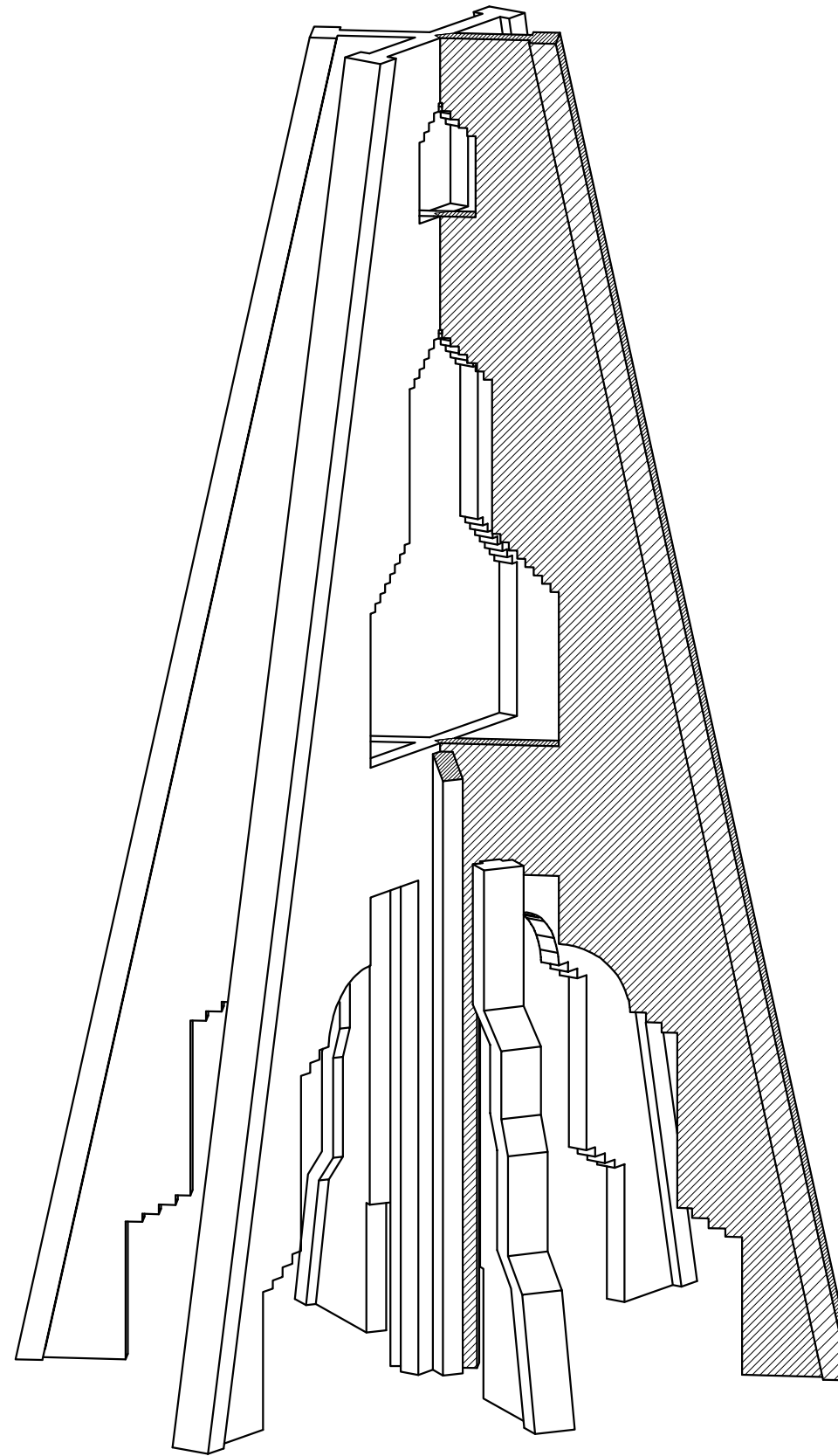
ALÇAT FRONTAL: A3_E 1:100

192.56



16.00 176.56 57.84

PLANTA: A3_E 1:100



VISTA EN PERSPECTIVA

GEOMETRIA I COTES

E: VEURE DETALLS

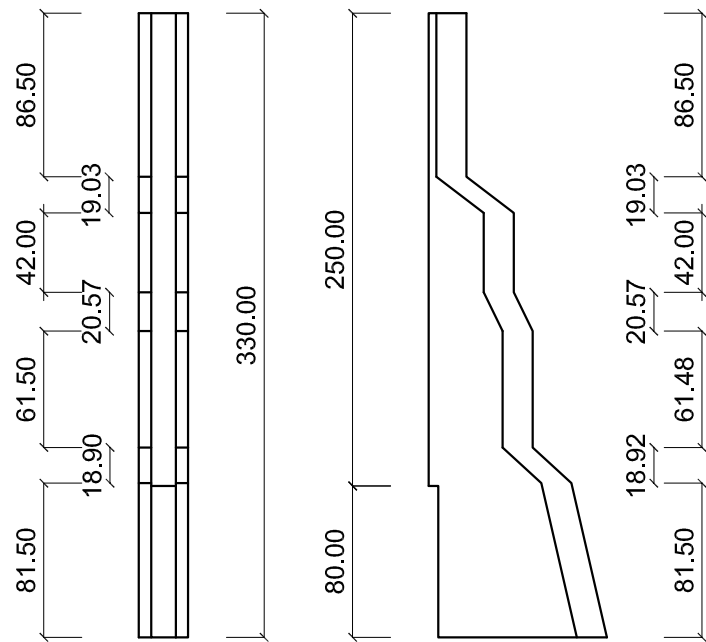
COSTELLES DEL CAMPANAR
COTES HORIZONTALS

COSTELLES PRINCIPALS

02

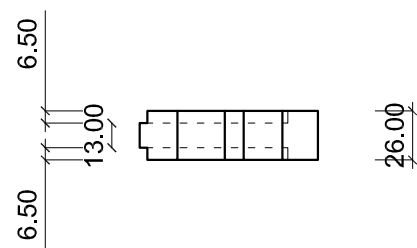
Curs 2016/17

UNIVERSITAT DE GIRONA
Grau en Arquitectura Tècnica
Treball Final de Grau

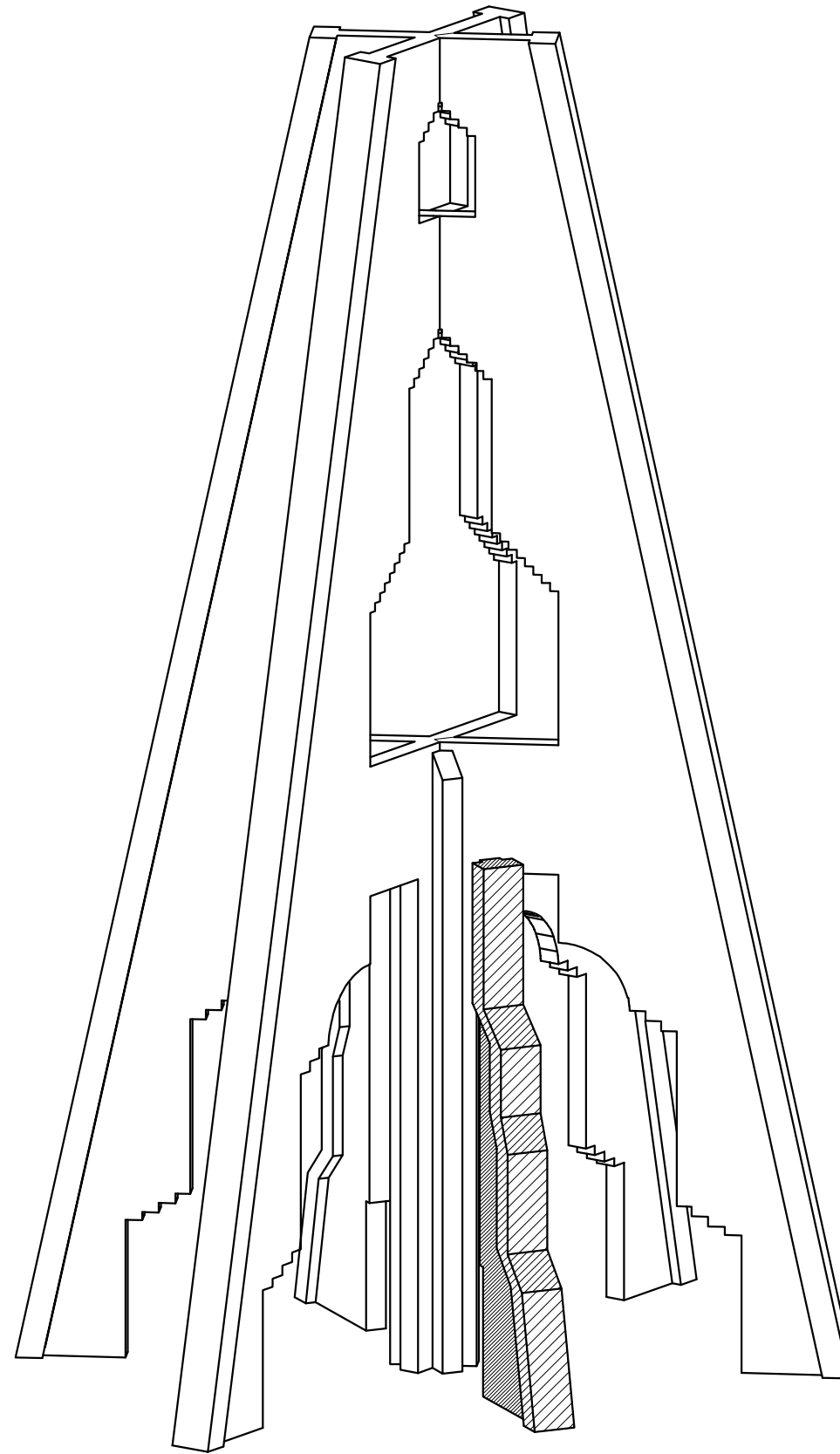


ALÇAT LATERAL: A3_E 1:100

ALÇAT FRONTAL: A3_E 1:100



PLANTA: A3_E 1:100



VISTA EN PERSPECTIVA

GEOMETRIA I COTES

E: VEURE DETALLS

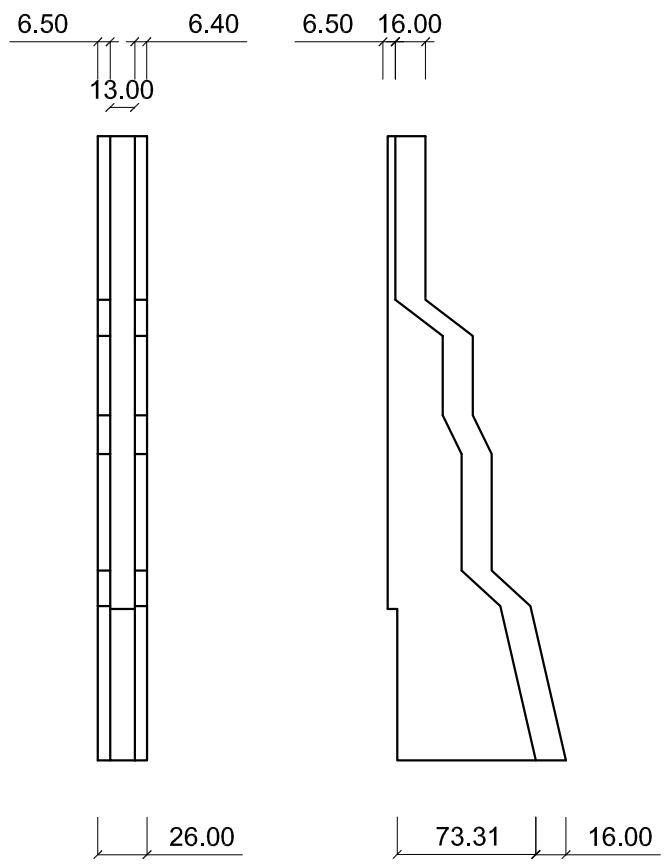
COSTELLES DEL CAMPANAR
COTES VERTICALS

COSTELLES SECUNDÀRIES

03

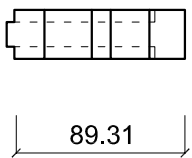
Curs 2016/17

UNIVERSITAT DE GIRONA
Grau en Arquitectura Tècnica
Treball Final de Grau

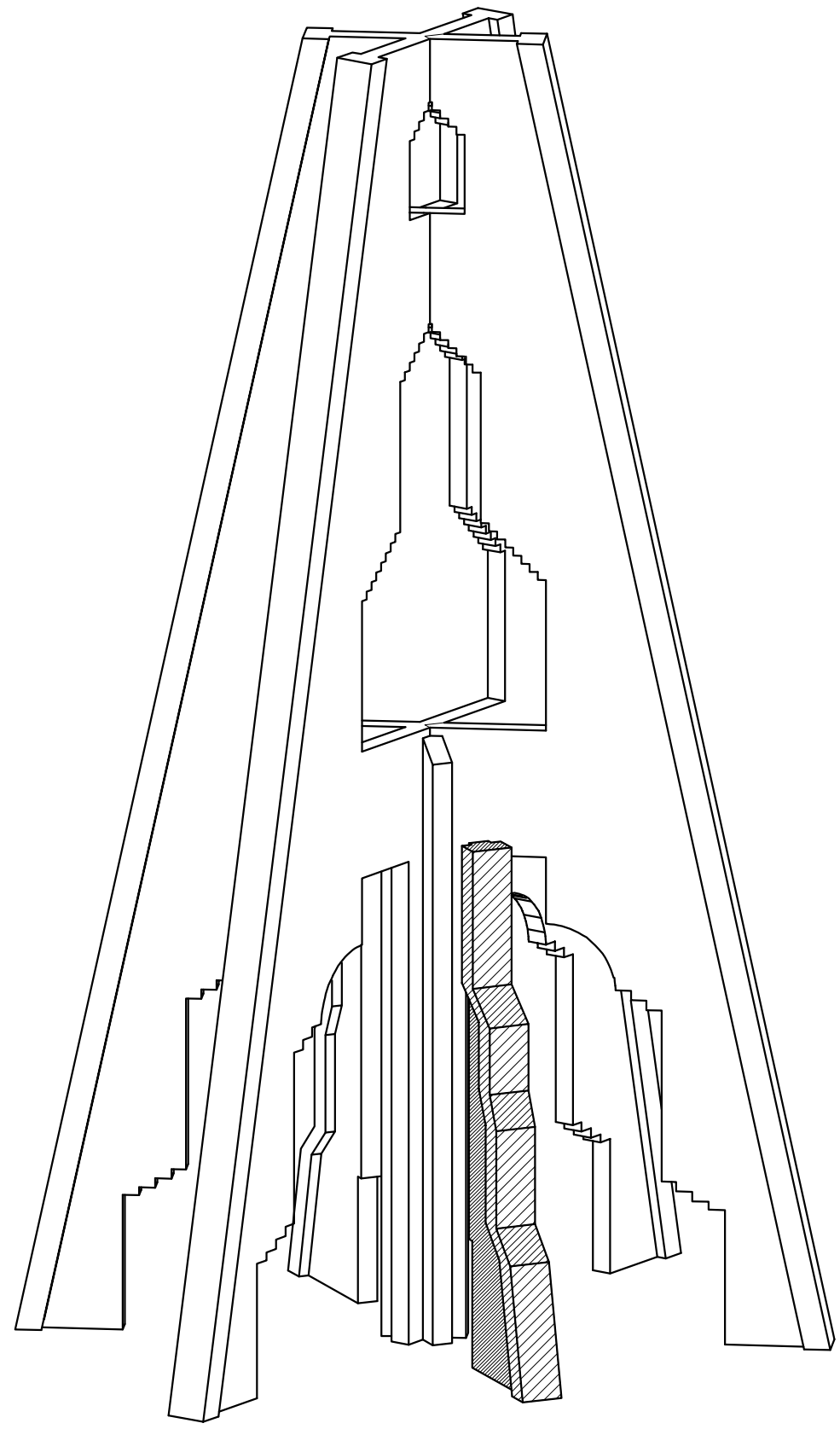


ALÇAT LATERAL: A3_E 1:100

ALÇAT FRONTAL: A3_E 1:100



PLANTA: A3_E 1:100



VISTA EN PERSPECTIVA

GEOMETRIA I COTES

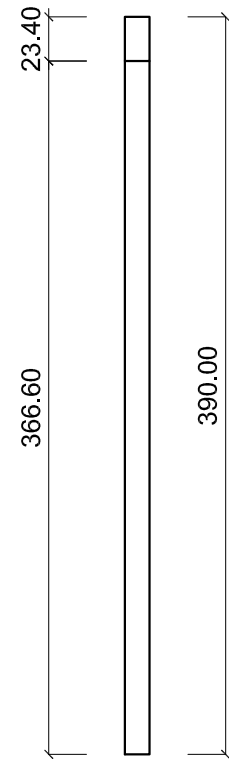
E: VEURE DETALLS

COSTELLES DEL CAMPANAR
COTES HORIZONTALS
COSTELLES SECUNDÀRIES

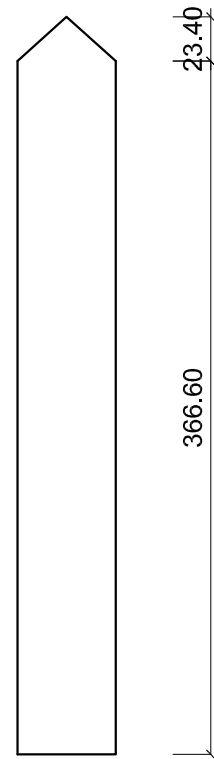
04

Curs 2016/17

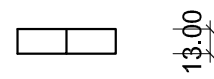
UNIVERSITAT DE GIRONA
Grau en Arquitectura Tècnica
Treball Final de Grau



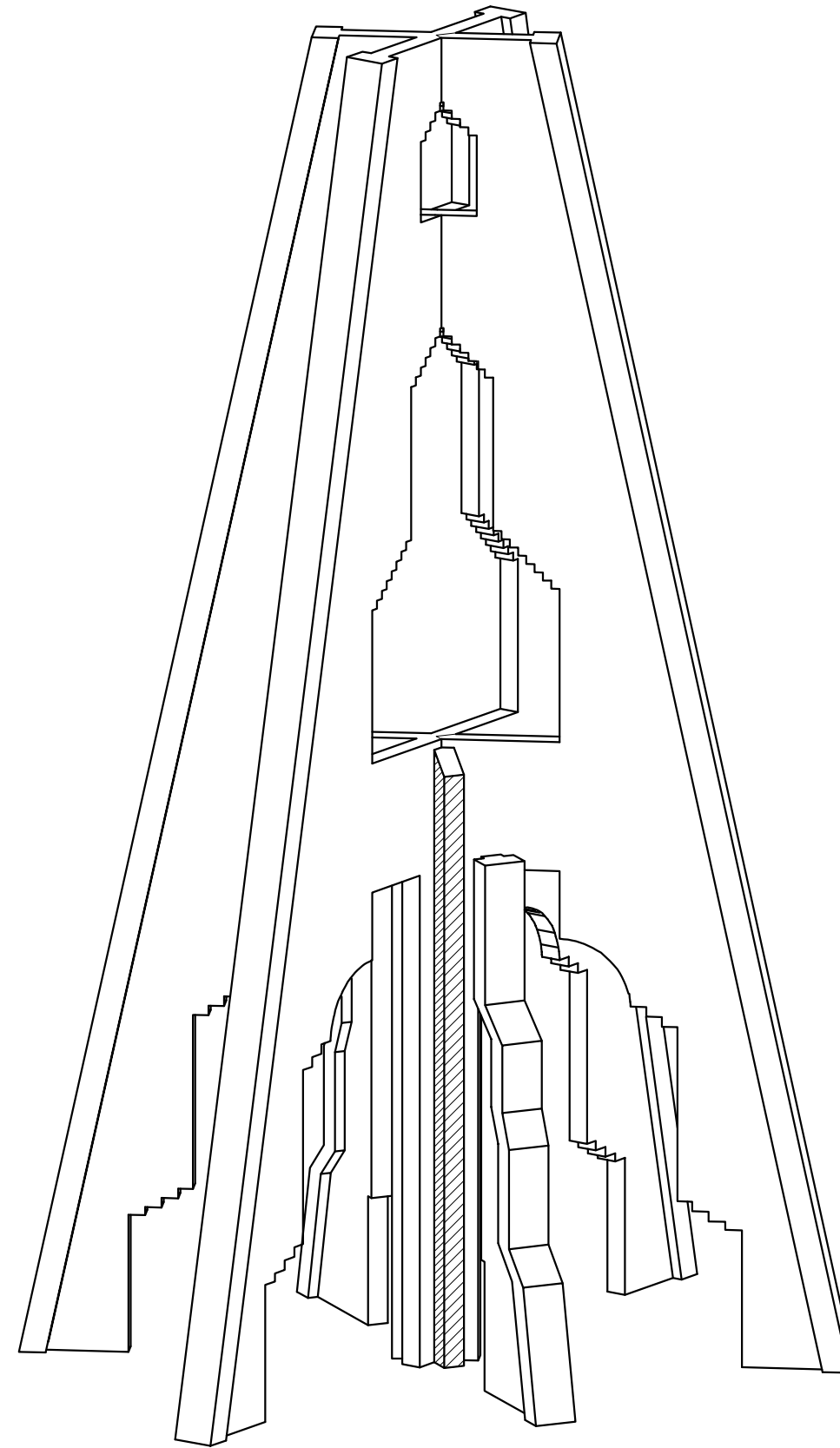
ALÇAT LATERAL: A3_E 1:100



ALÇAT FRONTAL: A3_E 1:100



PLANTA: A3_E 1:100



VISTA EN PERSPECTIVA

GEOMETRIA I COTES

E: VEURE DETALLS

COSTELLES DEL CAMPANAR
COTES VERTICALS

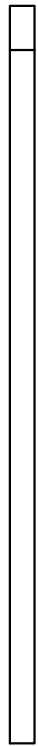
COSTELLES SECUNDÀRIA CENTRAL

05

Curs 2016/17

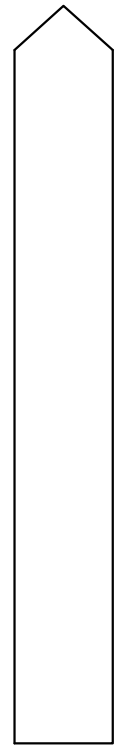
UNIVERSITAT DE GIRONA
Grau en Arquitectura Tècnica
Treball Final de Grau

13.00



ALÇAT LATERAL: A3_E 1:100

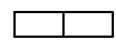
26.00 26.00



52.00

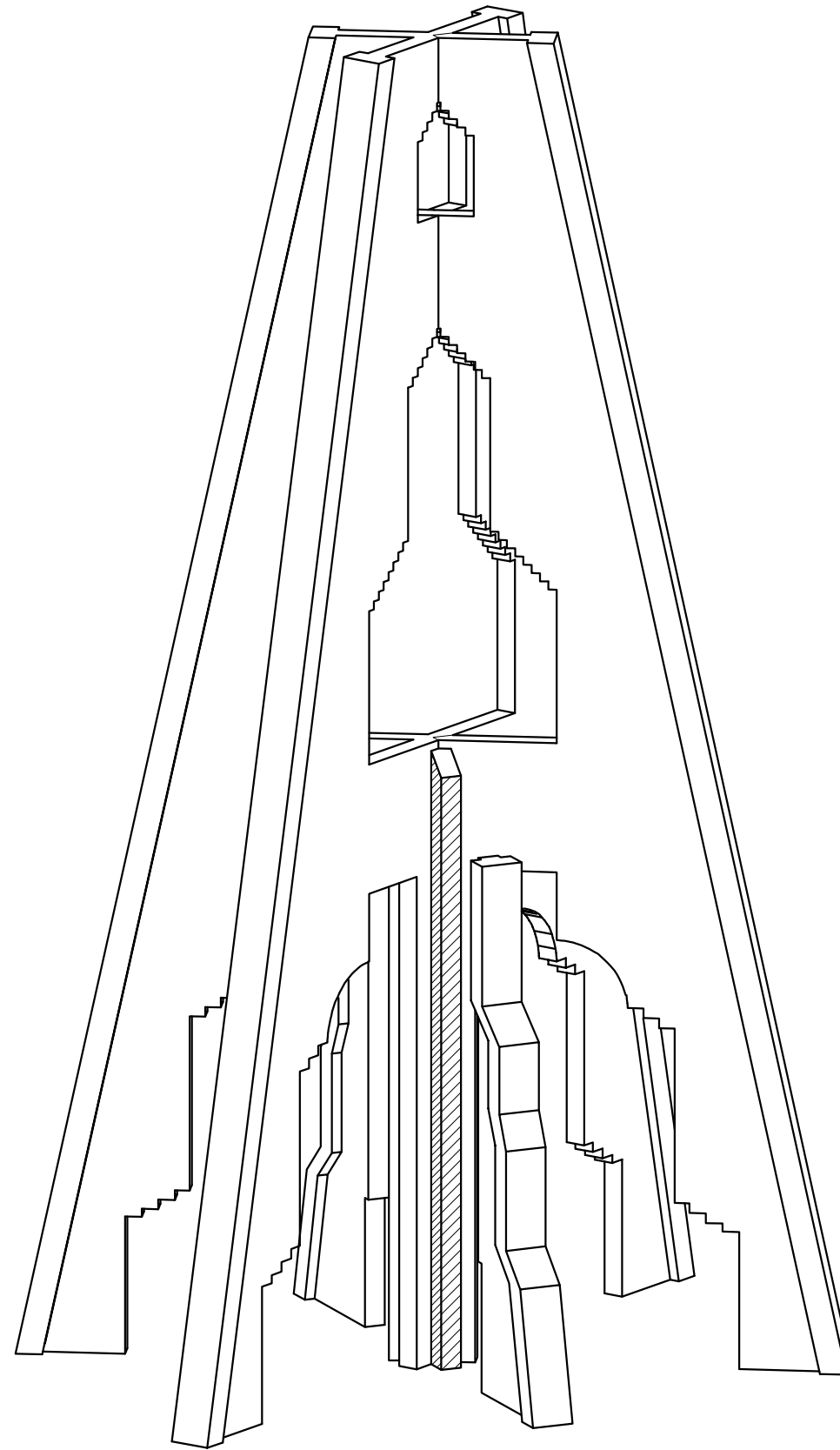
ALÇAT FRONTAL: A3_E 1:100

52.00



26.00 26.00

PLANTA: A3_E 1:100



VISTA EN PERSPECTIVA

GEOMETRIA I COTES

E: VEURE DETALLS

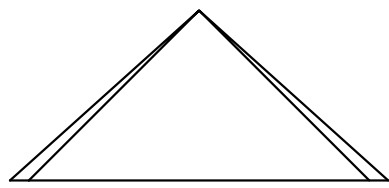
COSTELLES DEL CAMPANAR
COTES HORITZONTALS

COSTELLES SECUNDÀRIA CENTRAL

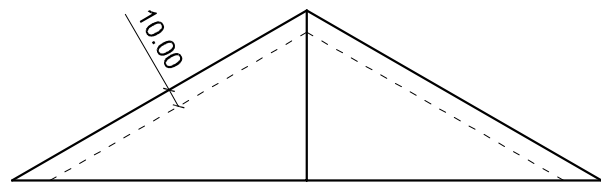
06

Curs 2016/17

UNIVERSITAT DE GIRONA
Grau en Arquitectura Tècnica
Treball Final de Grau



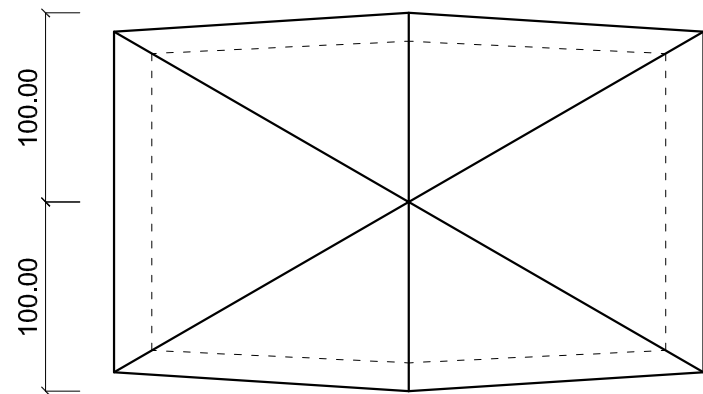
90.00



90.00

ALÇAT LATERAL: A3_E 1:100

ALÇAT FRONTAL: A3_E 1:100

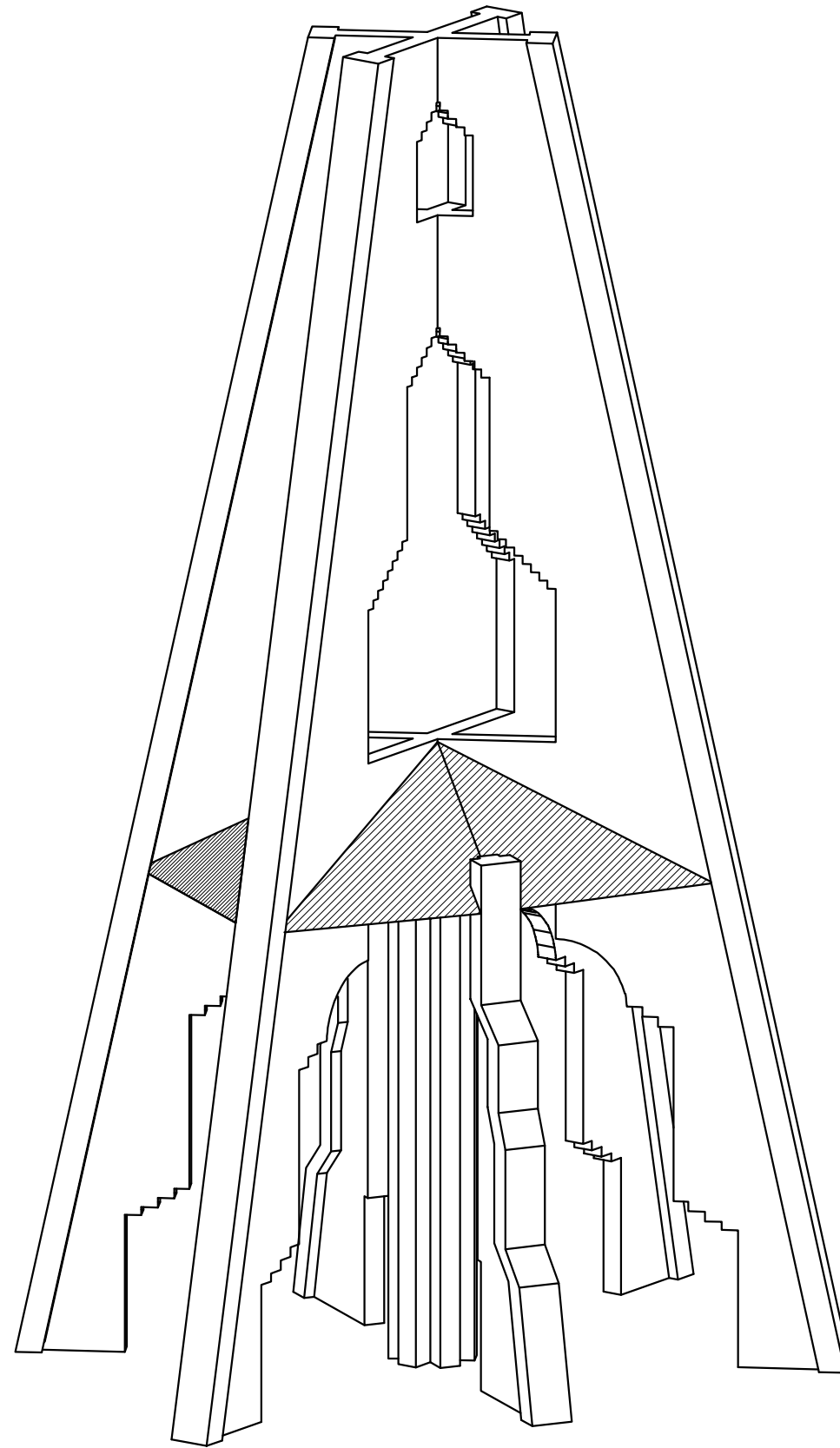


100.00

100.00

180.00

PLANTA: A3_E 1:100



VISTA EN PERSPECTIVA

GEOMETRIA I COTES

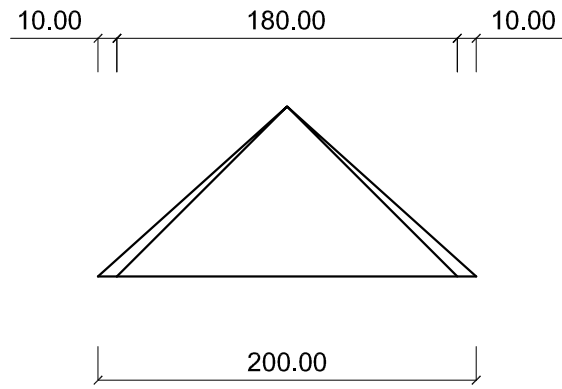
E: VEURE DETALLS

REPLÀ
COTES VERTICALS

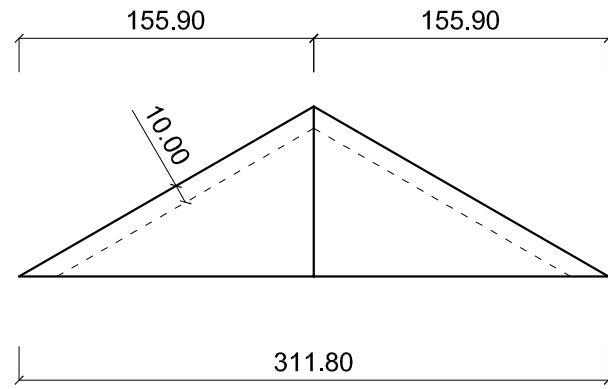
07

Curs 2016/17

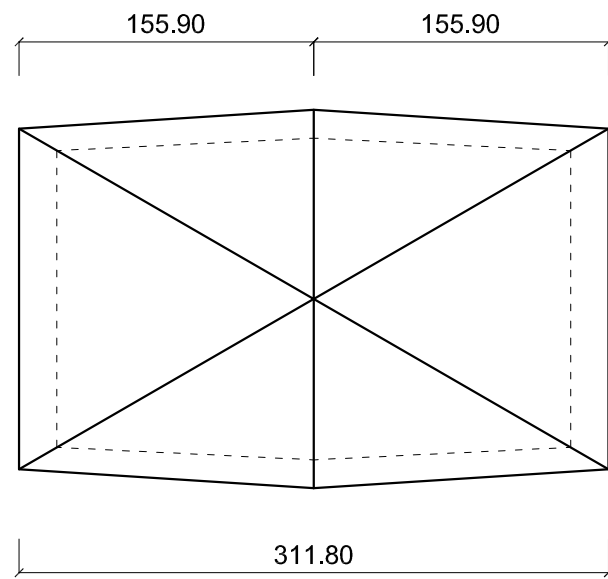
UNIVERSITAT DE GIRONA
Grau en Arquitectura Tècnica
Treball Final de Grau



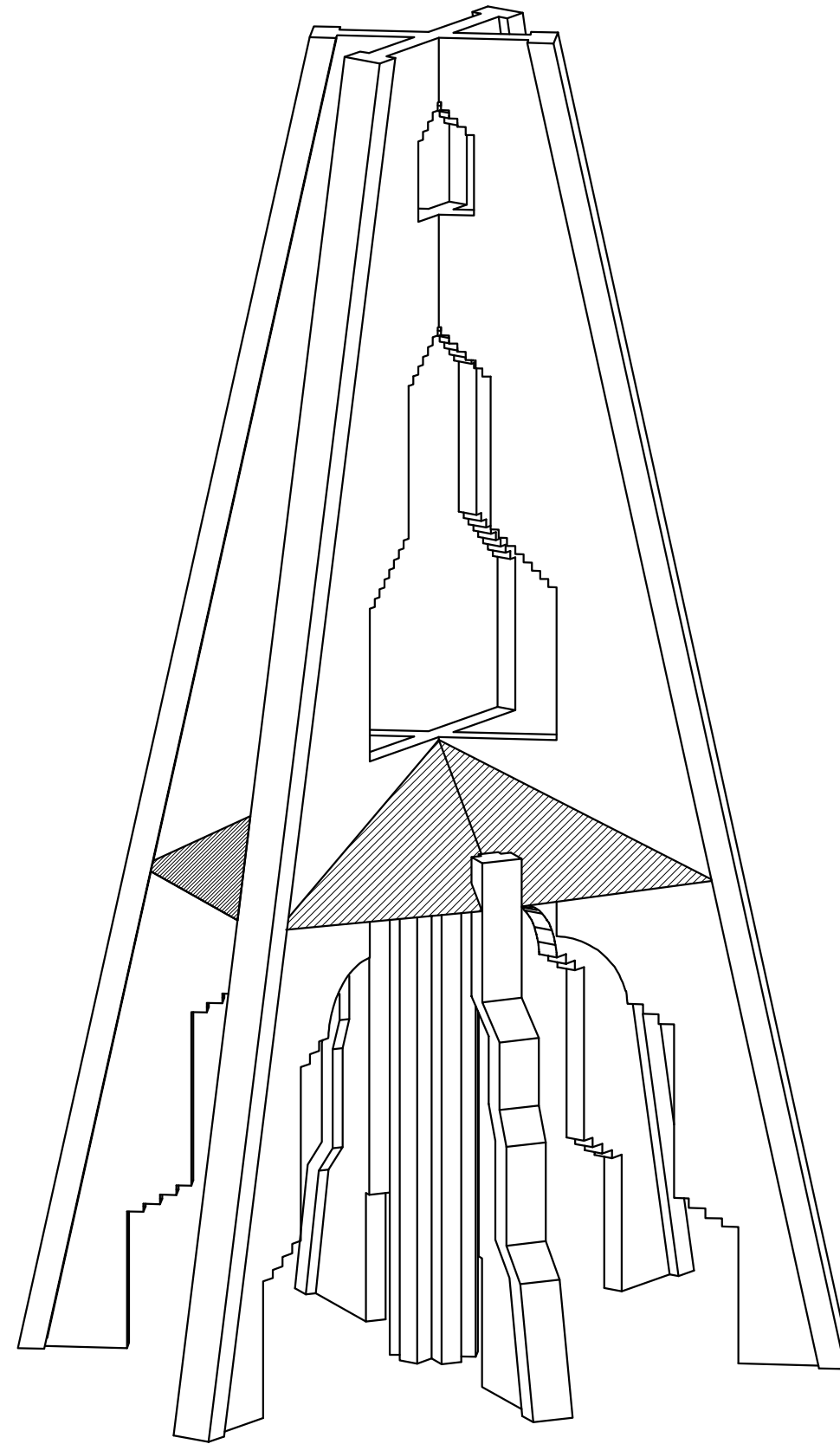
ALÇAT LATERAL: A3_E 1:100



ALÇAT FRONTAL: A3_E 1:100



PLANTA: A3_E 1:100



VISTA EN PERSPECTIVA

GEOMETRIA I COTES

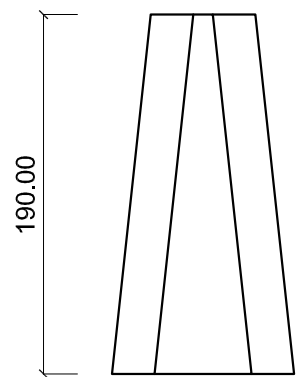
E: VEURE DETALLS

REPLÀ
COTES HORIZONTALS

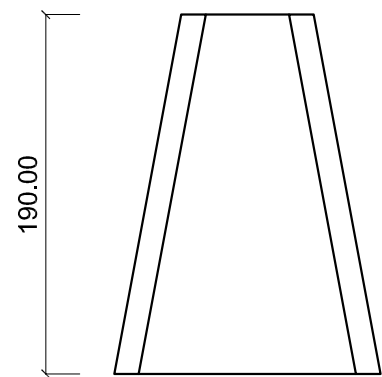
08

Curs 2016/17

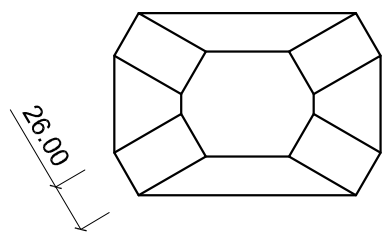
UNIVERSITAT DE GIRONA
Grau en Arquitectura Tècnica
Treball Final de Grau



ALÇAT LATERAL: A3_E 1:100

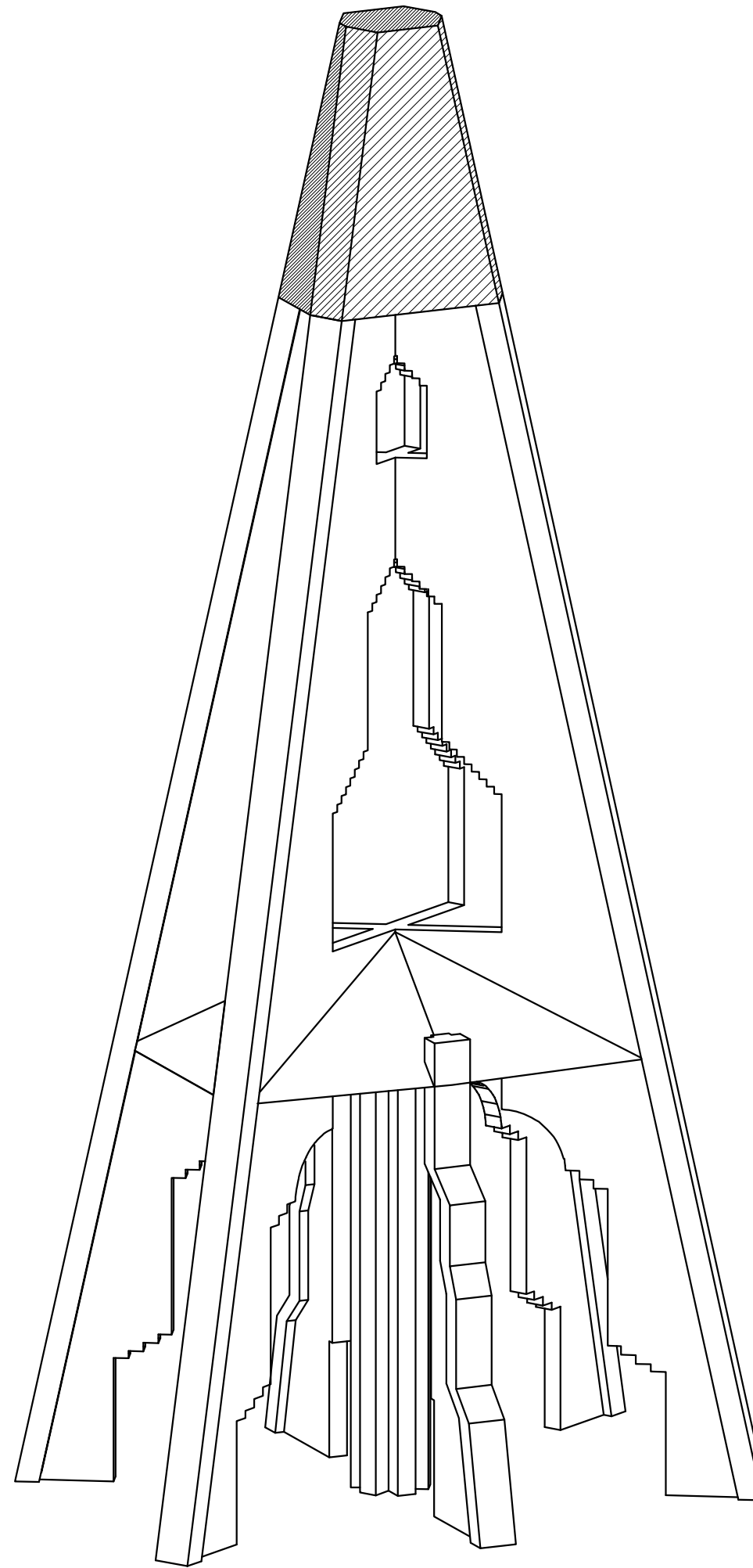


ALÇAT FRONTAL: A3_E 1:100



PLANTA: A3_E 1:100

22.52 | 51.30 | 22.52



VISTA EN PERSPECTIVA

GEOMETRIA I COTES

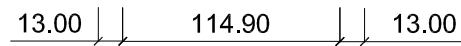
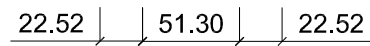
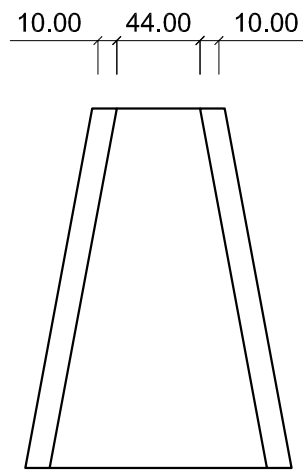
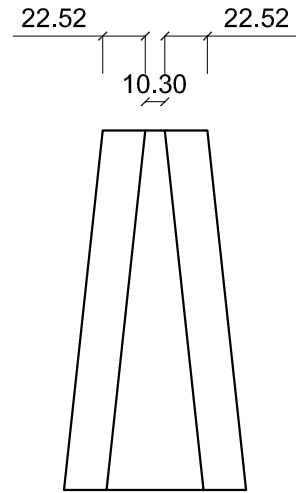
E: VEURE DETALLS

CORONAMENT
COTES VERTICALS

09

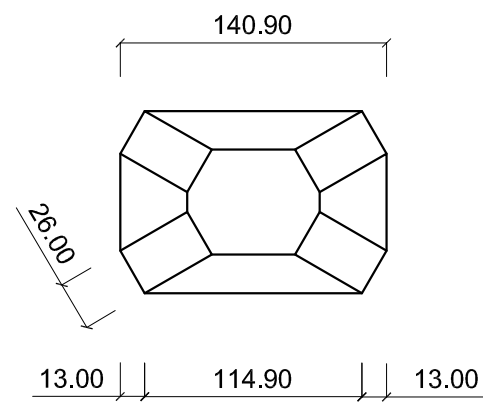
Curs 2016/17

UNIVERSITAT DE GIRONA
Grau en Arquitectura Tècnica
Treball Final de Grau

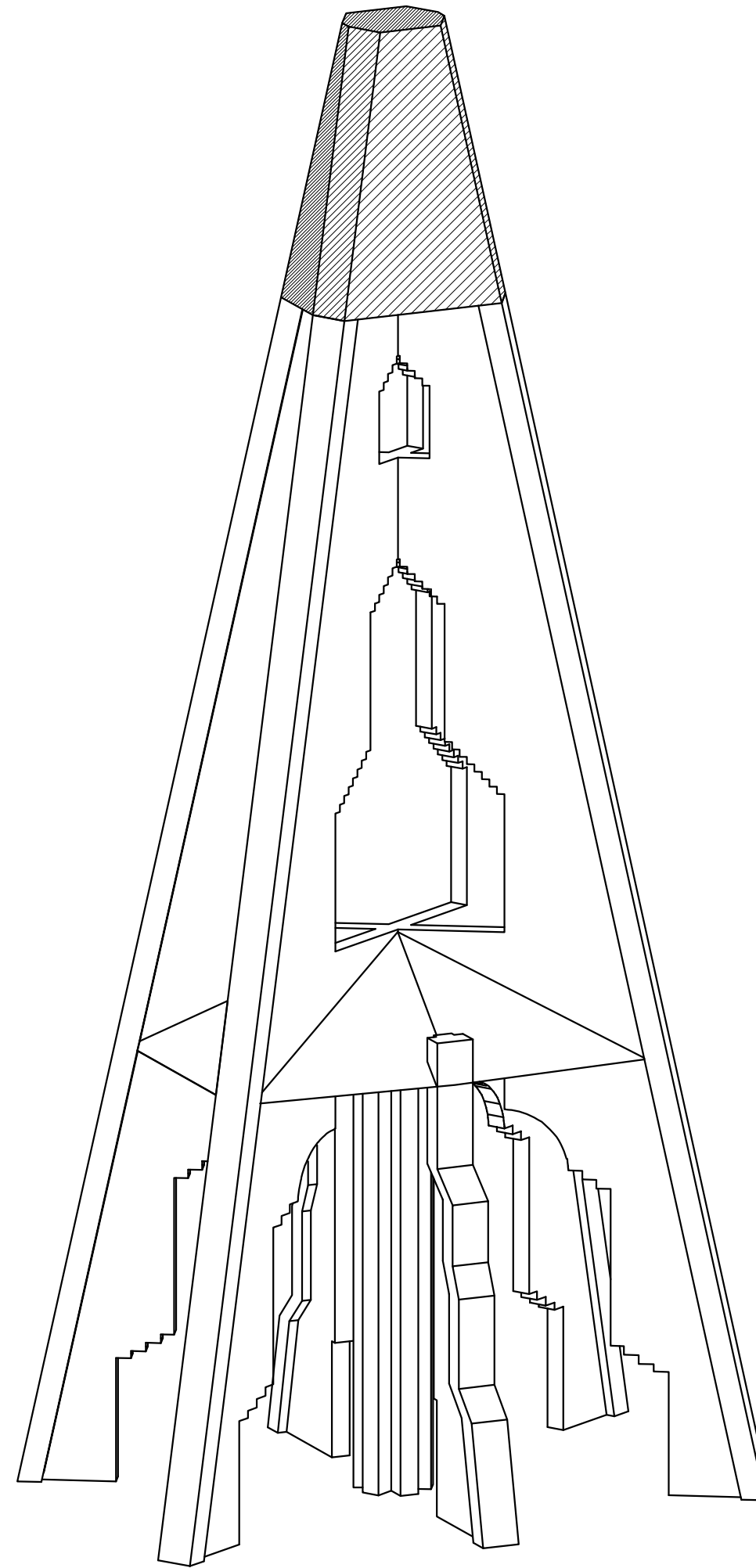


ALÇAT LATERAL: A3_E 1:100

ALÇAT FRONTAL: A3_E 1:100



PLANTA: A3_E 1:100



VISTA EN PERSPECTIVA

GEOMETRIA I COTES

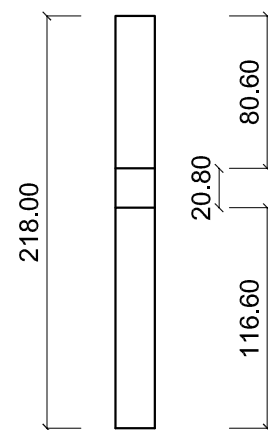
E: VEURE DETALLS

CORONAMENT
COTES HORIZONTALS

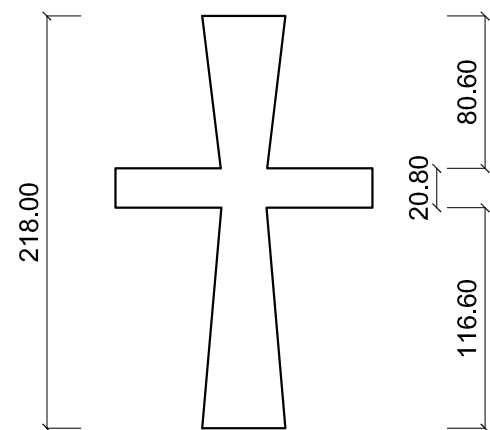
10

Curs 2016/17

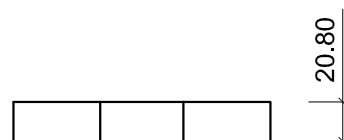
UNIVERSITAT DE GIRONA
Grau en Arquitectura Tècnica
Treball Final de Grau



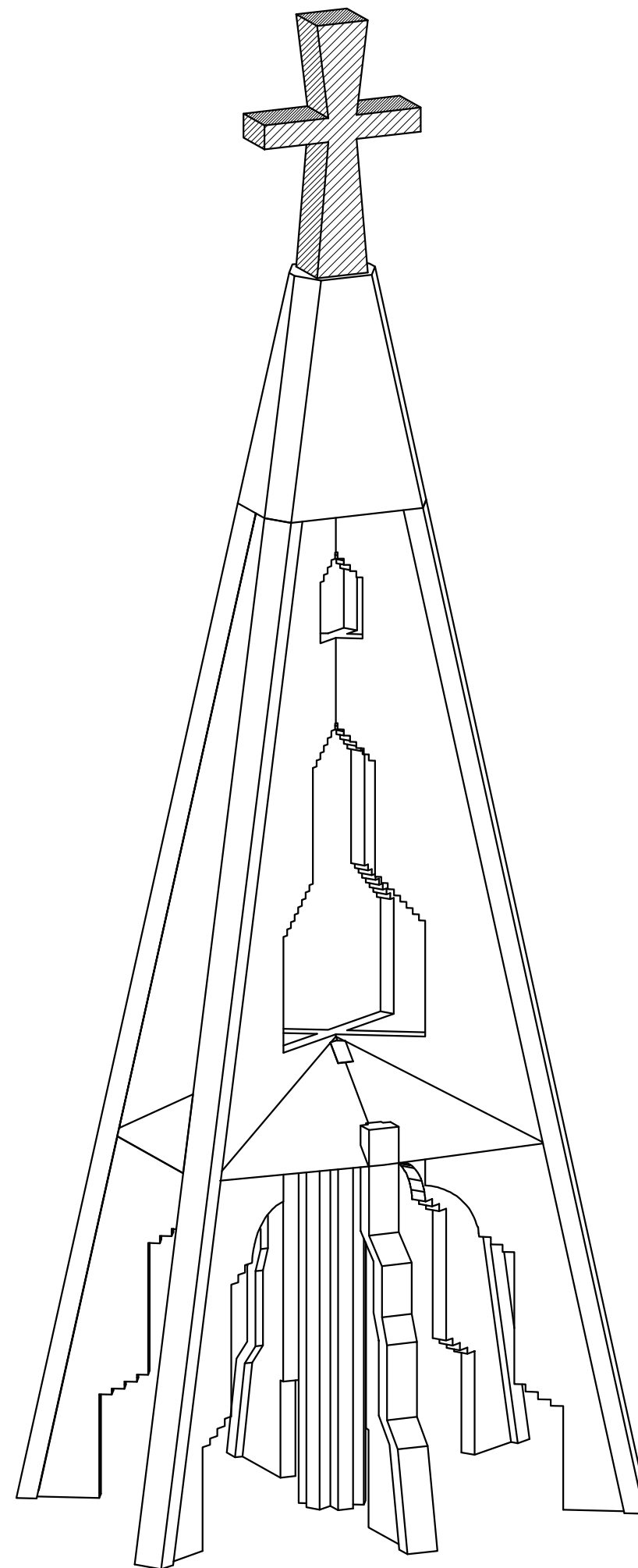
ALÇAT LATERAL: A3_E 1:100



ALÇAT FRONTAL: A3_E 1:100



PLANTA: A3_E 1:100



VISTA EN PERSPECTIVA

GEOMETRIA I COTES

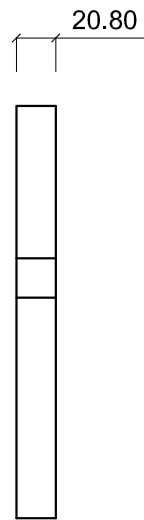
E: VEURE DETALLS

CREU DE CORONAMENT
COTES VERTICALS

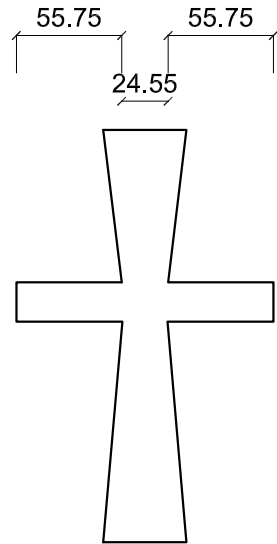
11

Curs 2016/17

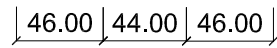
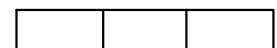
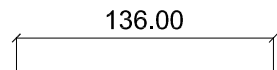
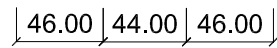
UNIVERSITAT DE GIRONA
Grau en Arquitectura Tècnica
Treball Final de Grau



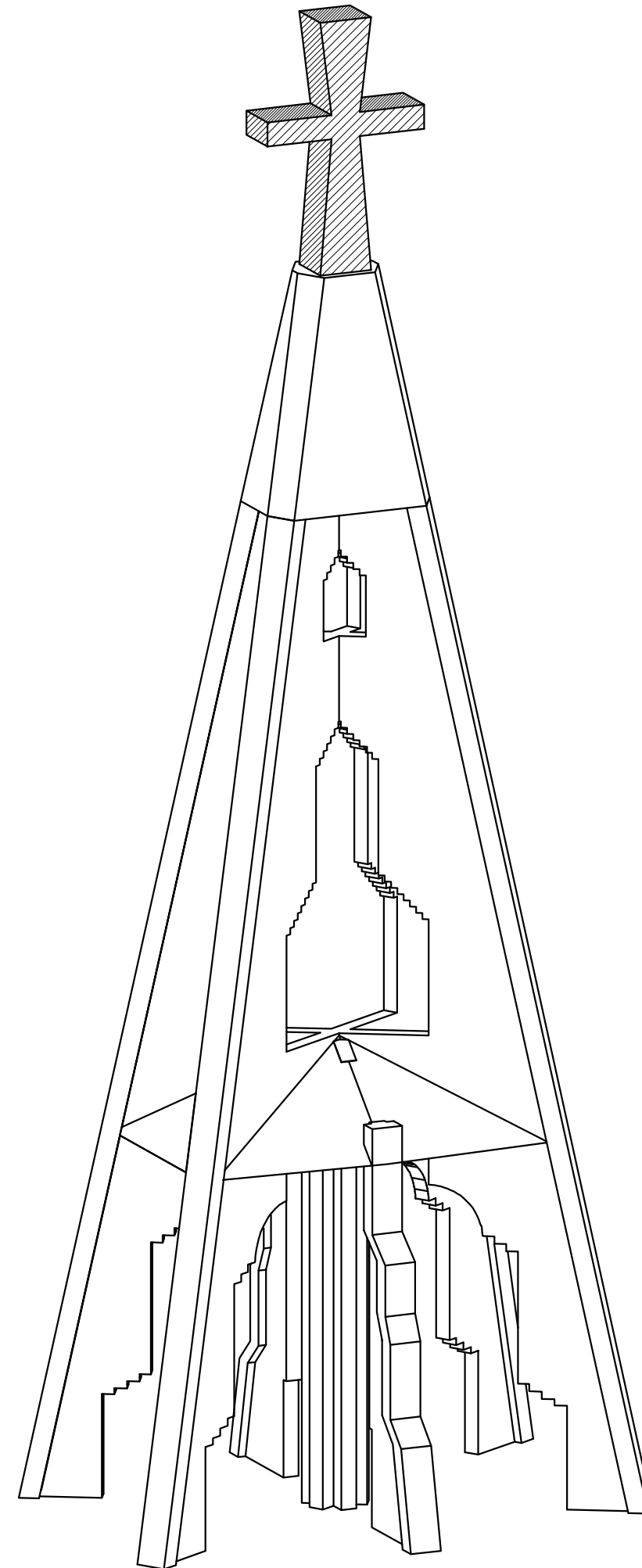
ALÇAT LATERAL: A3_E 1:100



ALÇAT FRONTAL: A3_E 1:100



PLANTA: A3_E 1:100



VISTA EN PERSPECTIVA

GEOMETRIA I COTES

E: VEURE DETALLS

CREU DE CORONAMENT
COTES HORIZONTALS

12

Curs 2016/17

UNIVERSITAT DE GIRONA
Grau en Arquitectura Tècnica
Treball Final de Grau

5. Paràmetres mecànics dels materials utilitzats

En aquest apartat es concreten els paràmetres utilitzats en aquest treball en relació als materials del campanar. Cal diferenciar-los clarament entre els que ja eren existents previ a l'actuació que es va dur a terme (fàbrica), i els materials de nova aportació, que serveixen per realitzar els treballs de consolidació (acer inoxidable tipus AISI 316).

Per a això, s'extreu la informació del projecte tècnic realitzat per l'arquitecte Santi Prats i Rocavert, on es fa un anàlisi exhaustiu de la fàbrica per determinar els valors reals dels paràmetres a considerar, es proposen els que no es detallen en el projecte i s'estableixen també els coeficients de seguretat que s'utilitzaran perquè el resultat d'aquest estudi pugui ser plantejat com un annex de l'actuació realitzada al campanar de Jujol.

Tal i com s'indica en el projecte esmentat, es van programar dos assaigs in-situ per tal de poder caracteritzar amb la màxima exactitud la fàbrica que es va utilitzar per executar el campanar. L'objectiu últim d'aquests assaigs, per tant, és acotar el mòdul d'elasticitat real, E , i les condicions de contorn, per optimitzar el reforç estructural del campanar.

5.1 Fàbrica

5.1.1 Determinació experimental del mòdul d'elasticitat, E ⁽¹⁾

La metodologia per establir un valor fiable del mòdul elàstic es tradueix en un procés on es barregen anàlisis elaborats sobre un model del campanar amb el mètode d'elements finits (MEF), vinculat a assaigs de camp elaborats sota la supervisió d'un equip d'investigadors de la Universitat de Girona. Es planteja el següent programa:

- Anàlisi estructural inicial del campanar (esforços/tensions a pes propi)
- Assaig 1: *Hole-drilling* (determinació d' E aproximat)
- Assaig 2: Identificació del comportament dinàmic de la fàbrica de maó massís
- Anàlisi model de l'estructura del campanar (determinació d' E i condicions de contorn)

5.1.1.1 Anàlisi estructural inicial del campanar

L'objectiu d'aquest anàlisi inicial és conèixer quines tensions es creen a la base del campanar a pes propi i alhora, les que es creen en el punt on es farà l'assaig a la fàbrica tipus *hole-drilling*, per establir un valor aproximat del mòdul d'elasticitat.

El primer model que es crea se li dóna un valor estimat de mòdul elàstic de 10.000 N/mm^2 i es considera articulats a la base. D'aquesta manera, s'obté un primer estat tensional (figura 4) únicament amb el pes propi de l'element.

⁽¹⁾La informació d'aquest apartat està extreta del projecte tècnic "PROJECTE DE RESTAURACIÓ DE L'ESGLÉSIA DEL SAGRAT COR DE VISTABELLA", amb l'autorització explícita de l'arquitecte redactor Santi Prats i Rocavert

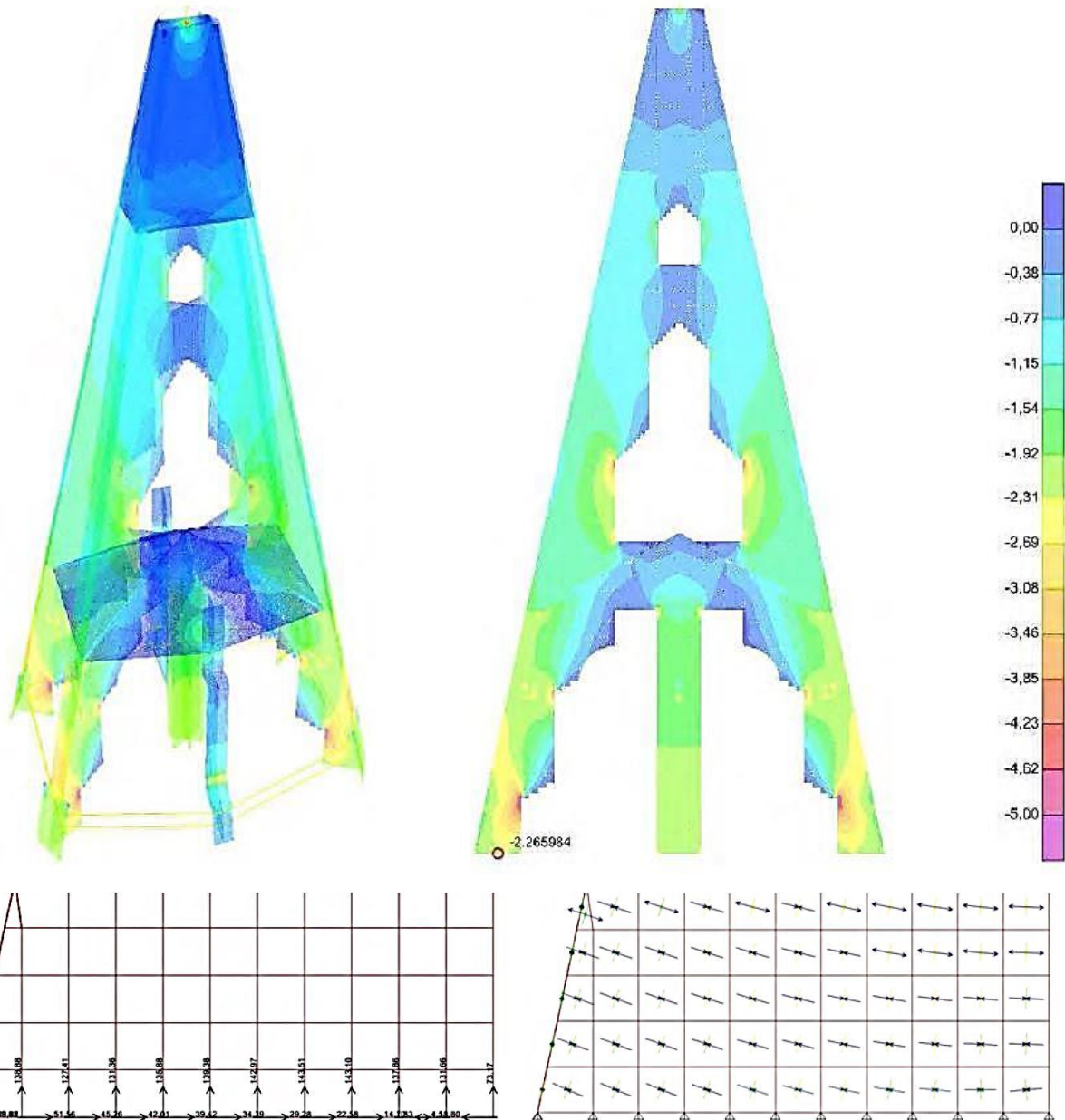


Figura 4: A dalt, Estat tensional del campanar a pes propi, en Kg/cm². A baix, valor i direcció de les tensions al peu de les costelles principals.

S'obté una tensió propera als **-2.26 Kg/cm²**.

5.1.1.2 Assaig *Hole-drilling*

5.1.1.2.1 Definició teòrica

L'assaig hole-drilling és un assaig emmarcat dins dels assaigs no destructius (NDT) o quasi no destructius (Minor Destructive Testing) per quantificar les tensions reals de servei a les que estan sotmeses les fàbriques pètries i de maó com a elements portants en construccions de patrimoni arquitectònic.

Està basat en la mesura de les deformacions captades per tres bandes extensomètriques (galgues), convenientment disposades, quan s'elimina, per mitjà d'un trepant, una part del material.

Així doncs, els objectius d'aquesta tècnica són:

- Estimar l'estat tensional de compressió en un punt de l'estructura
- Estimar les característiques de deformabilitat dels materials que conformen l'estructura

La eliminació del material origina una relaxació de les tensions existents a la zona analitzada i aquesta és captada per unes galgues. L'estat tensional al que estava sotmesa aquesta zona abans de ser perforada pot deduir-se, a partir de deformacions, mitjançant un adequat procés matemàtic.

Les tensions que es dedueixen no són tensions residuals, sinó estats tensionals de servei. La tècnica de *hole-drilling*, per tant, consisteix en adaptar experimentalment un procediment normalitzat per la quantificació de les tensions residuals (aquelles que es produeixen prop de la superfície del material). El mètode permet deduir les tensions principals (σ_{max} i σ_{min}) i la seva direcció (β), a partir de tres deformacions (ϵ_1 , ϵ_2 i ϵ_3) registrades en tres direccions. A la figura següent (figura 5), es pot observar la disposició convencional de tres galgues i la zona taladrada d'acord amb la norma ASTM E837-95.

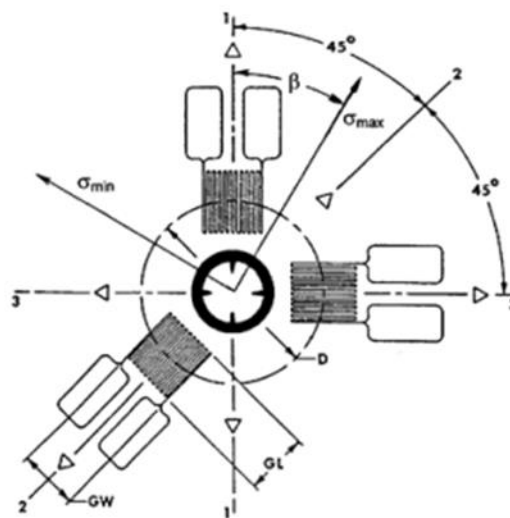


Figura 5: Disposició convencional de les bandes extensomètriques i del trepant (cercle central) d'acord amb la Norma ASTM E837-99. Les galgues 1 i 3 es disposen perpendicularment entre si, mentre que la galga 2 sobre la bisectriu, en el sentit oposat de les altres direccions. La "D" és el diàmetre de la circumferència de galgues, mentre que "d" és el diàmetre del taladre. σ_{max} i σ_{min} són les tensions principals màxima i mínima respectivament, i β , la seva posició respecte d'una direcció coneguda.

El polit superficial ha d'extendre's de manera que assegurí que les bandes extensomètriques es col·locaran sobre maó (cadascuna en un de diferent) i que el taladre es disposi en un altre. Al tractar-se de fàbrica, el taladre haurà d'abarcàr, per força, part de morter i de maó.

El procediment experimental és laboriós i es compon de diversos passos que tenen cadascun una forta incidència en els resultats.

Les tensions principals i les seves direccions s'obtenen a partir de les següents expressions:

$$\sigma_{max} = \frac{\varepsilon_3 + \varepsilon_1}{4 \cdot A} - \frac{1}{4 \cdot B} \cdot \sqrt{(\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2 + (\varepsilon_3 + \varepsilon_1 - 2 \cdot \varepsilon_2)^2}$$

$$\sigma_{min} = \frac{\varepsilon_3 + \varepsilon_1}{4 \cdot A} + \frac{1}{4 \cdot B} \cdot \sqrt{(\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2 + (\varepsilon_3 + \varepsilon_1 - 2 \cdot \varepsilon_2)^2}$$

$$\beta = \frac{1}{2} \cdot \arctan\left(\frac{\varepsilon_3 + \varepsilon_1 - 2 \cdot \varepsilon_2}{\varepsilon_3 - \varepsilon_1}\right)$$

On,

- ε_1 , ε_2 i ε_3 són les deformacions registrades a 0° , 225° i 90° , respectivament, amb una direcció de referència.
- σ_{max} i σ_{min} són les tensions principals màxima i mínima, respectivament, i β és l'angle entre σ_{max} i la direcció de ε_1 , mesurat en sentit antihorari (també és l'angle entre σ_{min} i la direcció de ε_3).
- Per la deducció de l'angle β s'ha de tenir en compte els signes del numerador i denominador.
- La deducció dels estats tensionals a partir de les deformacions registrades a les bandes està altament influenciada per les constants A i B, que les relacionen amb els estats tensionals que originen. Aquestes constants poden determinar-se de manera teòrica en funció a uns paràmetres adimensionals (a i b), del mòdul de Young (E) i del coeficient de Poisson (ν), o bé experimentalment mitjançant un assaig basat en la realització d'un taladre idèntic al que s'utilitza en l'assaig hole-drilling, però en una proveta paral·lelepípedica de qualitats similars al material assajat *in-situ*.

Un cop obtinguts aquests valors, ja es poden obtenir les tensions en qualsevol direcció a partir de l'aplicació de les fórmules de la teoria de l'elasticitat. Particularment, la tensió vertical serà igual a:

$$\sigma_{vertical} = \frac{1}{2} \cdot (\sigma_{max} + \sigma_{min}) + \frac{1}{2} \cdot (\sigma_{max} - \sigma_{min}) \cdot \cos(2\alpha)$$

On,

α és el valor de l'angle entre la tensió màxima principal i la direcció vertical.

5.1.1.2.2 Aplicació pràctica de l'assaig

En data 24 de novembre de 2015, es realitza una campanya *in-situ*, de la mà de Miquel Llorens Sulivera amb l'objectiu d'identificar les deformacions de la fàbrica de les costelles principals, d'acord amb les tensions principals que les sol·liciten i de determinar el valor aproximat d'E de la fàbrica, utilitzant les tensions a pes propi en el punt on es realitza l'assaig (resultat de l'apartat 0.1).

S'assaja una de les quatre costelles principals, ja que són els elements amb major càrrega gravitatòria. A continuació es mostra l'aplicació pràctica del procés d'execució de l'assaig (figura 6):



Figura 6:Seqüència del procés de l'assaig descrit de manera teòrica a l'apartat 0.2.1

5.1.1.2.3 Resultats de l'assaig

Les tensions que s'obtenen en els assaigs, segons apunta el projecte tècnic, oscil·len entre els valors -0,195 i -0,231 MPa. Per tant, s'extreurà un valor promig de les deformacions detectades per les galgues a l'assaig i aquestes tensions aplicant la Llei de Hooke:

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

Les microdeformacions es monitoritzen i creen les següents gràfiques (figura 7):

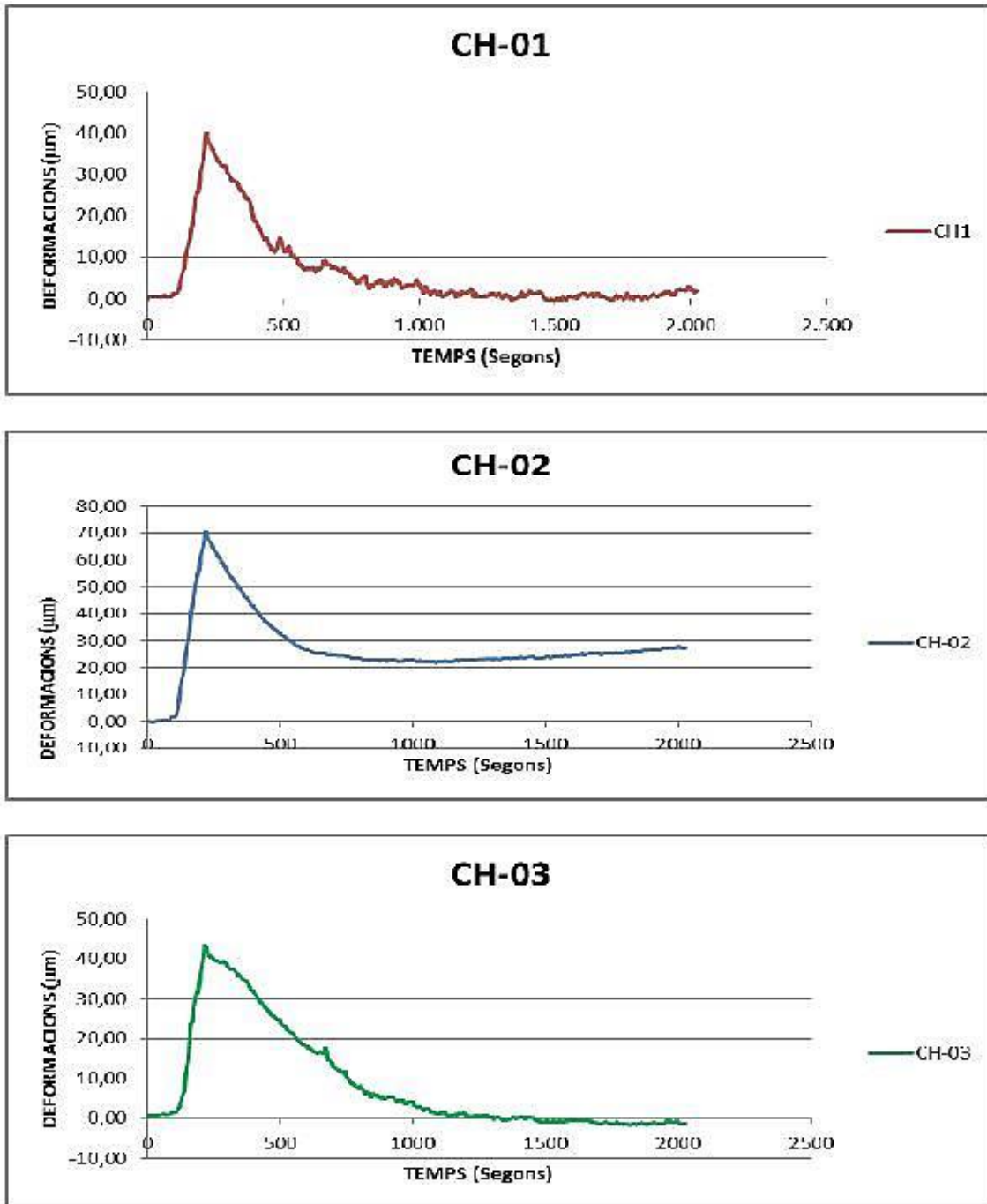


Figura 7: Microdeformacions per galga des de la realització del trepat a la fàbrica

Es prenen els valors del canal 2 (CH-02), donat que és on s'hi produeixen les tensions en l'eix vertical. S'observa que aproximadament al segon 250 es produeix un pic de microdeformacions, però és un valor no apte pel càlcul perquè és quan es produeix la perforació de la fàbrica. Per establir uns valors de deformacions vàlids, es pren el criteri de prendre els valors un cop la gràfica s'estabilitza (el pendent és molt proper a 0). En el cas del canal 2, això es produeix als 1000 segons, pel que es prendran dos valors a l'entorn.

Valors escollits	Deformació produïda
738 s	24,45 μm
1338 s	23,35 μm

S'aplica, per tant, la llei de Hooke entre aquests quatre valors i se'n fa la mitjana:

$E = \sigma/\varepsilon$		Tensions de la fàbrica a pes propi en valor absolut	
		0,195 MPa	0,231 MPa
Deformacions	23,35 μm	8351,18 MPa	9892,93 MPa
	24,45 μm	7975,46 MPa	9447,85 MPa

Mòdul elàstic mitjà 8916,85 MPa

Aquests valor de mòdul de Young es confirma mitjançant un assaig d'identificació del comportament dinàmic de la fàbrica, per mitjà d'una prova de càrrega dinàmica, i un anàlisi modal de l'estructura del campanar, també de la mà de l'equip dirigit per Miquel Llorens Sulivera, que permeten validar també que els tipus de recolzaments a la base de la costella assajada són apropiats.

5.1.2 Densitat

La densitat de l'obra de fàbrica ceràmica utilitzada es treu de la taula C.1 de l'annex C del document CTE-DB-SE-AE, Accions a l'Edificació, on es detallen els pesos específics aparents dels materials utilitzats en la construcció. (figura 8)

La fàbrica és un material heterogeni i, per tant, compost de dos components: la peça ceràmica, en aquest cas, de maó massís de ceràmica cuita de dimensions 26x13x5 cm i una junta de morter de ciment d'1 cm.

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 veso	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

Figura 8

La densitat serà, per tant, de **18 KN/m³**.

5.1.3 Resistència a compressió

La resistència a compressió de càlcul de la fàbrica ve determinada per les resistències dels dos materials que la componen. La relació d'aquests dos paràmetres es recull a la taula 4.4 del document CTE-DB-SE-F (figura 9).

Tabla 4.4 Resistencia característica a la compresión de fábricas usuales f_k (N/mm²)

Resistencia normalizada de las piezas, f_b (N/mm ²)	5		10		15		20		25
Resistencia del mortero, f_m (N/mm ²)	2,5	3,5	5	7,5	7,5	10	10	15	15
Ladrillo macizo con junta delgada	-	-	3	3	3	3	3	3	3
Ladrillo macizo	2	2	4	4	6	6	8	8	10
Ladrillo perforado	2	2	4	4	5	6	7	8	9
Bloques aligerados	2	2	3	4	5	5	6	7	8
Bloques huecos	1	1	2	3	4	4	5	6	6

Figura 9

Pel tipus de peça ceràmica utilitzada, hi ha un rang de valors d'entre 2 i 10 MPa. En el projecte tècnic s'estableix que els valors de la resistència a compressió dels maons ceràmics, morter, i fàbrica en el seu conjunt són els següents:

Resistència normalitzada de les peces, f_b :	20 MPa
Resistència del morter, f_m :	10 MPa
Resistència de la fàbrica, f_k :	7 MPa

Noti's que el valor de resistència de la fàbrica no es correspon amb el valor que dona la taula del CTE per les resistències considerades del material, que hauria de ser de **8 MPa**. No obstant, se seguirà el criteri establert al projecte, donat que es penalitza el material per evitar portar-lo al límit de la seva capacitat.

5.1.4 Resistència a tallant

La resistència a tallant de càlcul depèn, com en la resistència a compressió, de la naturalesa dels elements que la conformen. Aquest valor ve determinat per la taula 4.5 del document CTE-DB-SE-F (figura 10).

Tabla 4.5 Resistencia característica a cortante para fábricas de mortero ordinario

Tipo de piezas		f_{vko} (N/mm ²)			Limite de f_{vk} (N/mm ²) ⁽¹⁾		
Mortero ⁽²⁾		M1	M2,5	M10	M1	M2,5	M10
macizas	Ladrillo cerámico	0,1	0,2	0,3	1,2	1,5	1,7
	Piedra natura	0,1	0,15	-	1,0	1,0	-
	Otras	0,1	0,15	0,2	1,2	1,5	1,7
perforadas	Ladrillo cerámico	0,1	0,2	0,3	1,4*	1,2*	1,0*
	Otras	0,1	0,15	0,2	1,4*	1,2*	1,0*
aligeradas		0,1	0,15	0,2	1,4*	1,2*	1,0*
huecas		0,1	0,2	0,3	**	**	**

* La menor de las resistencias longitudinales a compresión.

** Sin más limitaciones que las dadas por la ecuación 4.1

⁽¹⁾ Para llagas a hueso, o con tendel hueco, el valor es el 70% del consignado

⁽²⁾ Para valores intermedios no se interpolará, sino que se empleará la columna correspondiente al valor inferior.

Figura 10

Resistència a tallant pur de la fàbrica, f_{vk0} : 0.30 MPa
Límit de f_{vk} : 1.70 MPa

Aquests valors, segons el document del Codi Tècnic, no poden sobrepassar d'uns límits en funció del tipus de junta que hi ha. Per un morter ordinari amb junta plena, s'estableix la següent relació:

$$f_{vk} = f_{vk0} + 0.36 \cdot \sigma_k \leq 0.065 \cdot f_b$$

On,

σ_k =si hi ha compressió, la tensió característica normal mitjana perpendicular a la taula, deguda a la compressió produïda per les càrregues permanents sobre el nivell considerat.

En el cas estudiat, tot i tenir la compressió del propi campanar, s'obviarà aquest paràmetre de manera que no es bonifiqui la resistència al tallant. D'aquesta manera, cal comprovar només que el valor trobat de f_{vk0} no superi el límit que marca la fórmula:

$$f_{vk} = 0.30 \leq 0.065 \cdot 20$$

$$f_{vk} = 0.30 \leq 1.30$$

COMPLEIX

El valor de càlcul de la resistència a tallant de la fàbrica, f_{vk} , és **0.30 MPa**.

5.1.4.1 Cas de fàbrica posttesada

Pel que fa a la resistència de tallant un cop l'element ja està precomprimit en el seu conjunt, es podrà millorar la seva resistència al tallant tenint només en compte l'acció del tesat com a acció que produeix la tensió, σ_k , deguda a càrregues permanents. Així,

$$f_{vk} = f_{vk0} + 0.36 \cdot \sigma_k \leq 0.065 \cdot f_b$$

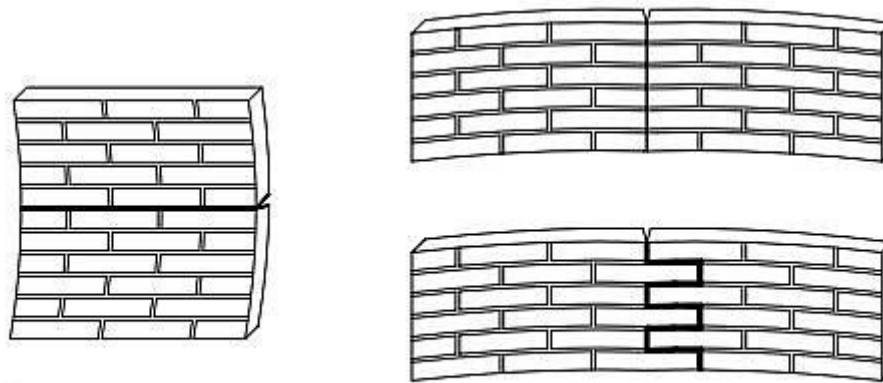
On,

σ_k =si hi ha compressió, la tensió característica normal mitjana perpendicular a la taula, deguda a la compressió produïda per les càrregues permanents sobre el nivell considerat.

5.1.5 Resistència a flexió

En funció del pla de ruptura, es poden considerar dues resistències característiques a flexió (figura 11):

- f_{xk1} , si el pla de ruptura és paral·lel a les filades
- f_{xk2} , si el pla de ruptura és perpendicular a les filades



a) Plano de rotura paralelo a los tendeles b) Plano de rotura perpendicular a los tendeles

Figura 4.1 Modos de flexión en fábricas.

Figura 11

Per la geometria que té el campanar, resulta evident que l'acció del vent provoca un pla de ruptura paral·lel a les filades (cas a)), ja que la flexió produïda en el cas b) és degut a l'acostament o allunyament d'elements arriostants o corbaments del suport de la fàbrica.

El valor, doncs, de la resistència a flexió de la fàbrica, ve donada a la taula 4.6 (figura 12):

Tabla 4.6 Resistencia a flexión de la fábrica (N/mm²)

Tipo de pieza	Morteros ordinarios		Morteros de junta delgada		Morteros ligeros			
	$f_m < 5 \text{ N/mm}^2$		$f_m \geq 5 \text{ N/mm}^2$					
	f_{xk1}	f_{xk2}	f_{xk1}	f_{xk2}	f_{xk1}	f_{xk2}		
Cerámica	0,10	0,20	0,10	0,40	0,15	0,15	0,10	0,10
Silico-calcareos	0,05	0,20	0,10	0,40	0,20	0,30	-	-
Hormigón ordinario	0,05	0,20	0,10	0,40	0,20	0,30	-	-
Hormigón celular de autoclave	0,05	0,40	0,10	0,40	0,15	0,20	0,10	0,15
Piedra artificial	0,05	0,40	0,10	0,40	-	-	-	-
Piedra natural	0,05	0,20	0,10	0,40	0,15	0,15	-	-

Figura 12

El valor de càlcul de la resistència a flexió en el supòsit considerat, f_{xk1} , és **0.10 MPa**.

5.1.6 Coeficient de Poisson

El coeficient de Poisson utilitzat en el projecte tècnic on es detallen els paràmetres utilitzats per fer el càlcul del tesat del campanar, s'utilitza un coeficient de Poisson, $\nu=0.15$.

5.1.7 Coeficient de seguretat

El document CTE-SE-DB-F, a través de la taula 4.8 (figura 13) estableix diferents coeficients parcials de seguretat per a la fàbrica en funció de la categoria de control de fabricació de les peces i de la categoria d'execució a obra.

Tabla 4.8 Coeficientes parciales de seguridad (γ_M)

Situaciones persistentes y transitorias ⁽¹⁾			Categoría de la ejecución		
			A	B	C
Resistencia de la fábrica	Categoría del control de fabricación ⁽²⁾	I	1,7	2,2	2,7
		II	2,0	2,5	3,0
Resistencia de llaves y amarres			2,5	2,5	2,5
Anclaje del acero de armar.			1,7	2,2	
Acero (armadura activa y armadura pasiva)			1,15	1,15	

⁽¹⁾ Para las comprobaciones en situación extraordinaria, los coeficientes de llaves y amarres son los mismos; de las fábricas los coeficientes son 1,2 1,5 y 1,8 respectivamente para las categorías A B y C.

⁽²⁾ Categorías según 8.1.1

Figura 13

Com que es tracta d'un element construït fa prop de cent anys i no podem assegurar en quines condicions es va realitzar l'execució de l'element, prendrem els valors més restrictius.

Per tant, el coeficient parcial considerat és **3,0**.

5.1.8 Accions reològiques i tèrmiques de la fàbrica

La deformabilitat de la fàbrica enfront a accions reològiques i tèrmiques es determinen a la taula 4.7 (figura 14). En el cas que s'estudia s'idealitza a unes condicions de temperatura i humitat que fa que no es tinguin en compte aquests coeficients:

Tabla 4.7 Deformabilidad de las fábricas

Tipo de pieza	Coeficiente final de fluencia, ϕ_∞	Retracción o expansión final por humedad, ⁽¹⁾ (mm/m)	Coeficiente de dilatación térmica (10^{-6} m/m °C)
Cerámica	1	0,2 a 1,0 ⁽²⁾	6
Silico-calcareos	1,5	-0,2	9
Hormigón ordinario y piedra artificial	1,5	-0,2	10
Hormigón de árido ligero	2	-0,4 ⁽³⁾	10
Hormigón celular de autoclave	1,5	0,2	8
Piedra natural	1	0,1	7

⁽¹⁾ Acortamiento negativo y alargamiento positivo

⁽²⁾ Depende del material

⁽³⁾ Para áridos ligeros de piedra pómez y de arcilla expandida; en otro caso el valor es - 0,2

Figura 14

Coeficient final de fluència, ϕ_∞ :	1
Retracció o expansió final per humitat	0.2 a 1,0 mm/m
Coeficient de dilatació tèrmica	$6 \cdot 10^{-6}$ m/m°C

5.2 Acer AISI 316

A diferència de la fàbrica, el CTE no estableix paràmetres de càlcul per a l'acer utilitzat per realitzar el tesat. És per això que s'ha extret la informació del projecte tècnic de Sant Prats i Rocavert:

Paràmetre mecànic	Valor
Densitat (kg/m ³)	7950
Mòdul de Young (MPa)	193000
Coeficient de Poisson	0,30
Resistència a tracció (MPa)	480
Resistència a compressió (MPa)	170
Coeficient de dilatació tèrmica (°C ⁻¹)	1,602x10 ⁻⁵

6. Realització del tesat a obra

En dia 7 d'octubre de 2016 es duen a terme els treballs de consolidació estructural del campanar de l'església Sagrat Cor de Jesús, a Vistabella, en presència de l'arquitecte director de l'obra, Santi Vila i Rocavert, el doctor arquitecte Roger Señís López, autor del càlcul del tesat del campanar, i dos membres de l'empresa encarregada de realitzar la monitorització de la operació, el doctor arquitecte Miquel Llorens Sulivera i l'arquitecte Benjamí Moreno. L'estudiant redactor d'aquest treball també hi va ser present com a observador de les feines a realitzar.

També hi eren presents membres de l'empresa constructora que tenia contractada part de la obra de rehabilitació del campanar: la cap d'obra i un equip d'operaris soldadors.

El procés d'execució de la operació, segons indica el propi projecte, contemplava les següents activitats:

- Desmuntatge de la part superior del campanar
- Extracció de l'aplatat de rajola, i els tirants de reforç existents (sistema passiu)
- Realització dels forats per als ancoratges, deixant una superfície rugosa que millori l'adherència amb el morter d'alta resistència per a tapar els forats.
- Col·locació de les platines en els diferents nivells
- Col·locació dels tirants per trams
- Tesat dels tirants, mitjançant roscat

6.1 Estat de l'obra durant l'execució del tesat

La jornada va començar a les 9.00h del matí. Les condicions meteorològiques eren bones, ja que no hi havia risc de pluja però la temperatura era suau, essent aquest un factor determinant pels treballs del tesat, perquè els tirants no patissin efectes relacionats amb la dilatació tèrmica.

L'accés al campanar es feia a través d'una bastida que comunicava les diverses zones de treball a tres nivells (figura 15).

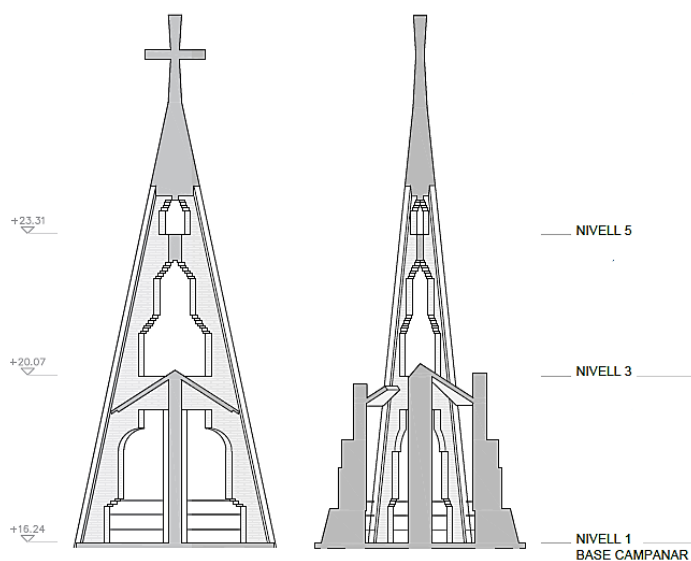


Figura 15: Nivells de treball al campanar

Els tirants havien estat prèviament disposats segons el previst: un a cada costat de les quatre costelles principals, aprofitant la forma en T d'aquestes. També hi havia col·locat a la base del tirant (immediatament sota del nivell 1) un calaix metàl·lic encastat a la fàbrica des d'on es podia tensar les barres (figura 16), i unes platines metàl·liques a cada nivell, que evitaven la fletxa dels tirants i servien per realitzar la soldadura puntual del tirant al campanar, permetent el tesat progressiu que s'havia previst al projecte.



Figura 16: Calaix a la base del campanar, per a tensar les barres



Figura 17: Platina de suport dels tirants a cada nivell

Al coronament del campanar també es podia veure la unió superior dels tirants: Les barres quedaven agafades per unes platines ancorades a la fàbrica i entraven dins també del propi coronament, creant així un suport encastat que permetia poder estirar d'aquestes amb garanties.



Figura 18: Unió dels tirants al coronament

6.2 Treballs previs a l'operació de tesat

La primera tasca a realitzar a l'obra va ser la de desprotegir les galgues extensiomètriques adherides als tirants, els quals ja estaven col·locats a les costelles. Aquestes duïen un cablejat que permetia connectar-les a l'equip d'adquisició, per tal de poder llegir les microdeformacions que patia el tirant al moment (figura 19).



Figura 19: A l'esquerra, galga extensiomètrica protegida, i, a la dreta, descoberta

Acte seguit, es connectava el cablejat a unes regletes col·locades a cada nivell (figura 20), i aquestes s'endollaven a un equip central, situat al nivell 1, des d'on es va fer la monitorització (figura 21). Calia fer-ho ordenadament, per a poder tenir identificada cada galga a una barra i nivell determinats. En total, hi havia 24 punts de control.



Figura 20: Regleta de connexió de les galgues



Figura 21: Equip central i ordinador de control

6.3 Tesat

Un cop es van completar les tasques explicades a l'apartat anterior, es va procedir a tensar les barres d'acer inoxidable. Primer, es van fer zeros a l'ordinador de control, de tal manera que totes les galgues tenien la mateixa lectura i, per tant, no hi havia interferències amb d'altres valors previs.

La operació constava de tres fases, acotades per unes forces límit i, per tant, d'unes microdeformacions, establertes en el projecte. Degut a l'alçada, a l'espai de treball, però també a causa de la delicadesa amb què havia de fer-se la consolidació, l'estirament de les barres es va fer mitjançant roscada, amb una clau dinamomètrica (figura 22). Això permetia poder aturar la feina en el moment precís en què l'equip de control detectava que s'havia arribat al valor esperat.



Figura 22: Execució del tesat mitjançant la clau dinamomètrica

L'ordre amb què es tensaven les barres també tenia un paper important, donat que s'havia de garantir l'estabilitat del campanar en tot moment. Primer es tensaven els dos tirants d'una de les costelles, llavors els de la costella oposada, i finalment, es feia el mateix per l'altre parell de costelles. D'aquesta manera podien compensar-se els esforços horitzontals que es produïen entre la costella amb un cert grau de compressió degut al tesat i l'oposada, que encara no ho estava.

El tesat, doncs, es va dur a terme de la següent manera:

- Es tensava una barra fins a arribar a les microdeformacions de la primera fase. Un cop arribat a aquest punt, se soldava el tirant a la platina corresponent del nivell 5. Es procedia de la mateixa manera amb l'altre tirant de la mateixa costella.
- Es tensaven els tirants de la costella oposada, seguint la mateixa metodologia.
- Es tensava l'altre parell de costelles.
- **Arribats a aquest punt, el nivell superior ja havia estat tesat.**

- Es repetia el mateix procediment, amb els valors de microdeformació previstos pel segon nivell. Ajudant-se de la unió del tirant amb la soldadura a la base del nivell superior, es garantia que el tram superior del tirant no continués deformant-se i, per tant, augmentant la força de tesat, sinó que aquestes només afectaven nivell mig i inferior.
- **Un cop completat, se soldaven els tirants a les platines del nivell intermig i aquest ja quedava completament tesat.**

- **Per últim, es procedia de la mateixa manera amb les microdeformacions del nivell inferior i, un cop completat, el tesat del campanar havia conclòs.**

7. Accions aplicades al campanar

7.1 Pes propi

7.1.1 Definició

La gravetat és la força d'atracció que exerceix la Terra, degut a la seva massa, a qualsevol cos dins del seu camp gravitatori. Aquesta atracció es tradueix en un valor d'acceleració amb direcció cap al centre de gravetat de la Terra i que, per tant, consta d'una sola component. Aquesta té un valor de 9,8066 m/s².

El pes propi de qualsevol element ve determinat per la segona llei de Newton, que explica que, per un valor de massa constant, la força que exerceix aquesta, també denominat pes, és:

$$F = m \cdot g$$

On m és la massa de l'element i g és l'acceleració que produeix la Terra.

7.1.2 Obtenció del pes del campanar

Extraient la massa, en quilograms, del model ANSYS, podem obtenir-ne el pes:

$$P_{es\text{campanar}} = m_{\text{campanar}} \cdot g = 14016 \text{ kg} \cdot 9,8066 = 137.449,31 \text{ N}$$

7.1.3 Tensió teòrica a la base del campanar

La tensió teòrica a la base del campanar es pot obtenir de la divisió entre el pes de l'element i la superfície de contacte amb el suport. Aquesta tensió és teòrica pel fet que assumeix que cada una de les unitats de superfície de la base reben la mateixa quantitat de força, cosa que resulta evident que no succeeix en aquesta figura, ja que intuïtivament les costelles secundàries del campanar treballen d'una manera més relaxada que les principals.

Així doncs, es proposa establir dos valors de tensió: tenint en compte les costelles secundàries, que ens donarà la tensió teòrica mínima, i sense tenir-les en compte, que serà la tensió teòrica màxima.

Tensió teòrica mínima

$$P_{\text{mín}} = \frac{P_{es\text{campanar}}}{S_{\text{base màxima}}} = \frac{137.449,31}{907.300} = 0,15 \text{ MPa}$$

Tensió teòrica màxima

$$P_{\text{màx}} = \frac{P_{es\text{campanar}}}{S_{\text{base mínima}}} = \frac{137.449,31}{641.300} = 0,21 \text{ MPa}$$

Els valors, doncs, de tensió a la base del campanar estaran dins d'aquest rang, entre la pressió mínima i la màxima.

7.2 Tesat

Al campanar se li adhireixen 8 barres d'acer inoxidable tipus AISI 316, amb els paràmetres detallats a l'apartat "Paràmetres dels tirants", de diàmetre 16 mm. Se'n col·loquen dos per costella, simètricament, en cada una de les quatre costelles principals, tal com s'explica a la documentació gràfica d'aquest treball.

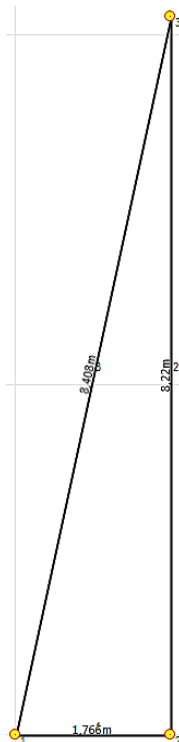
7.2.1 Definició

L'efecte de tesat consisteix a crear esforços permanents en un o diversos elements o sistemes estructurals a fi de millorar la seva capacitat de servei i resistència, però evitant que aquests esforços resultants puguin superar els que l'estructura mateixa és capaç de resistir.

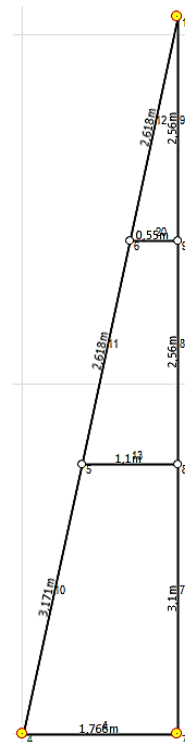
Depenent del moment en què s'aplica aquest esforç, es pot parlar de pretesat o posttesat. Aquesta diferenciació té a veure amb el moment en què aquest tesat comença a col·laborar amb l'estructura.

7.2.2 Anàlisi de l'efecte de la gravetat als tirants

Cal tenir en compte, en aquest punt, que la barra té un pes que no es pot obviar, ja que per l'acció de la gravetat es generaria una fletxa inicial que caldria salvar abans que el tesat fos efectiu. Per minimitzar aquest problema, es col·loquen suports intermedis que evitin al màxim aquesta fletxa no desitjada. Els trams queden detallats en els següents esquemes i taula-resum.



Cotes dels tirants en un tram



Cotes dels tirants en tres trams

	Longitud del tirant	Comp. en eix X	Comp. en eix Y
Tram 1	3,17 m	0.67 m	3,10 m
Tram 2	2,62 m	0,55 m	2,56 m
Tram 3	2,62 m	0,55 m	2,56 m
TOTAL	8,41 m	1,77 m	8,22 m

Per demostrar la incidència que pot tenir el pes propi, es fa un model amb el *WinEVA*, un programa de càlcul de barres, on introduint els paràmetres mecànics del material i geomètrics de la barra, es determina la fletxa que es produeix.

Els paràmetres dels tirants són els següents:

Nom	Mòd. Elast. (T/m ²)	Poisson	Coef. Dilat.(1°C)	Densitat (T/m ³)	Tipus
Acer inoxidable AISI 316	19300000	0.3	0.00001602	7.95	S

Paràmetres del material. Vegi's "Paràmetres de l'acer"

Paràmetres de la secció

Un cop aplicats els valors volguts, es crea la geometria de la barra. Tal com s'ha apuntat abans, la barra sencera és de 8.410 mil·límetres, i els trams tenen longituds de 3.170, 2.620 i 2.620 mil·límetres.

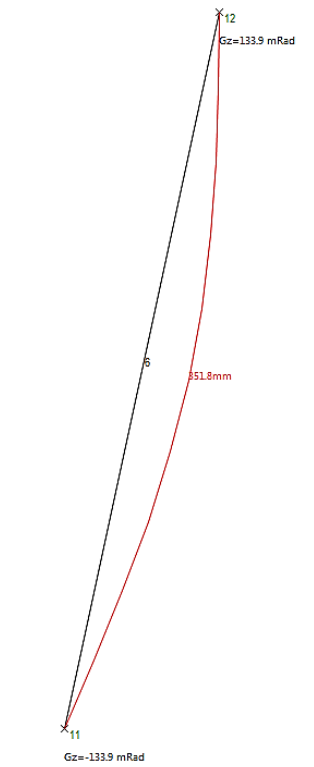
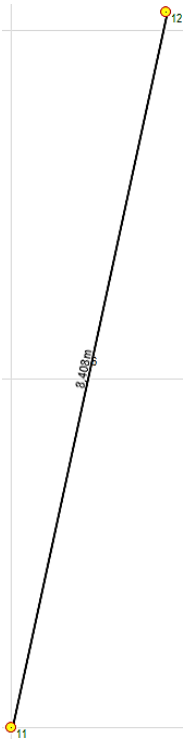
També es farà l'anàlisi de les condicions de contorn de la barra, entre un escenari on el tirant està articulats en els seus extrems i un altre on aquest queda encastat. En l'estudi de les barres en tres trams, els suports intermedis només eviten el desplaçament horitzontal de la barra.

L'estat de càrregues de totes les hipòtesis és el mateix, tan sols s'ha activat el pes propi de la barra, que és l'acció que crea l'acceleració de la Terra a un cos amb una massa determinada.

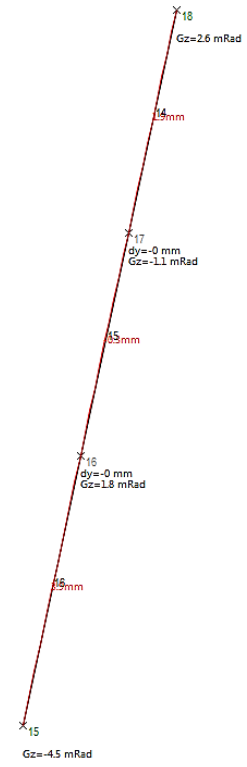
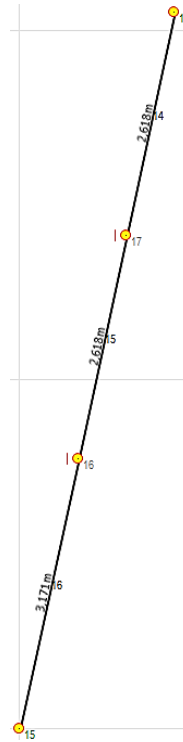
Hipòtesis simples		
<input type="button" value="Ok"/> <input type="button" value="Cancel·lar"/> <input type="button" value="Afegir"/> <input type="button" value="Eliminar / Recuperar"/>		
Nombre d'hipòtesis = 1		
Hipòtesi	Nom de la hipòtesi	Pes propi
1	Pes propi del tirant	X

Estat de càrregues del tirant

- Hipòtesi de tirant biarticulat

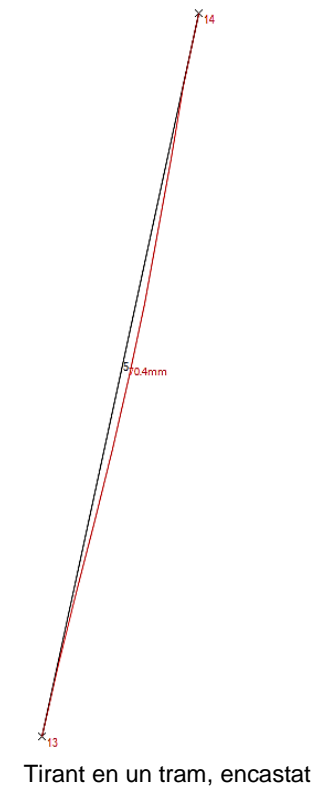
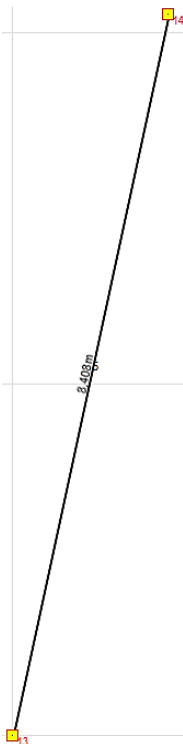


Tirant en un tram, biarticulat

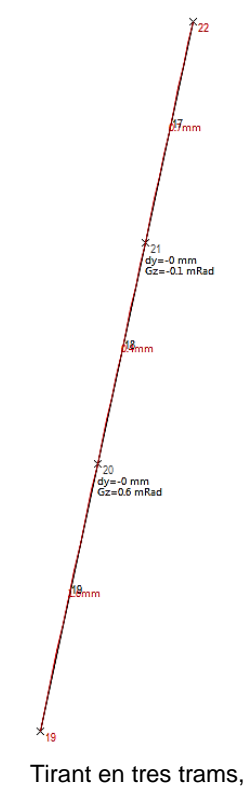
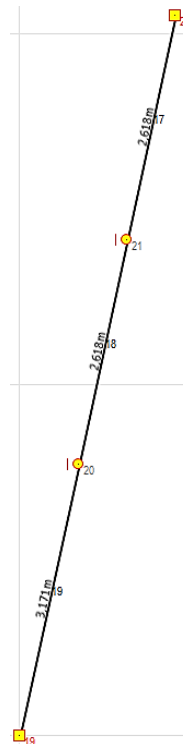


Tirant en tres trams, biarticulat

- Hipòtesi de tirant encastat



Tirant en un tram, encastat



Tirant en tres trams, encastat

Els resultats obtinguts en aquesta anàlisi queden reflectits a la següent taula:

	Un tram	Tres trams
Tirant biarticulat	351,8 mm	1,9 mm 0,3 mm 3,9 mm
Tirant encastat	70,4 mm	0,7 mm 0,4 mm 1,6 mm

La conclusió és clara: el nombre de trams i les condicions de contorn de la barra tenen una influència important en la fletxa que experimenta aquesta.

Amb el propòsit que l'efecte del tesat sigui l'esperat, el tirant haurà d'anar encastat als seus suports i s'haurà de col·locar punts de contacte intermedis que evitin l'efecte de la gravetat. D'aquesta manera, la tensió aplicada a la barra serà efectiva completament i s'assegurarà que el reforç del campanar està pretesat, és a dir, que treballa sempre i no tan sols quan es veu sol·licitat per altres accions que el facin tensar completament.

7.2.3 Anàlisi de la tensió aplicada

Tal i com s'apunta al projecte d'execució de les obres de rehabilitació del campanar, l'objectiu és aplicar un tesat progressiu en cada una d'aquestes barres en la direcció longitudinal de la barra, segons la taula següent:

Força de tesat (kN) per tram de tirant

Tram	Tirant 1	Tirant 2	Tirant 3	Tirant 4	Tirant 5	Tirant 6	Tirant 7	Tirant 8
1	75	75	75	75	75	75	75	75
2	60	60	60	60	60	60	60	60
3	30	30	30	30	30	30	30	30

Com s'ha comprovat en l'apartat anterior, és important dividir el tirant en trams per mitigar l'acció de la gravetat. Ara cal calcular a quina tensió treballen els diferents trams. Com que la força s'aplica perpendicularment a la secció, la tensió a la qual estarà sotmesa la barra serà aquesta entre la superfície de la secció, per tant:

$$\sigma_{TRAM 1} = \frac{F_{aplicada}}{S_{barra}} \rightarrow \sigma_{tirant} = \frac{7500 \text{ kg} * 10\text{N/kg}}{201 \text{ mm}^2} = 373,13 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{TRAM 2} = \frac{F_{aplicada}}{S_{barra}} \rightarrow \sigma_{tirant} = \frac{6000 \text{ kg} * 10\text{N/kg}}{201 \text{ mm}^2} = 298,51 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{TRAM 3} = \frac{F_{aplicada}}{S_{barra}} \rightarrow \sigma_{tirant} = \frac{3000 \text{ kg} * 10\text{N/kg}}{201 \text{ mm}^2} = 149,25 \text{ MPa}$$

Segons l'aplicació de la relació que estableix el mòdul de Young, es pot determinar l'increment de longitud per l'aplicació d'aquesta força al llarg de la barra. Segons el conveni de signes i perquè els

resultats tinguin coherència amb el que succeeix a la realitat, cal aplicar la força amb signe positiu, ja que les traccions generen l'allargament dels cossos paral·lelament on és aplicada.

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \rightarrow \sigma = E \cdot \frac{\Delta L}{L}$$

$$\frac{F_{aplicada}}{S_{barra}} = E \cdot \frac{\Delta L}{L}$$

$$\Delta L_1 = \frac{F_{aplicada} \cdot L}{S_{barra} \cdot E} = \frac{75000 \cdot 3170}{201 \cdot 193000} = 6,13 \text{ mm}$$

$$\Delta L_2 = \frac{F_{aplicada} \cdot L}{S_{barra} \cdot E} = \frac{60000 \cdot 2620}{201 \cdot 193000} = 4,05 \text{ mm}$$

$$\Delta L_1 = \frac{F_{aplicada} \cdot L}{S_{barra} \cdot E} = \frac{30000 \cdot 2620}{201 \cdot 193000} = 2,03 \text{ mm}$$

On:

$F_{aplicada}$: 75 kN = 75.000 N; 60 kN = 60.000 N i 30 kN = 30.000 kN, respectivament

$S_{barra} = \pi \cdot r^2 = 8^2 \cdot \pi = 201 \text{ mm}^2$

$E = 190 \text{ GPa} = 193.000 \text{ MPa}$

L : 3,17 m = 3170 mm i 2620 m = 2,62 m, respectivament

La geometria del campanar i la simetria amb què queden col·locades les barres de reforç, provoca que les components horitzontals produïdes per l'obliqüïtat en què estan les barres es compensin entre elles dos a dos (vegi's figura 23).

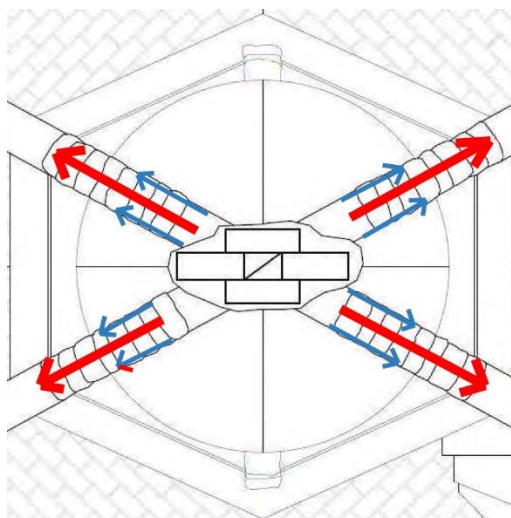


Figura 23: Compensació dels esforços rasants degut a la simetria de la planta

7.2.4 Esforços equivalents al model

Per introduir aquest esforç en el model i poder analitzar el campanar un cop tesat, es crea l'efecte a partir de la temperatura, utilitzant el coeficient de dilatació tèrmica de l'acer inoxidable AISI 316, segons el punt 6.2 d'aquest treball.

Arribat aquest punt, cal analitzar com s'aplicaran els esforços equivalents al model, ja que es produeix un canvi important en les accions. A la realitat, el que es va dur a terme va ser un allargament de la barra degut a una tracció, mentre que el mètode que s'utilitzarà, fent ús del principi de dilatació tèrmica dels materials, fa que aquesta quedi comprimida.

L'objectiu és idèntic, ja que es busca crear una compressió controlada a les costelles del campanar, però necessàriament varia el funcionament de les barres, perquè mentre que el procés de tesat es va realitzar des d'un punt fix a la base de cada una de les costelles, tensant progressivament els tirants i fixant-los a les platines de connexió de cada nivell un cop s'arribava a la microdeformació prèviament establerta, i on el cap de cada tirant era mòbil, l'ANSYS no permet simular aquest tipus de suports i cal reproduir-lo des de suports immòbils al llarg de tota l'anàlisi.

Per validar aquest procés, doncs, cal comprovar que les deformacions per cada tram del tirant són les mateixes que les ja calculades en l'apartat anterior, però de sentit contrari.

7.2.4.1 Principi teòric: la dilatació tèrmica

El principi físic sobre el qual es regeix aquesta hipòtesi és el següent: quan un cos pateix una variació de temperatura ΔT , el seu increment de longitud és proporcional al producte de la seva longitud inicial, L_0 , per la variació de temperatura. D'aquesta manera:

$$\Delta L = \alpha \cdot L_0 \cdot \Delta T$$

On α és la constant de proporcionalitat que s'anomena coeficient de dilatació lineal i el seu valor depèn de la naturalesa del material. Per un rang de temperatura determinada, es pot considerar que el coeficient és constant.

Aquest coeficient també pot variar segons la direcció del material. Quan diem que un material és isotròpic, es compleix que α no varia en cap de les direccions del sòlid, mentre que si és de caràcter anisotròpic, significa que aquesta constant té valors diferents per a cada una de les direccions. Un cas especial, com és el cas de la fàbrica, és l'ortotropia, on la dilatació tèrmica varia en funció d'un sistema de coordenades de referència. És a dir, té un comportament tèrmic diferent en els eixos X, Y i Z, en un sistema cartesià concret.

7.2.4.2 Aplicació del principi i determinació de temperatures equivalents

Partint que l'acer utilitzat és un material isotròpic i el seu coeficient de dilatació tèrmica és constant pel rang de temperatures amb què es treballaran, es troben les temperatures a aplicar.

Primer, però, cal definir una expressió que relacioni les forces que s'apliquen als tirants amb la variació de temperatura. Per fer-ho, es pot combinar la fórmula del mòdul de Young amb la de la dilatació tèrmica de la següent manera:

$$\frac{\Delta L}{L_0} = \alpha \cdot \Delta T \qquad \sigma = E \cdot \varepsilon \rightarrow \sigma = E \cdot \frac{\Delta L}{L_0}$$

$$\frac{\Delta L}{L_0} = \alpha \cdot \Delta T$$

$$\sigma = E \cdot \frac{\Delta L}{L_0} \rightarrow \frac{F_{aplicada}}{S_{barra}} = E \cdot \frac{\Delta L}{L_0}$$

D'on resulta:

$$\frac{F_{aplicada}}{S_{barra} \cdot E} = \alpha \cdot \Delta T$$

I, per tant:

$$\Delta T = \frac{F_{aplicada}}{\alpha \cdot S \cdot E}$$

Un cop s'ha determinat la fórmula que relaciona la força amb una temperatura, es poden trobar els decrements de temperatura necessaris per simular la pretensió del sistema. La temperatura de referència, T_0 , serà igual a 0°C , de manera que el decrement de temperatura coincideixi amb la temperatura final a aplicar.

$$\Delta T = \frac{F_{aplicada}}{\alpha \cdot S \cdot E} \rightarrow (T - T_0) = \frac{F_{aplicada}}{\alpha \cdot S \cdot E} \rightarrow T = \frac{F_{aplicada}}{\alpha \cdot S \cdot E}$$

Tram 1

$$T = \frac{F_{aplicada}}{\alpha \cdot S \cdot E} \rightarrow T = \frac{-75000}{1.602 \cdot 10^5 \cdot 201 \cdot 193000} = -120,834^\circ\text{C}$$

Tram 2

$$T = \frac{F_{aplicada}}{\alpha \cdot S \cdot E} \rightarrow T = \frac{-60000}{1.602 \cdot 10^5 \cdot 201 \cdot 193000} = -96,667^\circ\text{C}$$

Tram 3

$$T = \frac{F_{aplicada}}{\alpha \cdot S \cdot E} \rightarrow T = \frac{-30000}{1.602 \cdot 10^5 \cdot 201 \cdot 193000} = -48,333^\circ\text{C}$$

7.2.4.3 Comprovació de l'esforç equivalent

Tal com s'ha comentat a l'inici d'aquest apartat, per validar que l'efecte de les temperatures és idèntic al comportament dels tirants tesats que hi ha al campanar, es calcularan els decrements de longitud que apareixen a les barres per l'aplicació de les temperatures equivalents, i aquestes hauran de ser iguals a les anteriorment trobades, però de sentit contrari.

Tram 1

$$\Delta L'_1 = \alpha \cdot L_0 \cdot \Delta T \rightarrow \Delta L'_1 = 1,602 \cdot 10^{-5} \cdot 3170 \cdot (-120,834) = -6,13 \text{ mm}$$

$$\Delta L_1 = -\Delta L'_1$$

CORRECTE

Tram 2

$$\Delta L'_2 = \alpha \cdot L_0 \cdot \Delta T \rightarrow \Delta L'_1 = 1,602 \cdot 10^{-5} \cdot 3100 \cdot (-96,667) = -4,05 \text{ mm}$$

$$\Delta L_2 = -\Delta L'_2$$

CORRECTE

Tram 3

$$\Delta L'_3 = \alpha \cdot L_0 \cdot \Delta T \rightarrow \Delta L'_1 = 1,602 \cdot 10^{-5} \cdot 3100 \cdot (-48,333) = -2,03 \text{ mm}$$

$$\Delta L_3 = -\Delta L'_3$$

CORRECTE

7.2.4.4 Taula resum

En la següent taula resum s'especificuen les dades dels esforços i de les temperatures equivalents a introduir al programa de càlcul:

Tram	Longitud (mm)	Força de tesat aplicada (Tracció)		Força de tesat equivalent aplicada (Compressió)		
		Força aplicada (N)	Deformació (mm)	Força aplicada (N)	Temperatura equivalent (°C)	Deformació (mm)
1	3100	75000	6,13	75000	-120,834	-6,13
2	2560	60000	4,05	60000	-96,667	-4,05
3	2560	30000	2,03	30000	-48,333	-2,03

7.3 Vent

7.3.1 Definició

El vent és l'efecte produït per l'aire en moviment. Aquest moviment és degut a condicions atmosfèriques canviants, com ara la pressió i la temperatura, que afecten les partícules que formen el que denominem aire, fent que es desplaci a una certa velocitat. Aquest efecte és notori a qualsevol edificació, i de fet en el càlcul de qualsevol estructura s'ha de tenir present.

Aquesta força es diferencia de la resta perquè té una direcció d'aplicació diferent, ja que no és una força gravitacional sinó que majoritàriament es tracta d'un esforç horitzontal i també en la naturalesa de la força, ja que no és un esforç estàtic i constant com la resta, sinó que es tracta d'una càrrega dinàmica.

El vent genera pressions a les cares directament exposades, i succió a les cares oposades. La succió es genera pel mateix flux d'aire a l'entorn del volum edificat, ja que les partícules d'aire es veuen contínuament desplaçades i es creen els corrents de succió per emplenar en cada moment aquests desplaçaments. Si no fos així, en aquests punts s'hi crearia el buit.

El *Codi Tècnic de l'Edificació* (CTE) estableix la manera amb què s'ha de tractar els esforços a l'edificació estudiada produïts pel vent, al document bàsic "Accions a l'edificació".

7.3.2 Vents dominants a la zona

Per conèixer els vents dominants de la zona, així com la velocitat, i les ratxes màximes que es donen, s'ha contactat amb el Servei Meteorològic de Catalunya. Al seu web hi ha reculls de dades per a cada una de les estacions repartides pel territori català i es poden consultar a l'anuari que publica aquest organisme.

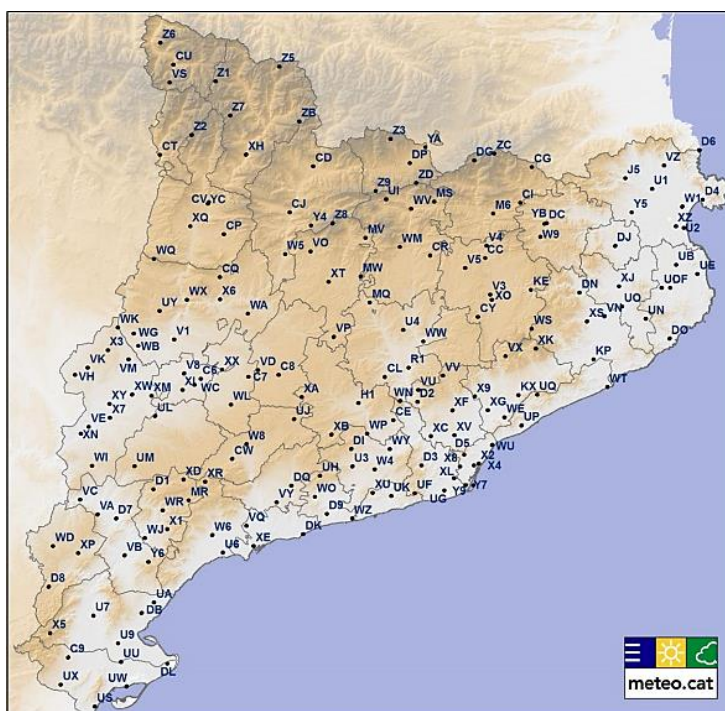


Figura 24: Mapa d'estacions meteorològiques de Catalunya

Al municipi de la Secuita, però, no hi ha cap estació d'aquesta institució, per la qual cosa es prenen les dades de l'observatori més proper, Constantí (clau VQ)

A fi de poder verificar aquestes dades, es va demanar el registre per al període de l'1 de gener de 2015 a 20 de juny de 2017 i es va elaborar una taula resum sobre la velocitat i direcció mitjana de vent i sobre velocitat i direcció de vent en ratxa.

Estació meteorològica VQ: Constantí 01/01/2015 a 20/06/2017	
Variable	Valor
Velocitat mitjana a 10 m	2,3 m/s
Direcció mitjana a 10 m	191° (Direcció Nord)
Ratxa màxima a 10 m	8,4 m/s
Direcció de la ratxa màxima a 10 m	190° (Direcció Nord)

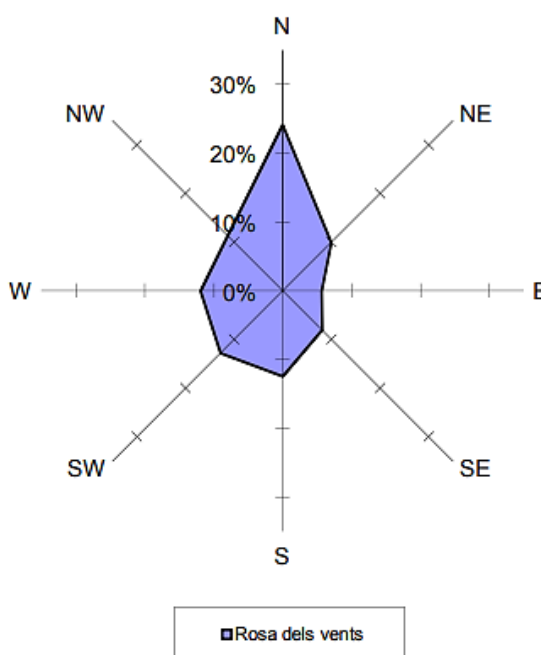


Figura 25: Vents dominants segons velocitat i direcció

7.3.3 L'acció del vent segons el CTE

El CTE tradueix l'esforç dinàmic del vent en un esforç estàtic equivalent que depèn de diversos factors que s'explicaran al llarg d'aquest apartat. En general, la fórmula proposada és la següent:

$$q_e = q_b \cdot c_e \cdot c_p$$

On:

q_e és la pressió dinàmica del vent. De manera simplificada es pren el valor de 0,5 kN/m² per a qualsevol punt del territori espanyol. Hi ha, però, la possibilitat d'obtenir-ne valors més precisos en funció de l'emplaçament específic de l'edificació a estudiar.

c_e , és el coeficient d'exposició, i aquest varia segons l'alçada del punt considerat i el grau d'aspresa de l'entorn on està situada l'edificació. Aquest es pot considerar constant de $2,0 \text{ kN/m}^2$, per a edificis urbans de fins a 8 plantes, independentment de l'alçada.

c_p o c_s , són els coeficients de pressió i succió, en funció de la forma i orientació de la superfície exposada respecte del vent. Els valors negatius indiquen coeficients de succió, tot i que els dos coeficients tenen el mateix sentit d'aplicació.

7.3.3.1 Determinació del coeficient d'exposició

Els valors per al coeficient d'exposició es pot determinar a partir de la taula 3.4 del document:

Tabla 3.4. Valores del coeficiente de exposición c_e

Grado de aspereza del entorno	Altura del punto considerado (m)							
	3	6	9	12	15	18	24	30
I Borde del mar o de un lago, con una superficie de agua en la dirección del viento de al menos 5 km de longitud	2,4	2,7	3,0	3,1	3,3	3,4	3,5	3,7
II Terreno rural llano sin obstáculos ni arbolado de importancia	2,1	2,5	2,7	2,9	3,0	3,1	3,3	3,5
III Zona rural accidentada o llana con algunos obstáculos aislados, como árboles o construcciones pequeñas	1,6	2,0	2,3	2,5	2,6	2,7	2,9	3,1
IV Zona urbana en general, industrial o forestal	1,3	1,4	1,7	1,9	2,1	2,2	2,4	2,6
V Centro de negocio de grandes ciudades, con profusión de edificios en altura	1,2	1,2	1,2	1,4	1,5	1,6	1,9	2,0

El campanar està situat a l'est de Vistabella. Es troba envoltat d'altres edificacions excepte per la vessant est, on hi ha camps de conreu (figura 26). Tot i això, es considerarà que està emplaçat dins d'un entorn urbà, corresponent al grau d'aspresa IV.



Figura 26: Vista aèria de l'entorn del campanar

Segons es desprèn de la taula, per a qualsevol edifici superior a 3 metres li correspon més d'un coeficient d'exposició, ja que l'exposició al vent és major com més alt és el punt considerat. Això

generarà un estat de càrregues triangular, si s'estudia des de la rasant, o, si el punt més baix ja té un certa alçada com en aquest cas, trapezoïdal.

A la següent figura (figura 27) es mostra un alçat del campanar amb l'estudi de les alçades que ajudaran a determinar quins coeficients caldrà escollir.

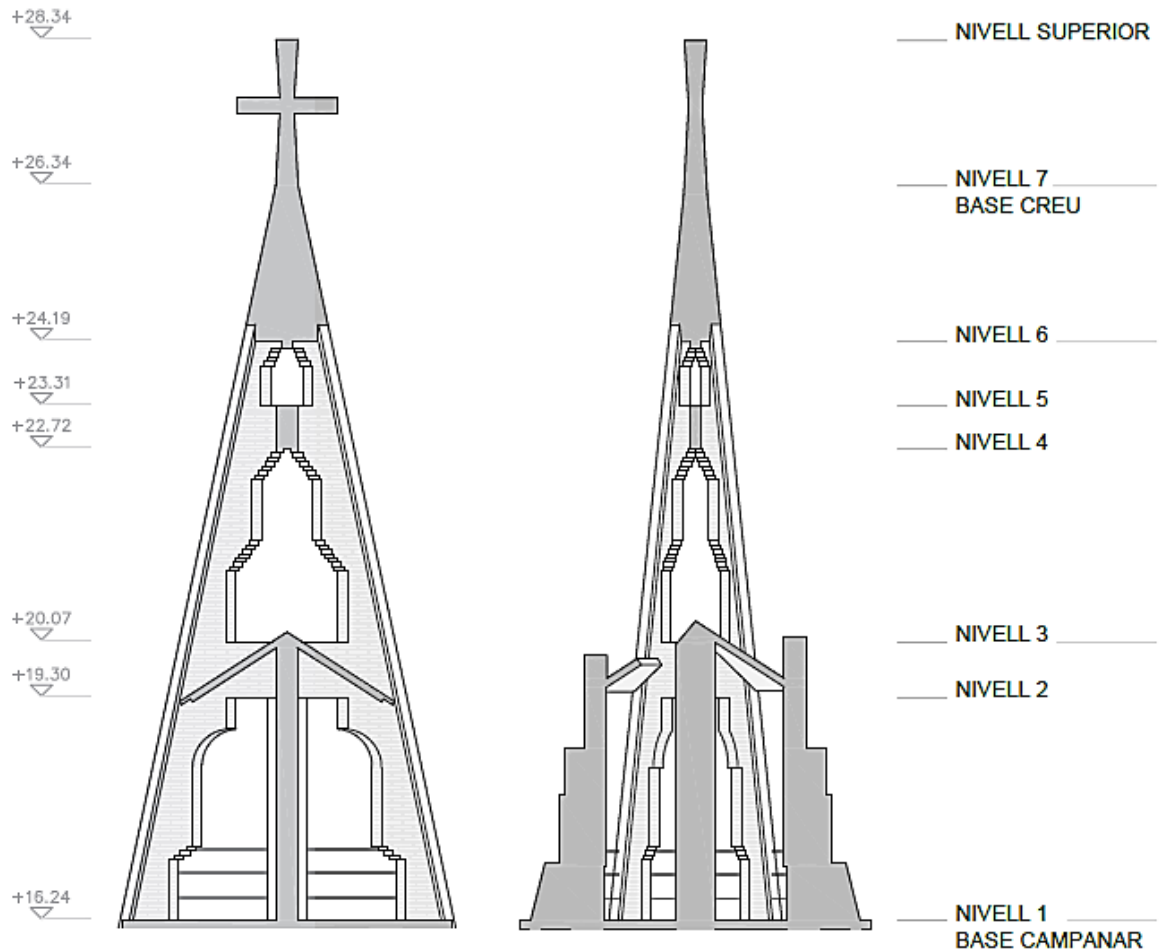


Figura 27: Imatge estreta del projecte tècnic on es marquen els nivells del campanar

Aquestes cotes fan referència a l'alçada de cada un dels nivells que estableix el projecte tècnic respecte de la rasant. Així doncs, la base del campanar es troba a la cota +15,24m i el coronament es dona a la cota +28,34m.

S'analitzen, doncs, els coeficients que cal aplicar per cada un d'aquests nivells a fi de complir amb el mínim que estableix el CTE, tenint en compte que caldrà fer una interpolació linealment per a cada una de les alçades per trobar el valor exacte que li pertoca a cada un dels punts.

Per a fer-ho, s'ha de fer una proporció entre els valors immediatament inferior i superior per a cada un dels nivells. A mode d'exemple de càlcul, es mostra el procediment pel primer nivell:

$$\text{Nivell 1: } \frac{c_{e18}-c_{e15}}{18-15} = \frac{\Delta c_{eN1}}{(16,24-15)} \rightarrow c_{eN1} = c_{e15} + \frac{1,24 \cdot (c_{e18}-c_{e15})}{3} = 2,1 + \frac{1,24 \cdot (2,2-2,1)}{3} = 2,14$$

Es realitza el mateix càlcul per a cada nivell i els resultats obtinguts es resumeixen a la següent taula:

Nivell	Cota respecte rasant	Coefficient a aplicar
1 (Base campanar)	+16,24	2,14
2	+19,30	2,24
3	+20,07	2,27
4	+22,72	2,36
5	+23,31	2,38
6	+24,19	2,41
7	+26,34	2,48
8 (Coronament)	+28,34	2,54

Com que l'ANSYS no permet fer una simulació amb un estat de càrregues sensiblement trapezoïdal, caldrà definir un valor tipus a partir del qual s'obté la pressió a aplicar al model. De manera que aquest sigui més restrictiu que els coeficients obtinguts a l'anterior taula i així s'asseguri que es compleix amb la normativa en tots els punts, s'utilitza el valor a 30 m de la rasant, **2,6**.

7.3.3.2 Determinació dels coeficients de pressió i succió

Els valors dels coeficients de pressió i succió estan definits a les taules 3.5 i 3.6, segons si es tracta d'un edifici de pisos o d'una construcció diàfana o nau industrial. També s'hi troben, a l'annex D del document, unes taules per a determinar uns coeficients més acurats en funció de la geometria de l'edificació i al tipus de vent que cal aplicar.

Aquestes taules, però, estan pensades per a edificis tipus capsa, que constin de façanes, amb una planta sensiblement rectangular, i una coberta, fet que al campanar no ocorre, ja que aquests elements queden molt difuminats i és difícil d'assimilar-los per a localitzar els valors a aplicar. És per això que s'utilitzaran els coeficients típics per a una construcció amb pisos, recollits a la taula 3.5 (figura 28).

Tabla 3.5. Coeficiente eólico en edificios de pisos

	Esbeltez en el plano paralelo al viento					
	< 0,25	0,50	0,75	1,00	1,25	≥ 5,00
Coefficiente eólico de presión, c_p	0,7	0,7	0,8	0,8	0,8	0,8
Coefficiente eólico de succión, c_s	-0,3	-0,4	-0,4	-0,5	-0,6	-0,7

Figura 28

Per esbrinar quina parella de coeficients cal escollir, primer s'haurà de definir quina és l'esveltesa de l'element. Utilitzant la figura 27, s'estableix l'alçada del campanar fent la diferència entre les cotes superior (nivell 8) i inferior (nivell 1). Així:

$$h_{campanar} = cota_{n8} - cota_{n1} = 28,34 - 16,24 = \mathbf{8,10\ m}$$

Del model s'extreuen les dues longituds de base, enquadrant el peu del campanar dins d'un rectangle i mesurant els seus costats. Aquestes longituds són de 2,28m i 4,20 m, pel costat curt i llarg, respectivament. Per tant, ara es poden calcular les esvelteses del campanar:

$$\lambda_{costat\ curt} = \frac{8,10}{2,28} = 3,55$$

$$\lambda_{costat\ curt} = \frac{8,10}{4,20} = 1,93$$

Essent les dues esvelteses superiors a 1,25, corresponent a la penúltima columna de la taula i veient que la variació dels coeficients és mínima, es prenen els valors d'una esveltesa 5. Així doncs, els coeficients de pressió i succió es recullen a la següent taula:

	Coefficient escollit
Coefficient de pressió (c_p)	0,8
Coefficient de succió (c_s)	-0,7

Cal recordar que el signe negatiu del coeficient de succió, com apunta el CTE, és per poder diferenciar millor entre els dos coeficients, però la direcció i sentit real de les forces serà el mateix.

7.3.3.3 Valor de pressió i succió a aplicar al model

Un cop obtinguts els factors per trobar el valor de pressió i succió que s'aplicarà, els substituïm a la fórmula donada i resolem:

Pressió

$$q_p = q_b \cdot c_e \cdot c_p \rightarrow q_p = 0,5 \cdot 2,6 \cdot 0,8 = \mathbf{1,04\ MPa}$$

Succió

$$q_s = q_b \cdot c_e \cdot c_s \rightarrow q_s = 0,5 \cdot 2,6 \cdot 0,7 = \mathbf{0,91\ MPa}$$

En el model, per a una direcció determinada s'aplicarà a la cara frontal la pressió, i a la cara oposada la succió.

8. Creació i desenvolupament dels models

Els models en tres dimensions creats per l'anàlisi del comportament del campanar enfront el vent s'han dissenyat amb tres tipus de programari diferent: l'AutoCAD 3D, el Rhinoceros i l'ANSYS Workbench. El primer ha servit per marcar els eixos dels elements que formen el campanar, el segon, a través de l'arxiu en AutoCAD, per definir la geometria completa del campanar, establint els gruixos dels elements i transformant-los en sòlids i, per últim, l'ANSYS ha permès definir la interacció dels sòlids creats, les condicions de contorn, els eixos de referència, els contactes i afegir les propietats físiques dels materials, per tal d'aconseguir que la maqueta virtual es comporti com ho fa el campanar a la realitat.

Aquest últim programa, també és el que s'ha utilitzat per afegir les accions aplicades al campanar, que s'han determinat al capítol 7 d'aquest treball.

8.1 Geometria

El primer pas per aconseguir en format digital la geometria del campanar en 3D és l'obtenció dels eixos dels elements que conformen el campanar. Aquest arxiu va ser facilitat pel doctor arquitecte Roger Señís, de la Universitat Politècnica de Catalunya.

En la següent captura (figura 29), s'ensenya la informació del document rebut. Es tracta d'una geometria definida a base de polilínies amb què ja queda definida la geometria més elemental per crear els models: distribució bàsica, alçades i gruixos d'alguns elements.

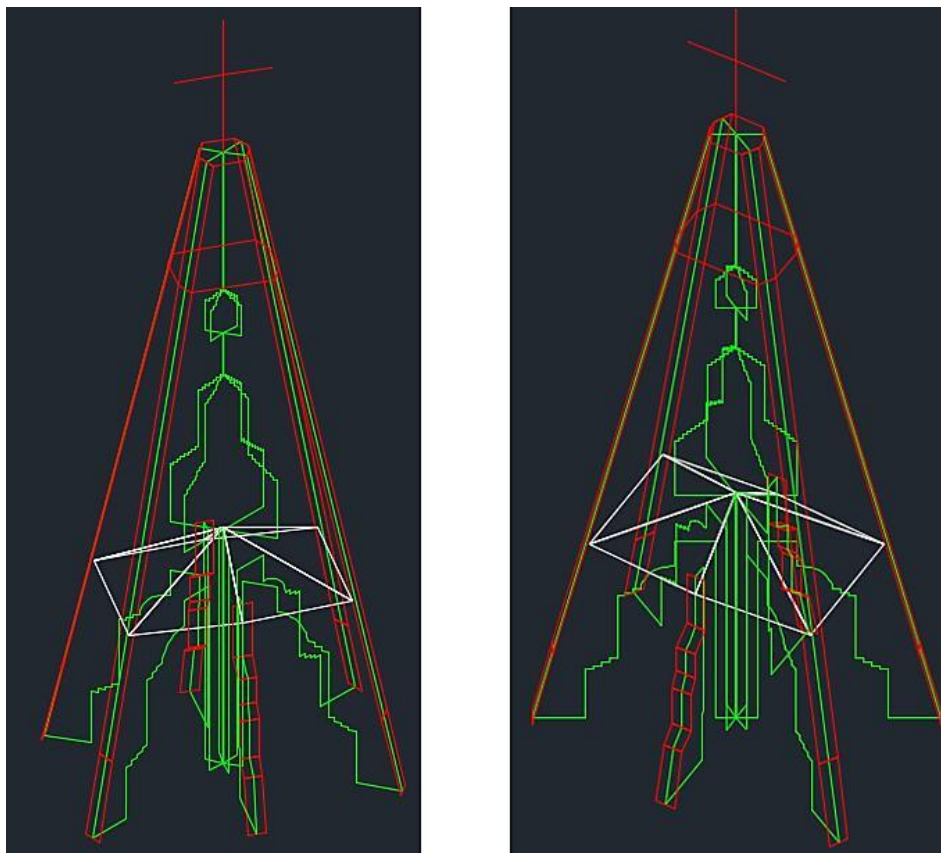


Figura 29: Geometria base del campanar en AutoCAD

El següent pas, doncs, és complementar aquesta geometria amb dades que s'havien pres *in situ* per obtenir una versió de la geometria que sigui més descriptiva. Per a fer-ho, s'exporta el document CAD al programa de modelització escollit: el *Rhinoceros 5.0* (figura 30).

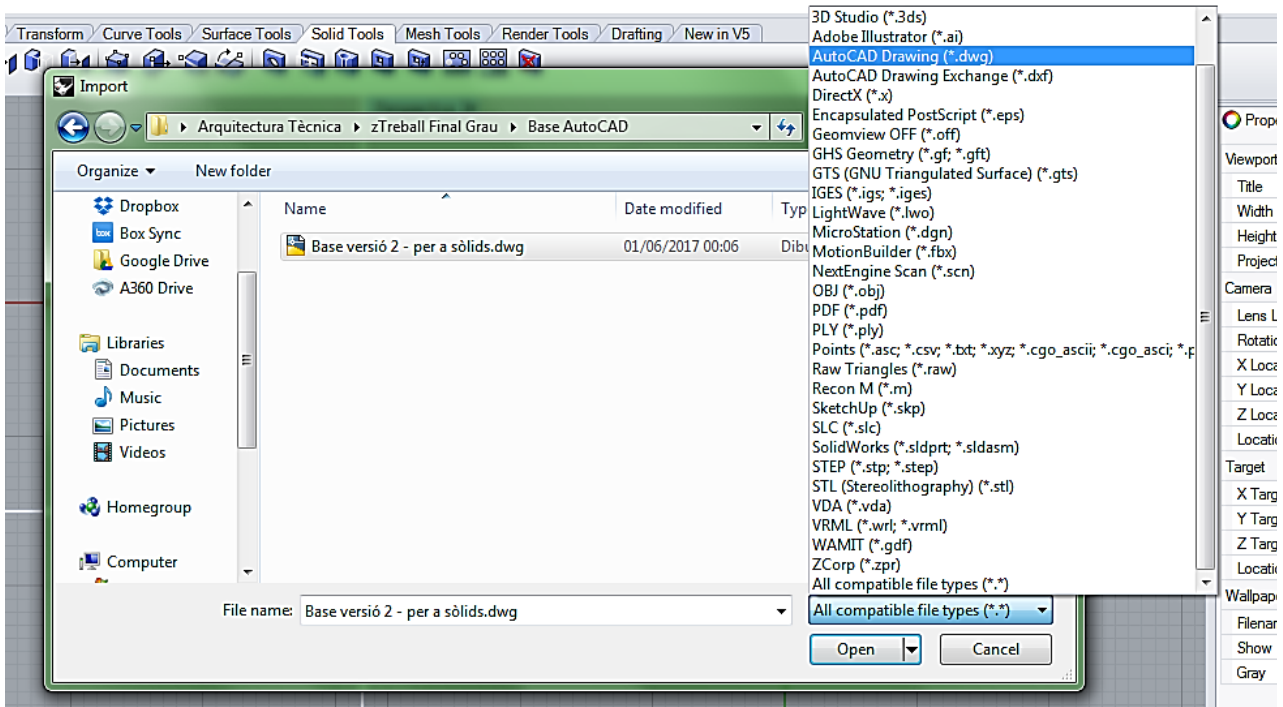


Figura 30: Importació de l'arxiu AutoCAD al Rhinoceros

A continuació s'ensenya el procés de modelització d'una de les costelles principals del campanar:

S'oculten tots els objectes excepte aquelles línies que defineixen una de les costelles principals, que serveixen com a línies auxiliars i es dibuixa la base de la costella segons les mesures preses. Llavors, cal copiar la línia auxiliar d'alçat, de color verd, als segments que marquen les cares interiors de la costella, i la línia auxiliar vermella a la cara interior de la "T" (figura 31):

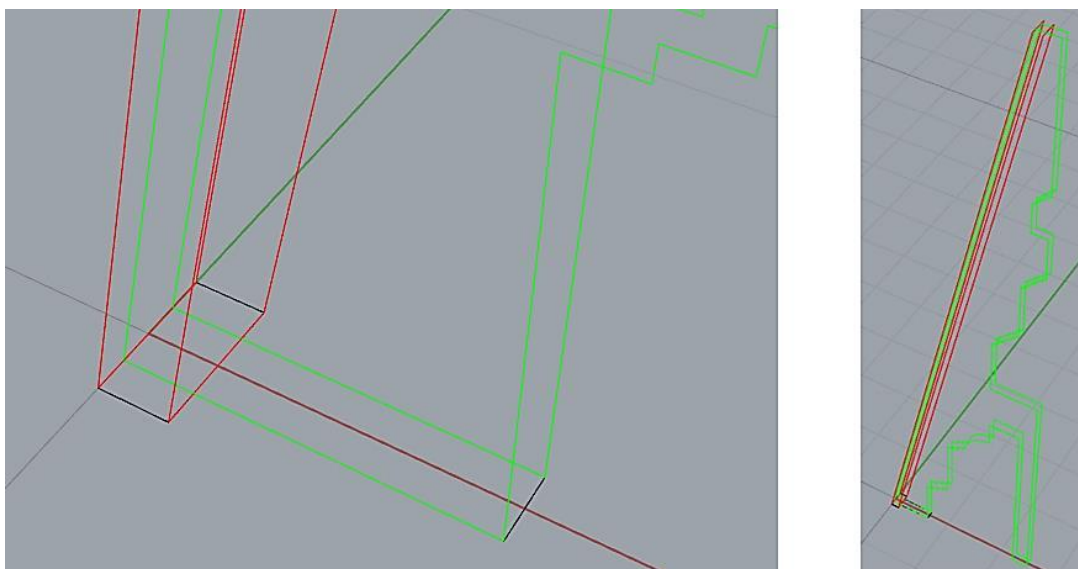


Figura 31: A l'esquerra, base dibuixada i línies auxiliars a les cares exteriors. A la dreta, visió general de la costella

El següent pas és donar cos a l'esquema de la costella. Per fer-ho cal resseguir cada una de les cares formant polígons uniplanars. En aquest punt, es comença a treballar amb superfícies, que és el pas intermedi perquè la costella esdevingui un sòlid en si.

Amb el comandament *Surface Tools/Surface from planar curves*, se selecciona cada una de les cares creades i se les transforma en un conjunt de superfícies (figura 32):

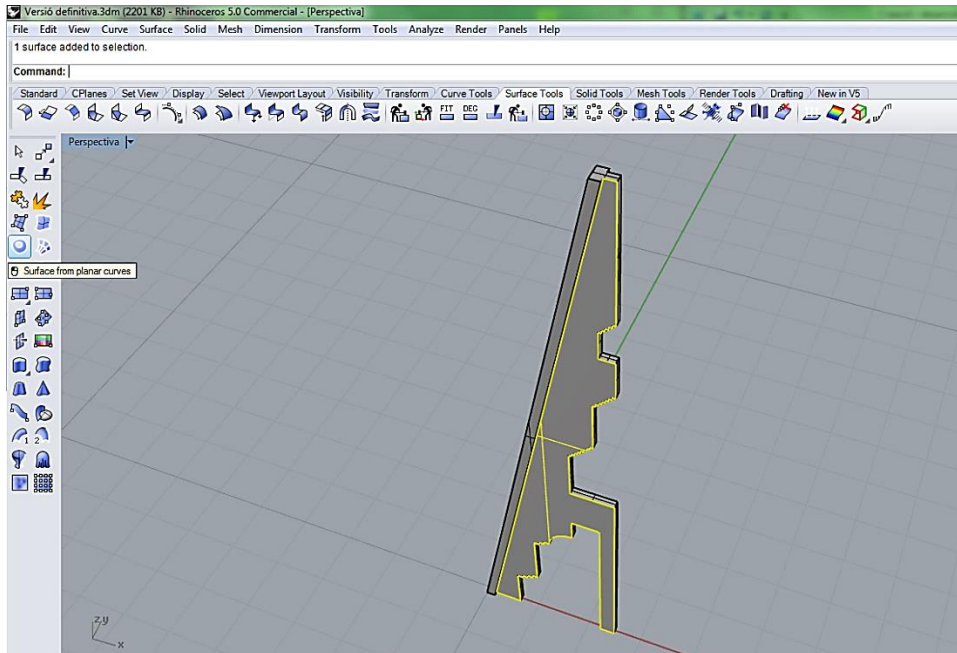


Figura 32: Creació de superfícies a partir dels polígons de cara

Per últim, les superfícies s'uneixen creant el sòlid de la costella, mitjançant el comandament *Standard/Join* (figura 33):

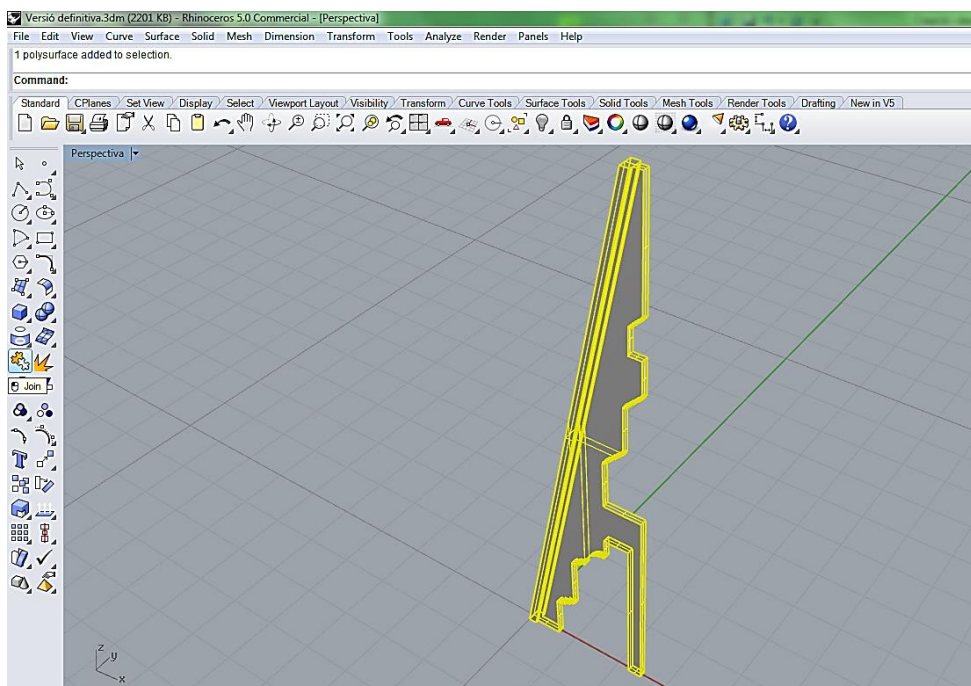


Figura 33: Sòlid de la costella

Cal seguir el mateix procediment amb tots els altres elements del campanar, de manera que s'aconsegueixi una figura en tres dimensions formada per diferents sòlids.

Abans de donar per bona la geometria elaborada, cal millorar la interacció dels elements entre ells, és a dir, s'ha de procurar que no se superposin sòlids en cap dels punts però sempre es mantingui el contacte entre ells.

Per a fer-ho, s'utilitzen essencialment dos comandaments dins la pestanya de *Solid Tools*: *Boolean Split* i *Boolean Union*. El primer té a veure amb el descrit en el paràgraf anterior, ja que la seva funció és la d'interseccionar dos sòlids, creant volums independents en aquelles zones on els dos elements es troben. Per tant, aplicant aquesta acció i esborrant cuidadosament tots els sòlids sobrants, s'aconseguirà un model net i consistent geomètricament. El segon, el *Boolean Union*, es fa servir per unir aquells volums que tenen característiques iguals, de manera que a ulls del programa, siguin el mateix sòlid. En aquest cas, s'utilitza aquesta acció per unir les costelles principals i per unir aquells trams on dues peces del replà es toquen.

Una altra pràctica recomanada és la de validar els sòlids creats, per evitar tenir problemes amb la geometria que s'exporti al programa de càlcul. Això es fa a *Mesh tools/Check objects*.

El model final és el següent (figura 34):

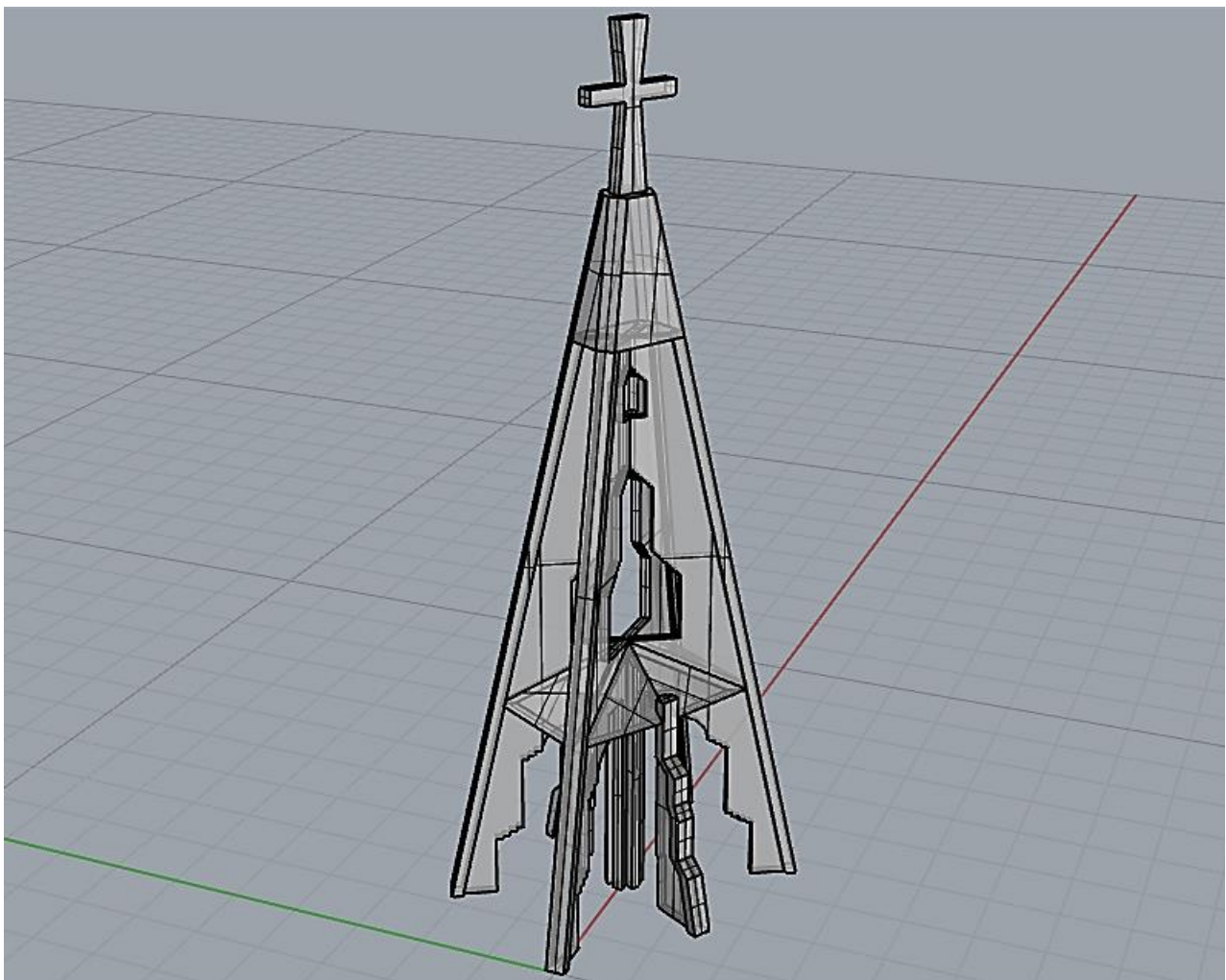


Figura 34: Model final del campanar

8.1.1 Elements del sistema de tesat

Per a simular el campanar tesat, al model que mostra la figura anterior cal afegir-li un sistema de barres i suports. Aquestes barres han de dividir-se en tres trams però cal que hi hagi continuïtat perquè les diferents parts treballin conjuntament a l'hora d'analitzar el seu comportament.

Per a fer-ho, primer s'introdueixen les vuit barres, de les quals se'n coneix el diàmetre i la inclinació, que coincideix amb la de les costelles principals:

Es dibuixa una circumferència amb centre en un punt equidistant de les dues cares de costella i de distància igual a la meitat de la longitud de la zona en T, i s'hi connecta una línia auxiliar de direcció que tindrà el tirant. Acte seguit, amb el comandament *Solid Tools/Extrude curve along curve* es genera un cilindre oblic amb la inclinació donada per la recta auxiliar (figura 35)

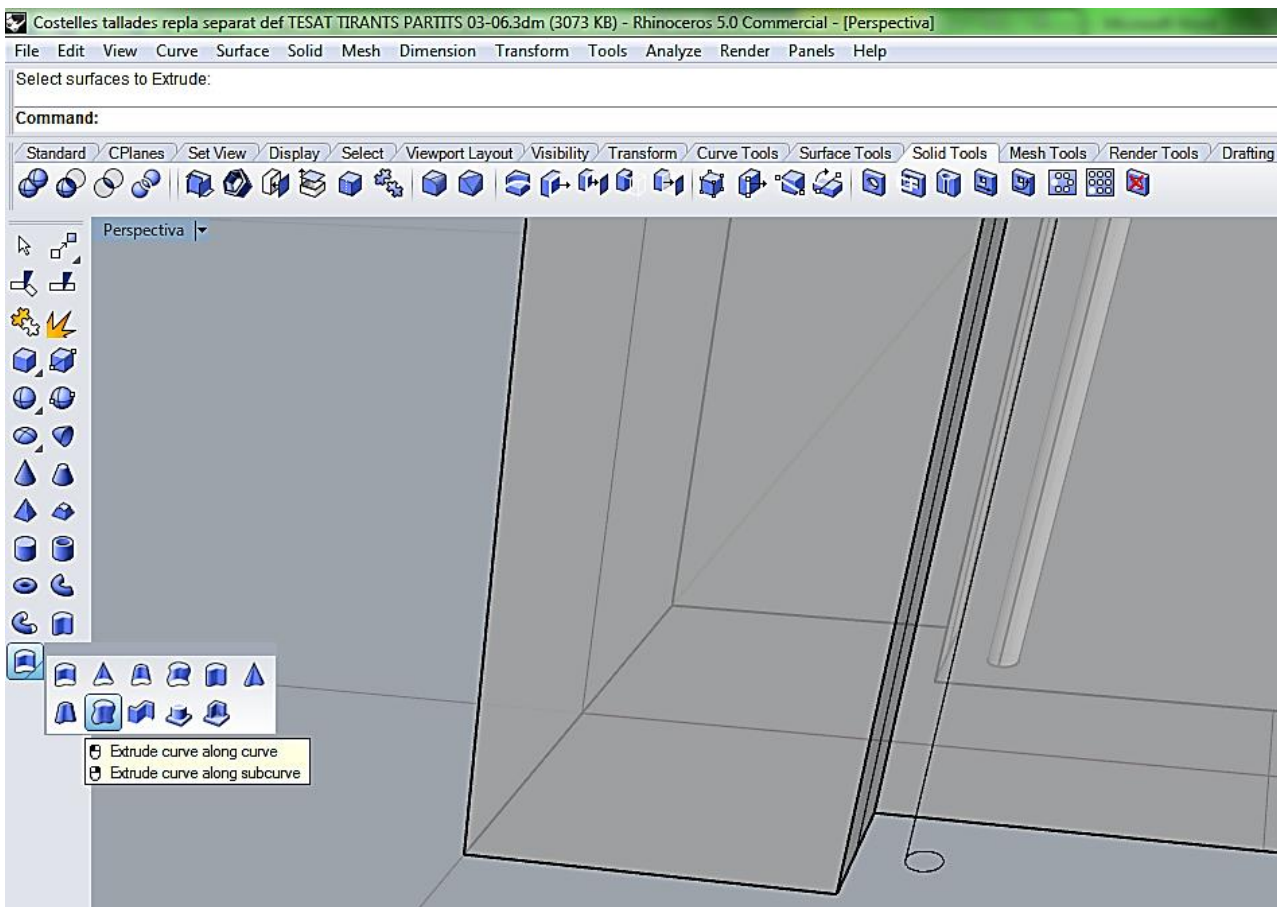


Figura 35: En primer pla, dibuix del tirant abans de ser extrudit. Al fons, tirant ja extrudit

Repetint el mateix procediment per a cada costella, es completa el dibuix de les barres. Ara cal dibuixar els suports, que han estat pensats com un prisma quadrangular de costat 6 cm i d'alçada 2 cm.

El procediment és semblant al dels tirants, però per agilitzar el dibuix i sabent que aquest prisma és recte, un cop dissenyada la planta del prisma, s'aplica el comandament *Solid Tools/Extrude closed planar curve*.

Un cop s'extrudeix aquest sòlid, es veu com part d'aquest element entra dins de la costella, fet que pot provocar errors quan s'exporti el model a l'ANSYS. Serà necessari, doncs, utilitzar el comandament *Solid Tools/Boolean Split* i esborrar el fragment de suport embegut dins la costella (figura 36). També s'ha d'aplicar el mateix comandament per eliminar la part de suport que es troba amb el tirant prèviament realitzat.

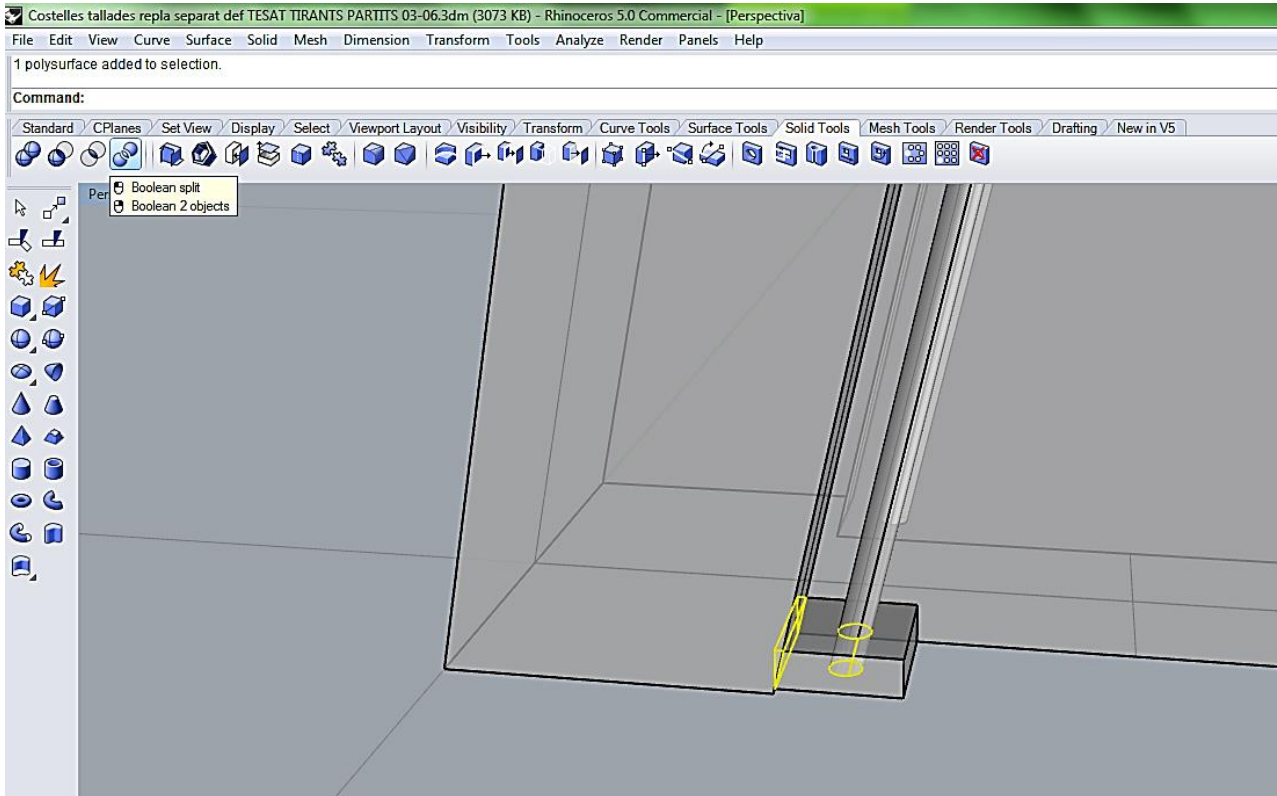


Figura 36: Suport dibuixat i selecció dels objectes a eliminar

Un cop dibuixat el tipus de suport, cal copiar-lo a la resta de nivells del tirant. Perquè aquest mecanisme no tingui problemes de convergència a l'hora d'efectuar les diferents anàlisis, es va observar que la millor opció per col·locar els tirants era fent un doble suport. D'aquesta manera, s'aconsegueix que cada tram de tirants tingui un parell de suports propis, fet que afavoreix el càlcul.

La manera de procedir és la següent: es copia el suport a les distàncies que es detallen al capítol 7, "Accions aplicades al campanar", i se'n fa una còpia a 2 cm superiorment i inferior, de manera que les cares de les noves platines coincideixin amb les cares de la prèvia (figura 37).

El raonament darrere d'aquesta operació és intentar perdre la mínima longitud de barra possible mentre s'aconsegueix l'efecte del doble suport i es dona suficient distància entre platines de manera que, en cap cas, aquestes puguin interactuar entre elles.

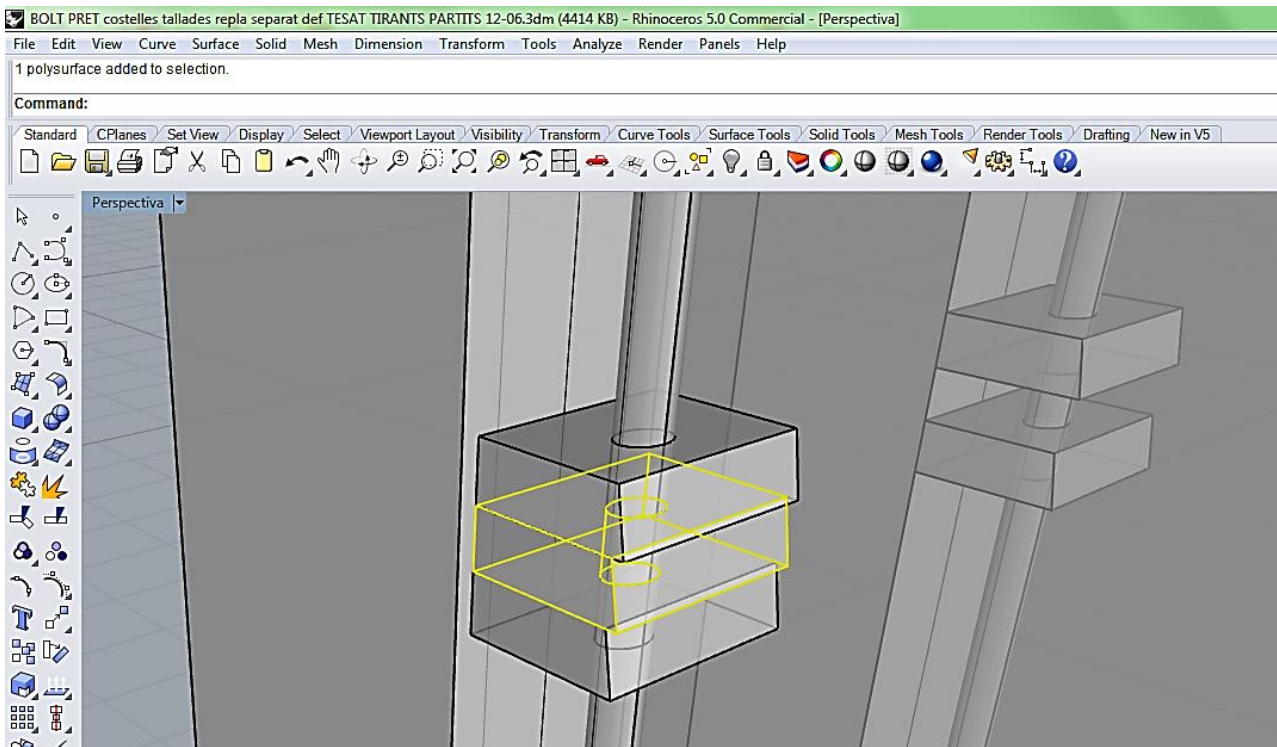


Figura 37: En primer pla, suport previ copiat des de la base, i la parella de suports definitius. Al fons, mecanisme definitiu

Per últim, en aquest punt cal dividir la barra en tres trams: el tram superior, el tram intermedi (de longitud 2 cm i que queda entre les dues platines) i el tram superior. Utilitzant el comandament *Solid Tools/Boolean Split*, se separen i queden definitivament com a tres elements diferents, on la barra intermèdia funciona com a element connector dels dos trams de tirant actius i així s'aconsegueix que el sistema treballi solidàriament.

Com a última operació per deixar el mecanisme completament acabat, a la base del coronament del campanar es disposa una platina de 2 cm de gruix que servirà per rebre la part superior dels vuit tirants del campanar (figura 38).

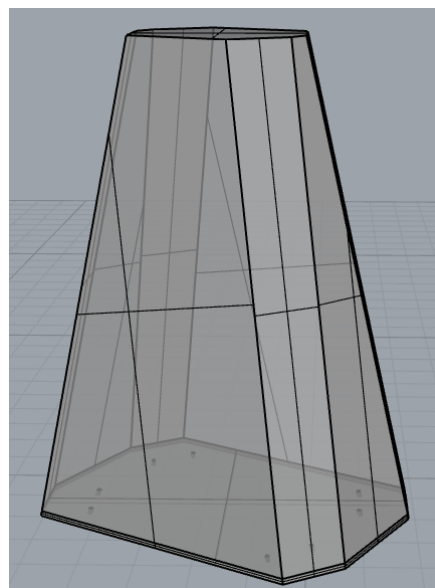
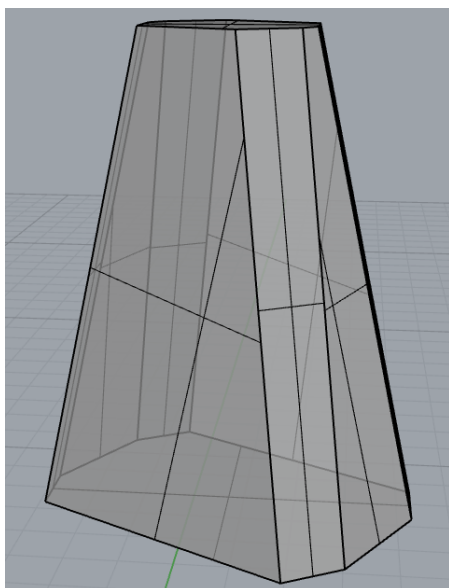


Figura 38: A l'esquerra, coronament del campanar previ. A la dreta, coronament amb platina del campanar tesat. Així doncs, el model per al campanar tesat és el següent:

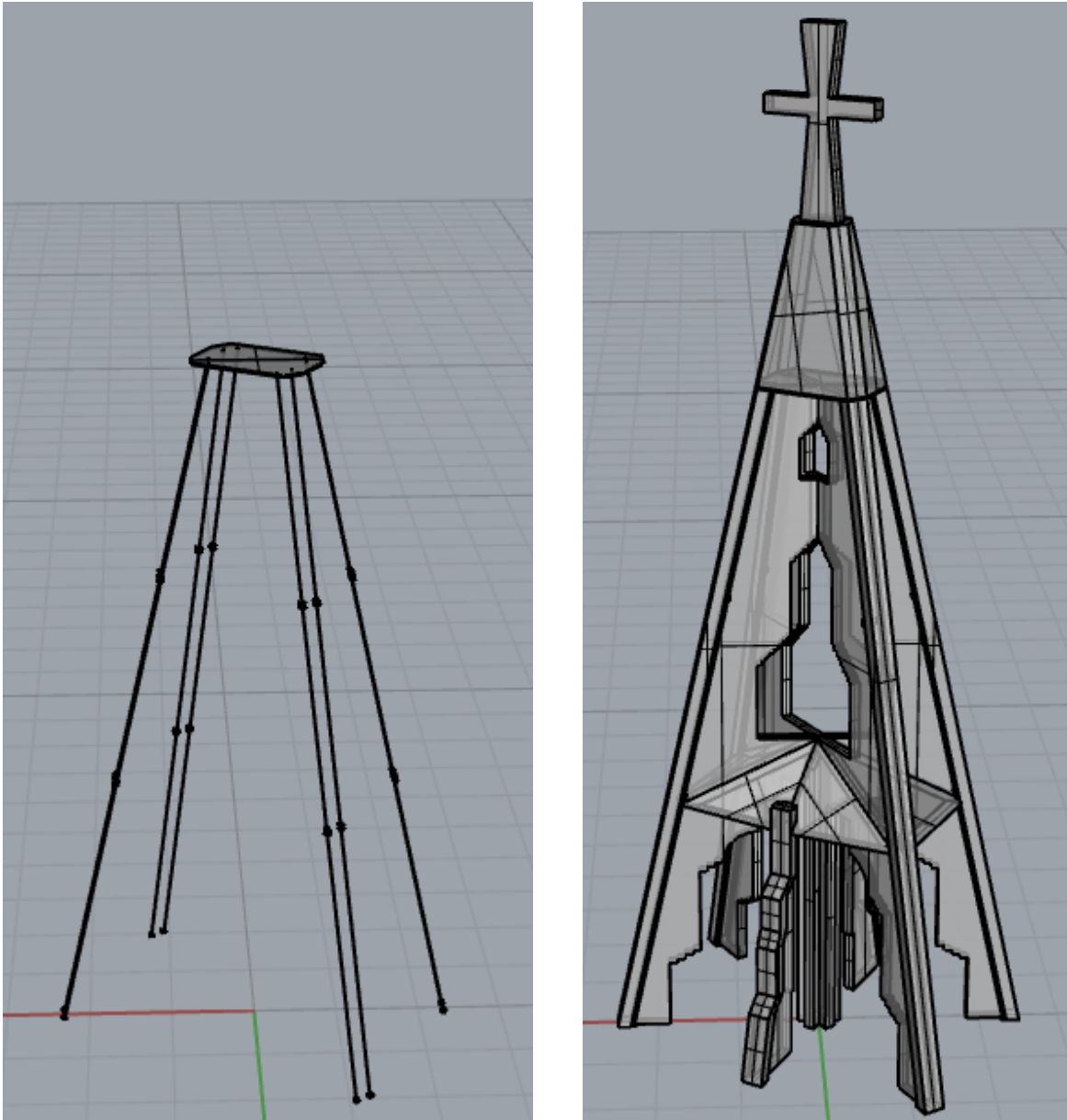


Figura 39: A l'esquerra, sistema complet de tesat. A la dreta, model del campanar tesat

8.1.2 Exportació de geometria a ANSYS Workbench

Un cop la geometria s'ha completat, cal exportar l'arxiu generat pel Rhinoceros a l'ANSYS.

Per fer-ho, s'inicia l'ANSYS Workbench i es tria el tipus d'anàlisi *Static Structural*, situat a la columna esquerra del programa. Automàticament s'obre una taula on es pot importar la geometria sobre la qual s'ha de realitzar l'anàlisi.

Clicant el botó dret sobre *Geometry*, s'obre l'explorador d'arxius des d'on se selecciona la geometria desitjada. Un cop la geometria ja ha estat enllaçada, es pot començar a preparar el model per al càlcul.

8.2 Paràmetres mecànics dels materials utilitzats

El primer que cal detallar quan es vol fer una anàlisi són els paràmetres dels materials presents al model. Clicant dues vegades sobre *Engineering Data*, s'obre una finestra des d'on es pot gestionar aquests valors de càlcul (figura 40).

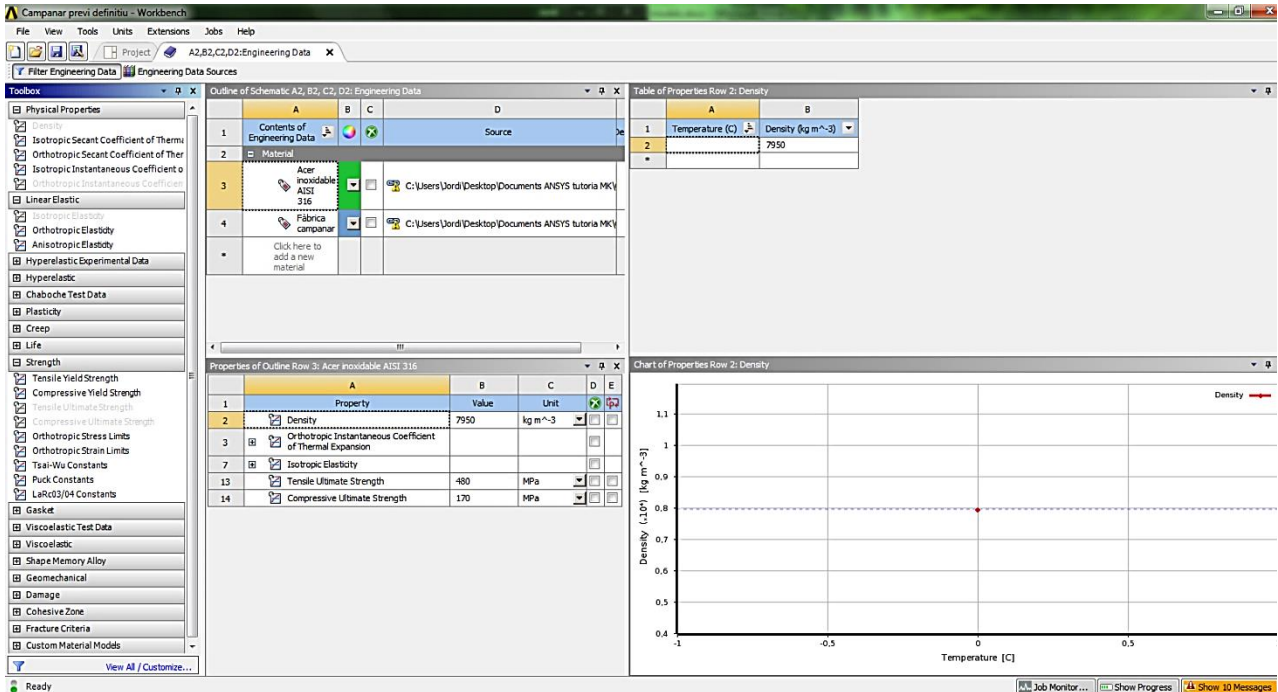


Figura 40: Captura del menú *Engineering Data*, amb els paràmetres dels materials introduïts

Tal com ensenya la figura anterior, caldrà escollir cada un dels paràmetres que es necessitin i donar-los el valor desitjat. En aquest cas, s'han introduït els valors d'acord amb el capítol 5, *Paràmetres mecànics dels materials utilitzats*, d'aquest treball.

Un cop s'ha acabat de completar aquesta finestra cal dirigir-se a *Model* i des del desplegable de *Geometria*, assignar el material a cadascun dels elements. També dins d'aquesta secció, es poden modificar altres paràmetres dels sòlids, com ara el seu comportament, la temperatura de referència i si poden patir accions degudes a l'acció tèrmica.

En general, els elements del campanar tindran un comportament flexible, ja que han de poder-se deformar enfront dels esforços que s'apliquin, la temperatura de referència serà la de l'entorn (més endavant se li donarà un valor a aquest paràmetre) i els elements de fàbrica no podran patir accions tèrmiques, a diferència dels d'acer inoxidable (figura 41).

A *Properties*, s'hi pot consultar el volum i massa del model sencer, o dels elements seleccionats, en funció de les densitats que prèviament s'hagin fixat.

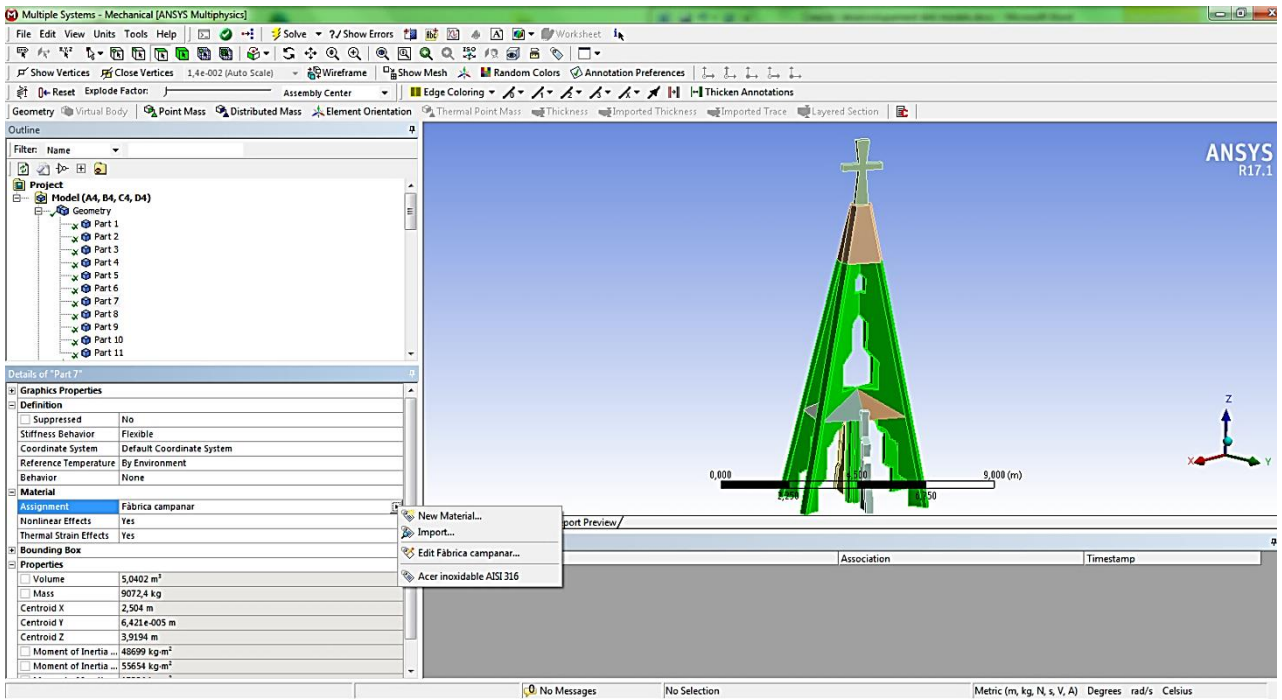


Figura 41: Assignació de material i d'altres paràmetres dels elements

8.3 Sistema de coordenades de referència

És important definir un o diversos sistemes de coordenades de referència per poder treballar còmodament, sobretot a l'hora d'afegir la direcció i el sentit a les accions que s'hi apliquen (figura 42).

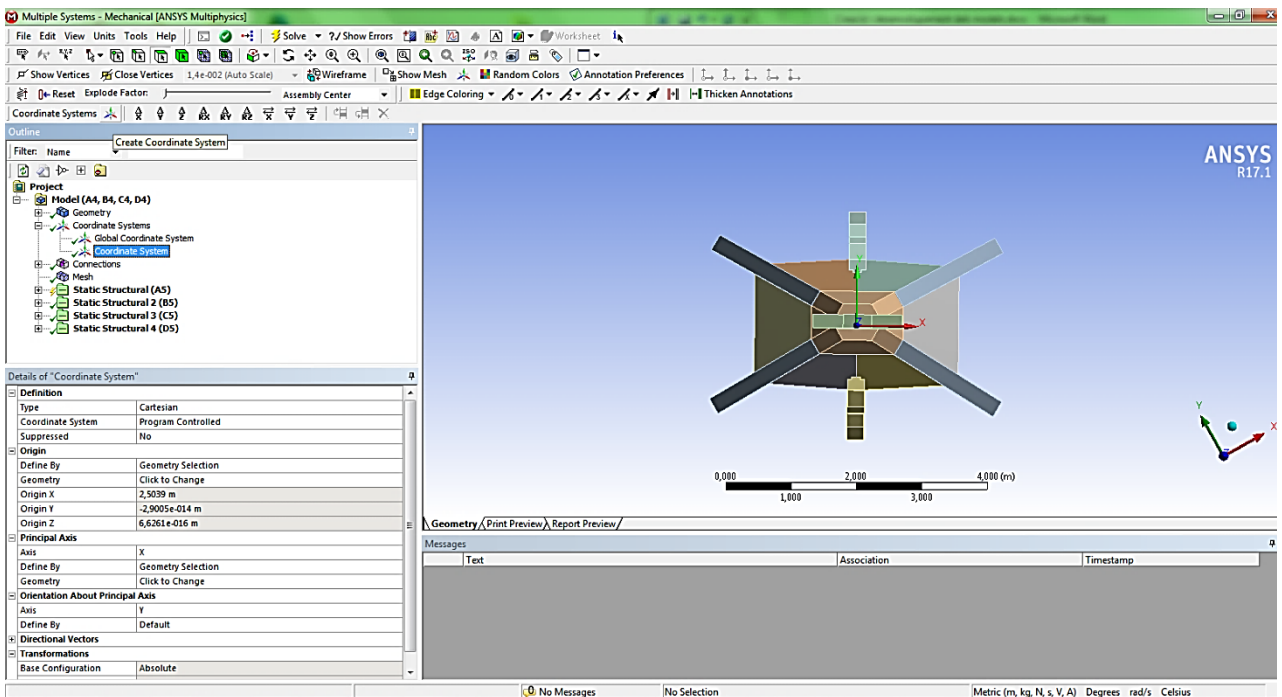


Figura 42: Sistema de coordenades creat per afegir les accions més còmodament

El sistema de referència que ve per defecte és el mateix que s'ha exportat del Rhinoceros. Aquest sempre es mostra a la part inferior dreta de la pantalla. A la figura, però, també es pot veure el nou sistema de referència, situat al centre de la planta, a la base del model.

Amb aquesta nova terna, s'aconsegueix que els eixos X i Y estiguin en plans de simetria del campanar i siguin perpendiculars als costats del rectangle on es troba inscrit, de manera que aquests ja proporcionen la direcció i sentit de l'acció del vent a aplicar. L'eix Z, d'altra banda, es manté a la base del campanar.

Per crear un sistema de coordenades cal clicar sobre del desplegable i, a la barra d'eines que apareix, seleccionar *Create Coordinate System*. S'obrirà aleshores un menú des d'on es pot definir cada un dels paràmetres en termes de direcció, sentit i mòdul de cada un dels eixos de coordenades.

8.4 Contactes

Els contactes defineixen el comportament de dos cossos que es toquen entre ells. Aquest punt és molt important per obtenir un model que es comporti com succeeix a la realitat.

El programa mateix genera una sèrie de contactes automàticament quan s'insereix la geometria del model. Aquests generalment són vàlids, i se'n podran afegir o eliminar en funció de les necessitats.

Per a aquest treball, s'ha optat per esborrar tots els contactes que genera el programa i anar definint un per un els contactes de manera manual. Això suposa una inversió de temps important, però alhora s'assegura el complet coneixement dels contactes amb què es procedeix a fer les diferents anàlisis.

Quant a contactes, l'ANSYS té predefinits cinc tipus de contactes entre els cossos. Són els següents:

- **Bonded:** És el contacte que hi ha per defecte. Aquesta tipologia fa que els dos sòlids estiguin encastats entre ells, com si fossin el mateix element. No permet, per tant, ni el lliscament de les superfícies de contacte ni la separació entre elles.
- **No separation:** Aquest tipus de contacte té un grau menys que el Bonded. No permet la separació entre les superfícies de contacte però sí que poden lliscar.
- **Frictionless:** El contacte que es crea entre dos sòlids els permet separar-se lliurement en presència d'un esforç de tracció.
- **Rough:** Si s'escull *Rough*, el contacte que es crea no permetrà el lliscament entre les superfícies mentre aquestes es toquin (coeficient de fregament infinit) però els cossos poden separar-se.
- **Frictional:** Es crea a partir d'un coeficient de fricció que s'introdueix i no permet la separació.

Per completar aquesta etapa, primer caldrà identificar cada un dels contactes que hi ha al campanar. Quan s'ha modelat la figura, ja s'ha fusionat les quatre costelles principals de manera que són un únic sòlid. Els conjunts de contactes que es defineixen bàsicament poden englobar-se en els següents grups:

- Contactes entre les costelles i el replà
- Contactes entre les costelles i el coronament
- Contactes entre les peces del replà
- Contactes entre el coronament

En el cas del campanar tesat, a part dels anteriors, també hi haurà:

- Contactes entre tirants
- Contactes entre les costelles i els suports dels tirants
- Contactes dels tirants i el coronament

Això genera 14 contactes al model previ i 105 al model tesat.

El procés per crear-ne i definir-ne un (figura 43) és el següent:

Fent clic amb el botó dret del ratolí sobre *Contacts*, s'escull *Create contact*. Llavors se selecciona la primera superfície i s'assigna a *Contact Bodies*, i fent la mateixa operació, es defineix l'altra superfície de contacte, *Target Bodies*.

Immediatament a sota d'aquesta opció, es pot escollir entre els tipus de contactes que s'han explicat anteriorment. El contacte haurà estat creat, i se'n podrà modificar les propietats a la llista de la part superior esquerra. És molt important establir un ordre per tal de no cometre errors, de manera que és aconsellable crear carpetes amb cada un dels conjunts de contactes.

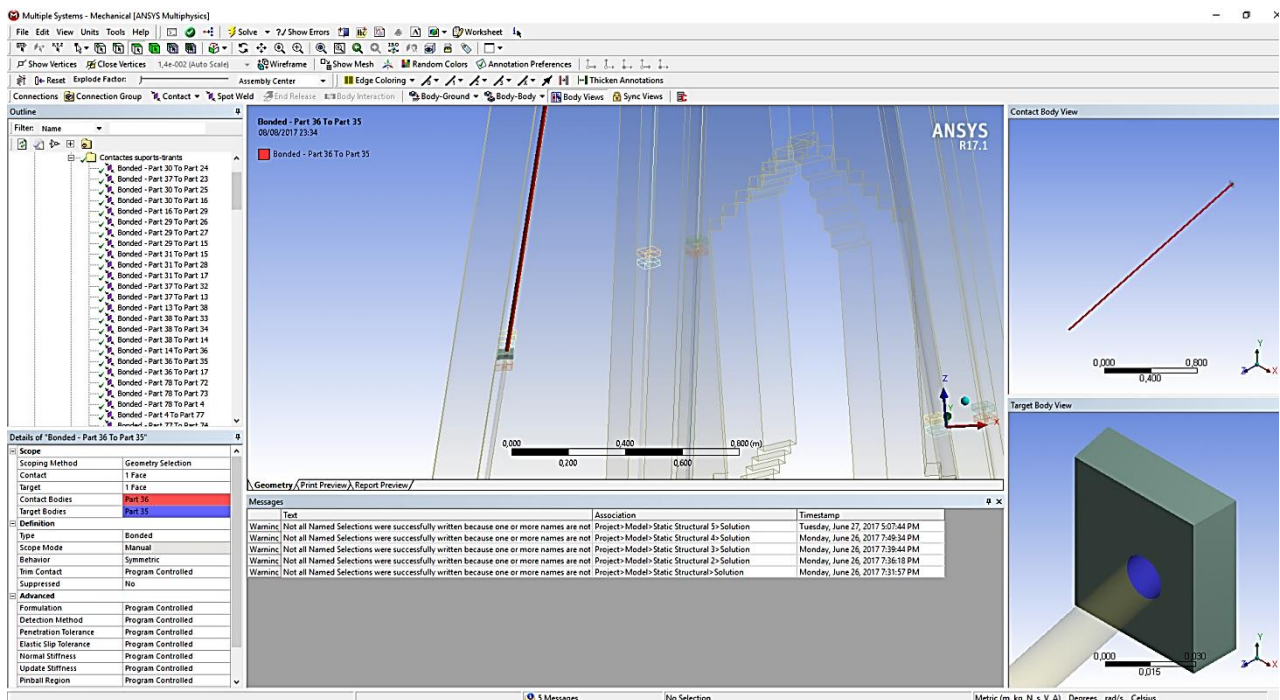


Figura 43: Creació de contacte

8.5 Mallat del campanar

El mallat d'una figura representa transformar la figura modelitzada en un cos format per petits elements. Els vèrtexs d'aquests nous elements seran els que el programa calcularà i utilitzarà per mostrar els resultats obtinguts.

L'objectiu és crear una malla d'elements que representi bé el campanar i amb prou elements perquè l'anàlisi sigui consistent. Alhora, però, cal evitar un excés de mallat, on els elements siguin molt petits, ja que aquesta no serà una malla optimitzada i requerirà molts esforços per solucionar les anàlisis, en termes de temps i components de l'ordinador utilitzat.

Clicant amb botó dret damunt la pestanya *Mesh* i escollint *Create Mesh Automatically*, el programa proposa una malla automàtica que pot servir com a punt de partida (figura 44). Generalment aquesta té poca qualitat i cal refinar-la.

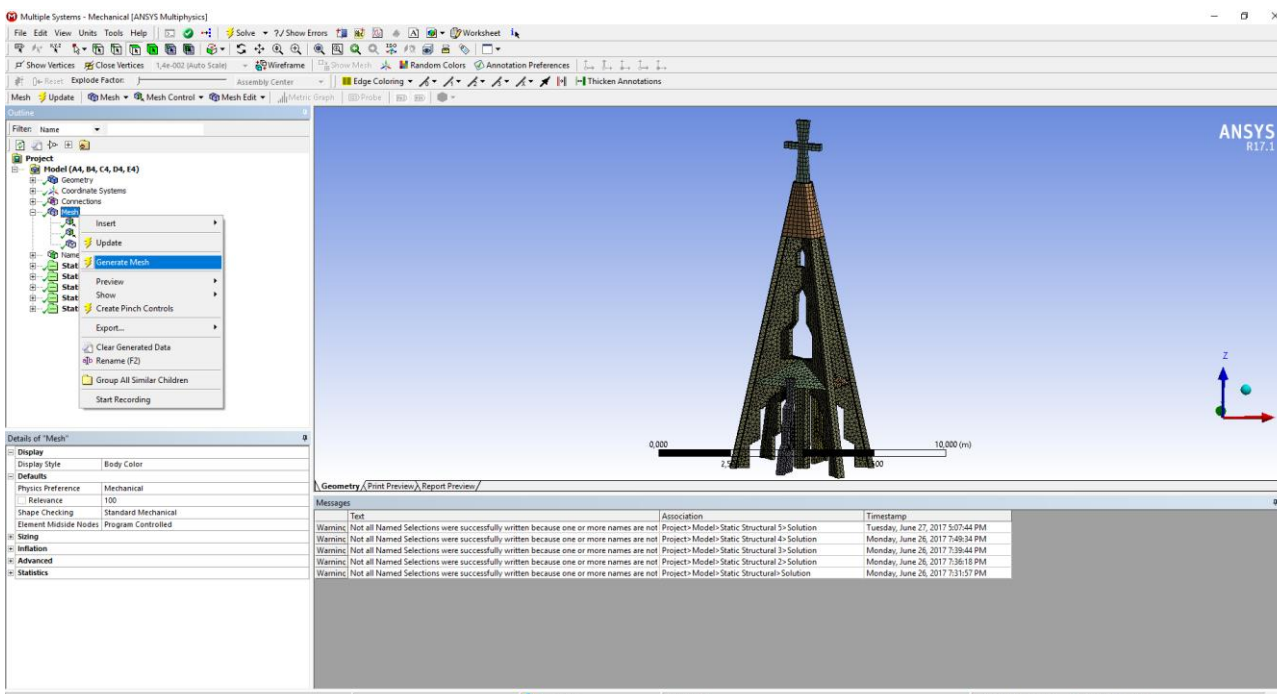


Figura 44: Creació de malla automàtica. A la imatge, però, es mostra la malla definitiva del model testat

Per modificar la malla, s'han de variar els paràmetres que apareixen a l'anterior figura, a la part inferior esquerra, *Details of Mesh* (figura 45).

Es variarà, en primer lloc, el paràmetre *Relevance*, que té a veure amb el grau amb què es vol que la malla sigui fidel a la geometria importada. Així doncs, s'estableix el valor 100, que representa la màxima prioritat. Actualitzant la malla, pot veure's el resultat d'aplicar-hi aquesta rellevància.

Ara, cal centrar-se amb l'apartat *Sizing*, que controla les dimensions límit dels elements i la relació entre els elements contigus. S'escull que *Size Function* sigui uniforme, *Relevance Center* sigui *Fine*, l'*Smoothing*, el nivell de polit de les superfícies, sigui alta i la transició entre els elements sigui lenta, de manera que vagin creixent i decreixent de manera més gradual.

Details of "Mesh"	
Display	
Display Style	Body Color
Defaults	
Physics Preference	Mechanical
<input type="checkbox"/> Relevance	100
Shape Checking	Standard Mechanical
Element Midside Nodes	Program Controlled
Sizing	
Size Function	Uniform
Relevance Center	Fine
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	High
Transition	Slow
<input type="checkbox"/> Min Size	Default (1,3994e-003 m)
<input type="checkbox"/> Max Face Size	Default (0,139940 m)
<input type="checkbox"/> Max Tet Size	Default (0,279870 m)
<input type="checkbox"/> Growth Rate	Default (1,10)
Automatic Mesh Base...	On
<input type="checkbox"/> Defeaturing Toleran...	Default (6,9969e-004 m)
Max Dual Layers in Thi...	No
Minimum Edge Length	0, m
Inflation	
Advanced	
Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	63877
<input type="checkbox"/> Elements	26331
Mesh Metric	None

Figura 45: Details de la malla del model previ, un cop modificats

Un cop realitzats els canvis, s'actualitza el model i s'observa que els elements de fàbrica tenen ara una malla acceptable.

En canvi, per als elements d'acer al model tesat, s'observa que el mallat obtingut és massa fi, i que això pot alentir innecessàriament el posterior càlcul, ja que per a les anàlisis que s'han de fer, no proporcionaran gaire més informació de la que s'ha calculat anteriorment, al capítol 7 d'aquest treball.

Per poder crear zones de mallat dins d'un mateix model, cal fer botó dret sobre *Mesh*, i dirigir-se a *Insert*. Des d'aquest desplegable, es poden definir zones de mallat en funció del tipus d'element a utilitzar (cub i/o tetraedre) i de la dimensió, entre d'altres. Pel model del campanar, es pot aconseguir una malla òptima a través del mètode de mallat i les dimensions dels elements.

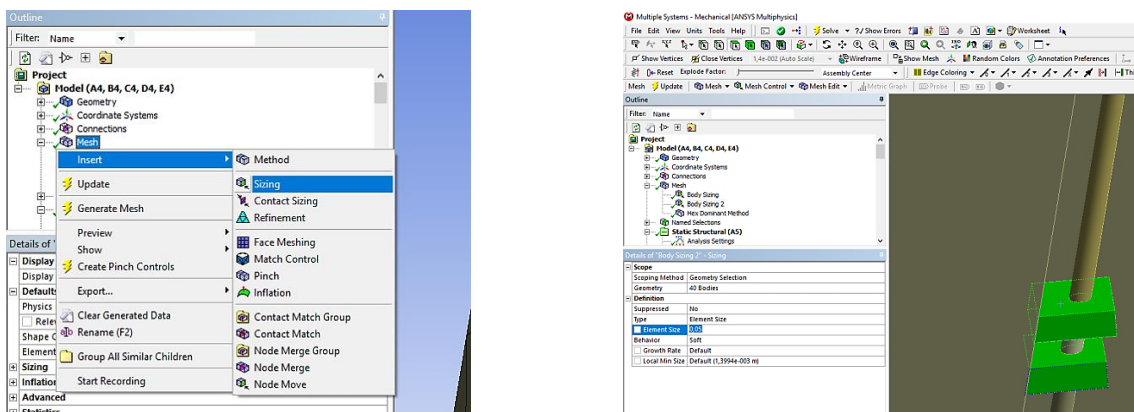


Figura 46: Procés de mallat per zona

En concret, s'ha realitzat zones de mallat local per als tirants i per als suports, en ser sòlids de dimensions molt menors a la resta, i és necessari que tinguin una qualitat que permeti analitzar el model sense errors de convergència en aquests punts.

Finalment, per avaluar la malla objectivament, cal obrir la pestanya *Statistics*, que mostra quin nombre d'elements i nodes té el model o qualsevol sòlid que se seleccioni. A part, per determinar quina és la qualitat d'una malla, l'ANSYS permet una revisió d'aquesta malla en diferents aspectes. Principalment, cal revisar l'*Element Quality* i l'*Aspect Ratio* (figures 47 a 50):

- **Element Quality:** Els elements de la malla són principalment tetraedres o cubs. Segons la bibliografia, allò òptim és aconseguir que aquests siguin tan semblants a aquests poliedres com sigui possible. Aquesta primera revisió permet comprovar els percentatges d'elements creats en funció de la seva qualitat geomètrica a través d'una relació entre el volum i els costats de l'element.
- **Aspect Ratio:** Aquesta opció revisa la regularitat de les cares dels elements. La relació ideal, per a poliedres regulars, és 1.

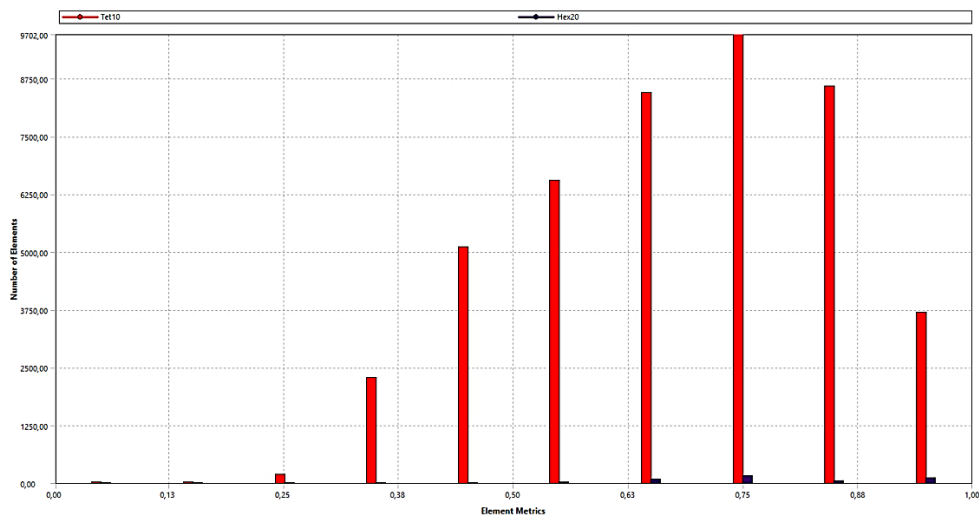


Figura 47: *Element Quality* del campanar previ

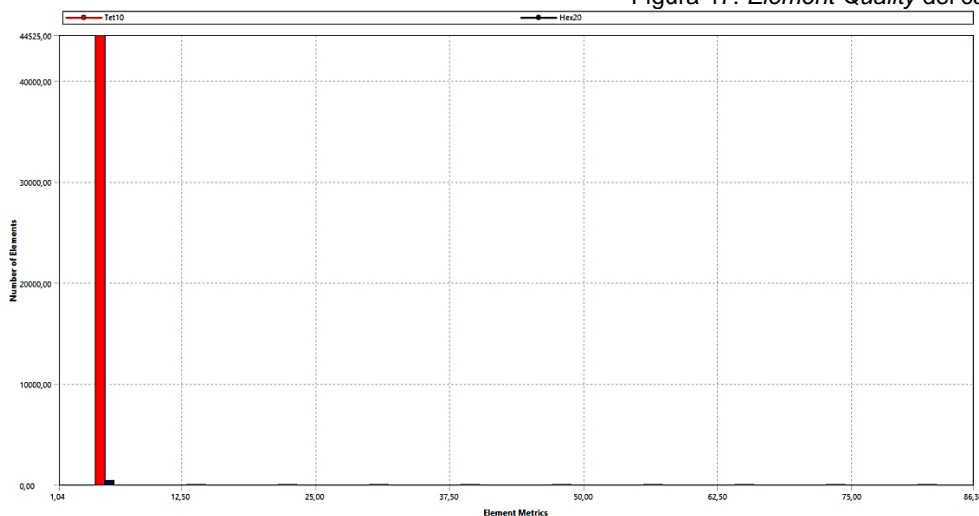


Figura 48: *Aspect Ratio* del campanar previ

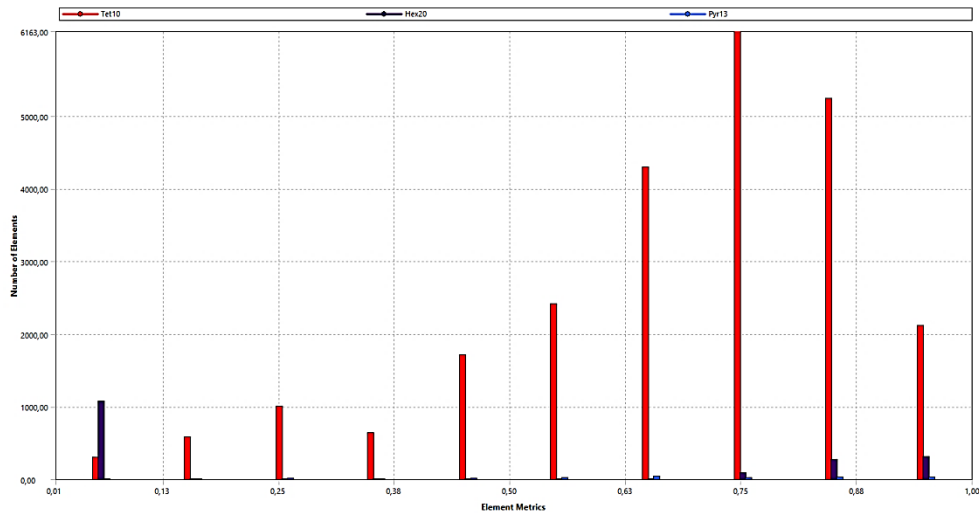


Figura 49: *Element Quality* del campanar tesat

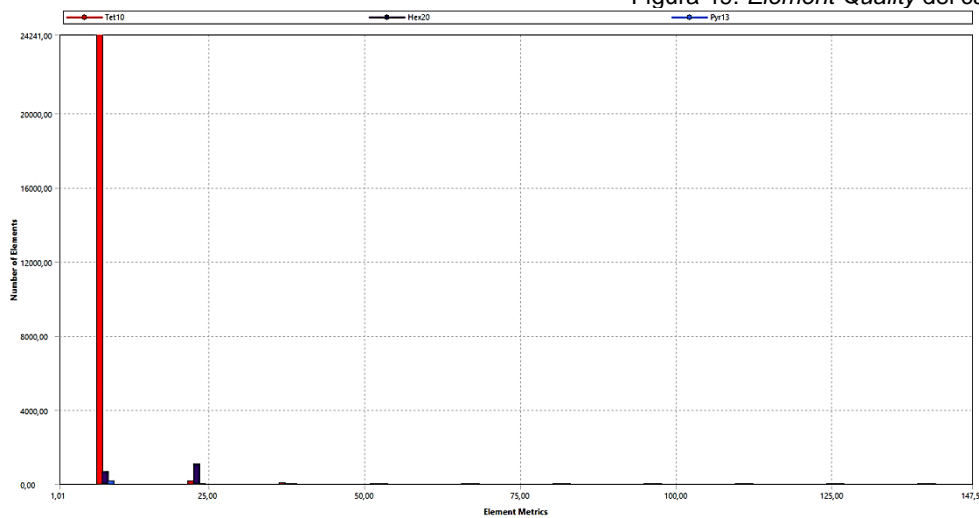


Figura 50: *Aspect Ratio* del campanar tesat

8.6 Aplicació de les forces al model

Com a últim pas abans de poder analitzar els models, cal encara determinar la temperatura de referència de l'anàlisi, el nombre de fases del càlcul, la tipologia dels suports del campanar, i aplicar les forces corresponents a cada una de les hipòtesis a calcular.

8.6.1 Característiques de l'anàlisi

Per canviar la temperatura de referència, clicant damunt *Static Structural*, apareix un valor modificable, *Environment Temperature*, que ha de ser 0.

El nombre de fases té a veure amb l'ordre en què s'apliquen les forces al model. Per exemple, en el cas tesat, convindrà que el campanar ja hagi rebut completament l'esforç que li provoquen les barres postresades abans d'aplicar les pressions i succions del vent. Així, doncs, les anàlisis on no intervingui el vent tindran una sola fase i on intervingui, dos.

Això es pot modificar a *Analysis Settings*, al modificable *Number of Steps* (figura 51).

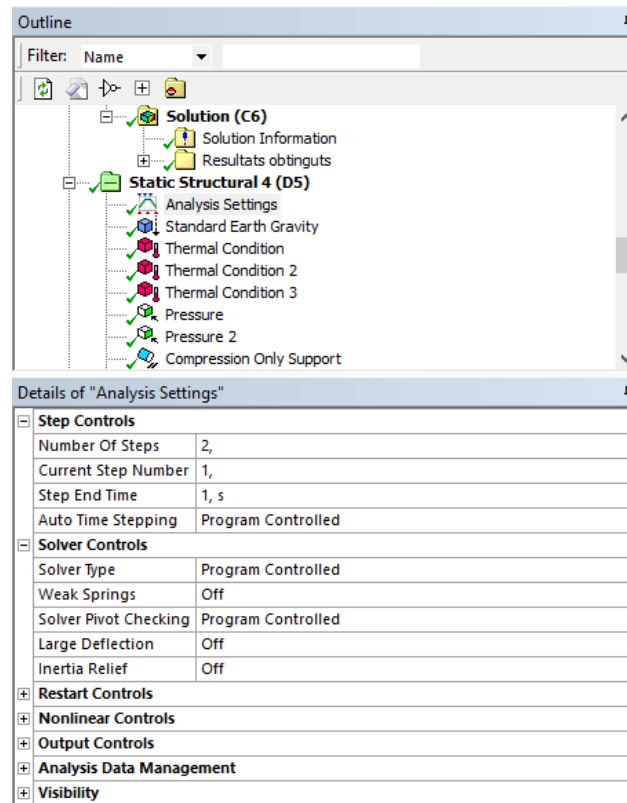


Figura 51: Propietats de l'anàlisi en dos fases

8.6.2 Suports

Abans de definir els suports al programa, és important reflexionar com han de ser aquests suports. En elements de fàbrica, bàsicament el suport es considera que només aguanta compressions, però també té una certa resistència enfront als esforços rasants a partir del fregament entre les peces. Malauradament, aquesta resistència als esforços horitzontals és complicada de definir, perquè el programa no preveu un suport friccional i aquest s'haurà de substituir per un suport equivalent.

El criteri que se seguirà per simular-ho serà encastar aquells nodes o vèrtexs que actuarien com a pivot en cas de bolcada, ja que aquestes seran les zones amb menys deformació. És evident que aquests poden variar en funció de les càrregues a aplicar. Com a contrapartida, però, s'hi generaran concentracions de tensió en aquests punts, per la qual cosa caldrà tenir-ho present quan s'analitzin els resultats obtinguts.

Quant als suports del sistema de tesat, es pot considerar que està encastat, per la manera en què està col·locat al campanar i tenint en consideració el que s'apunta en l'apartat 7.2.2 d'aquest treball.

Per començar, es generen els suports de les parts ceràmiques. Clicant amb el botó dret del ratolí sobre *Static Structural* i al desplegable *Insert*, se selecciona *Compression Only Support*.

S'escullen totes les cares inferiors de les costelles ceràmiques i s'assignen a aquest suport (figura 52).

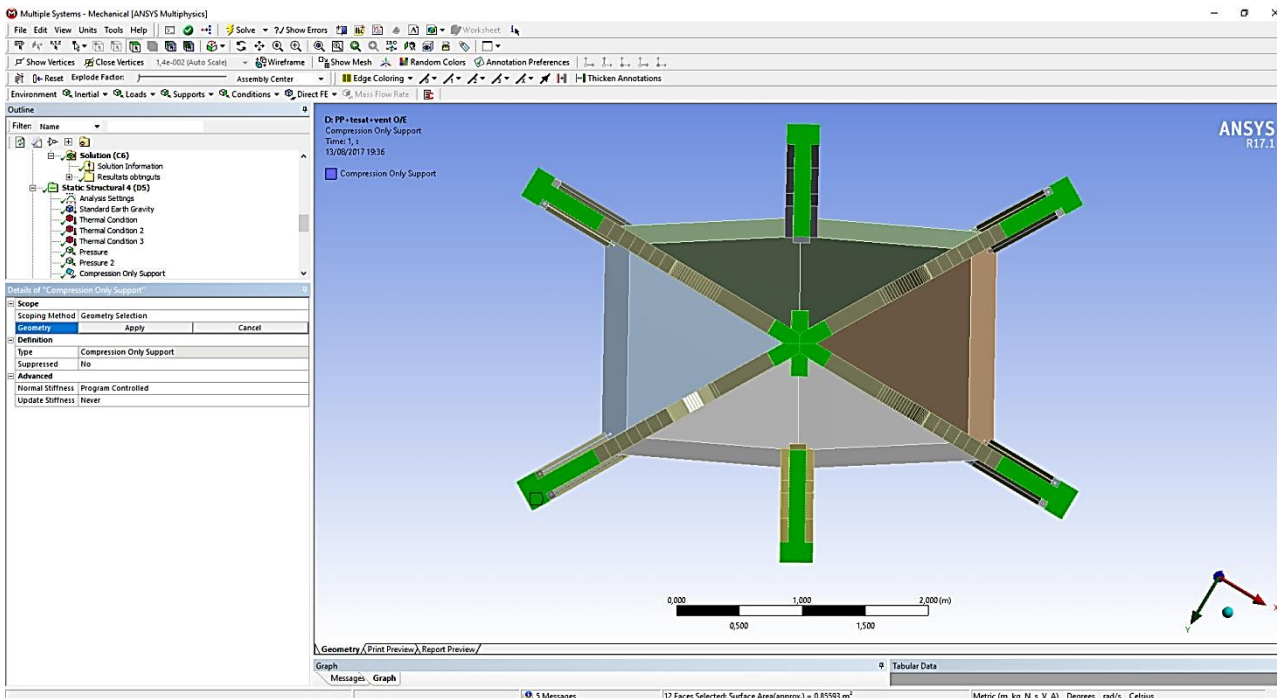


Figura 52: Assignació de geometria a *Compression Only Support*

Fent el mateix procediment, però seleccionant ara *Fixed Support*, es marquen els pivots de bolcada a la base del campanar. A les següents figures es mostren els diferents grups de nodes i vèrtexs encastats, en funció de l'estat de càrregues a aplicar:

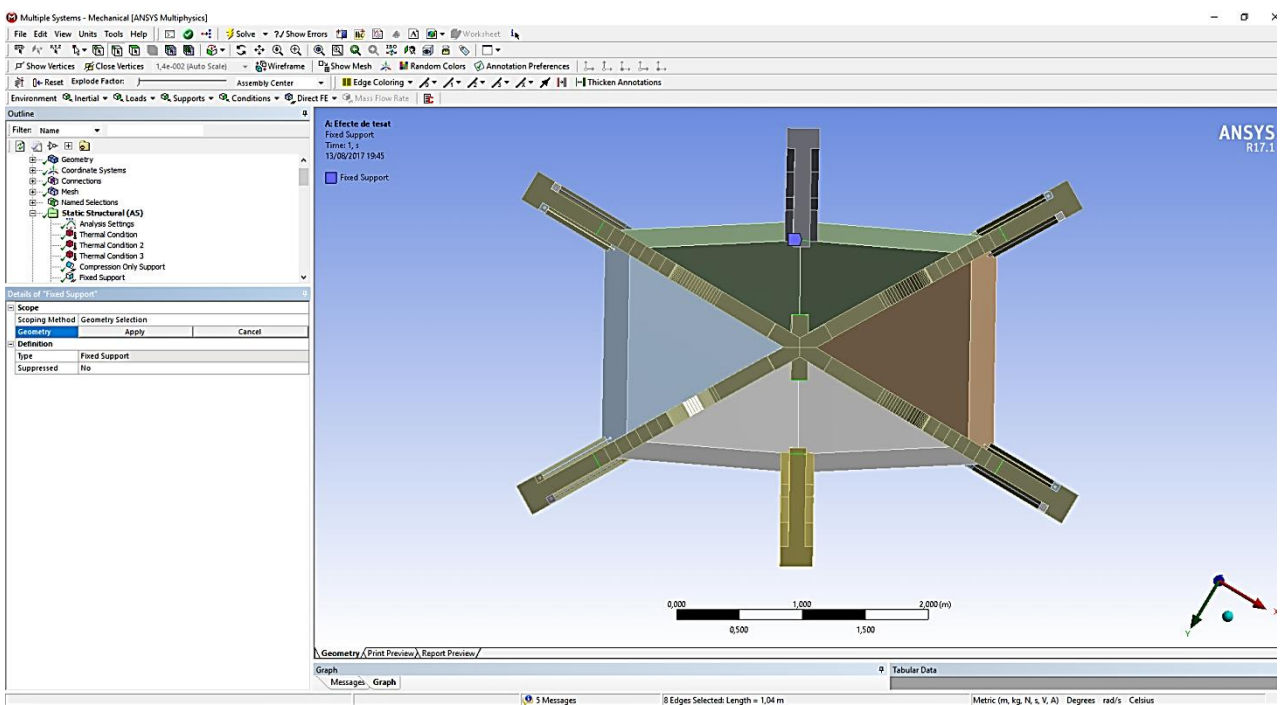


Figura 53: Assignació de geometria a *Fixed Support* a sòlids ceràmics per a l'anàlisi a pes propi i a pes propi+tesat

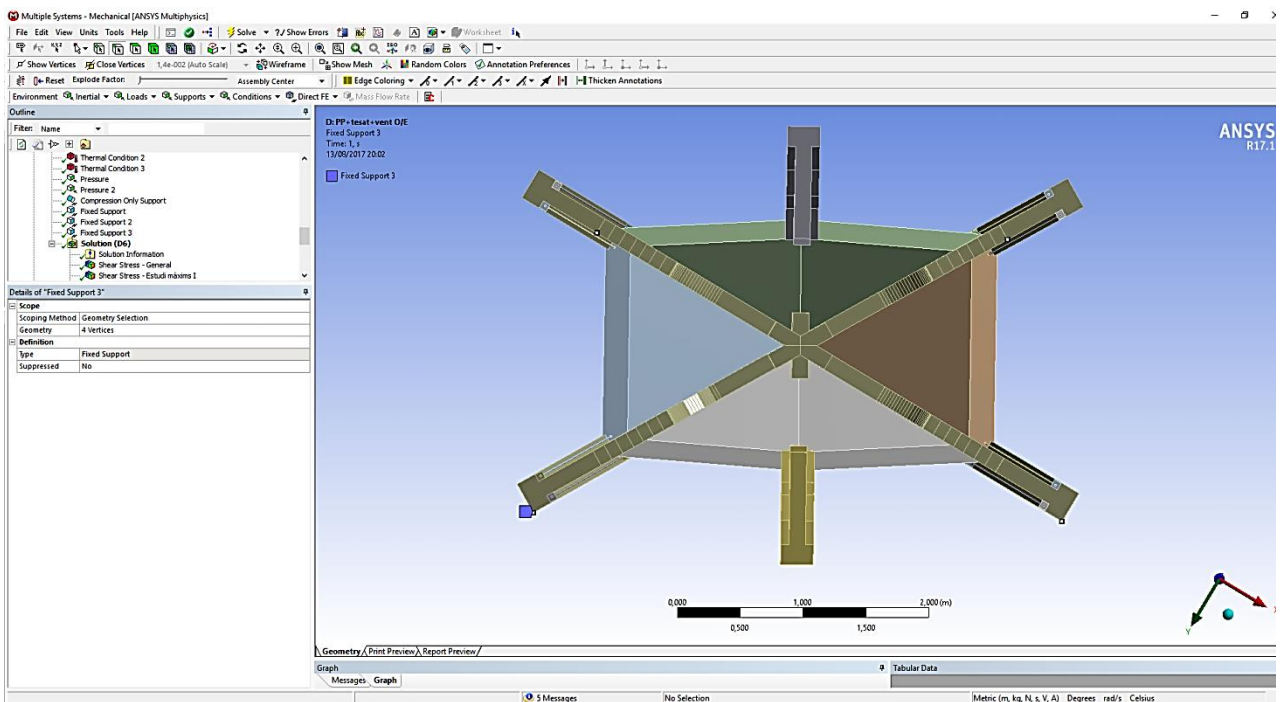
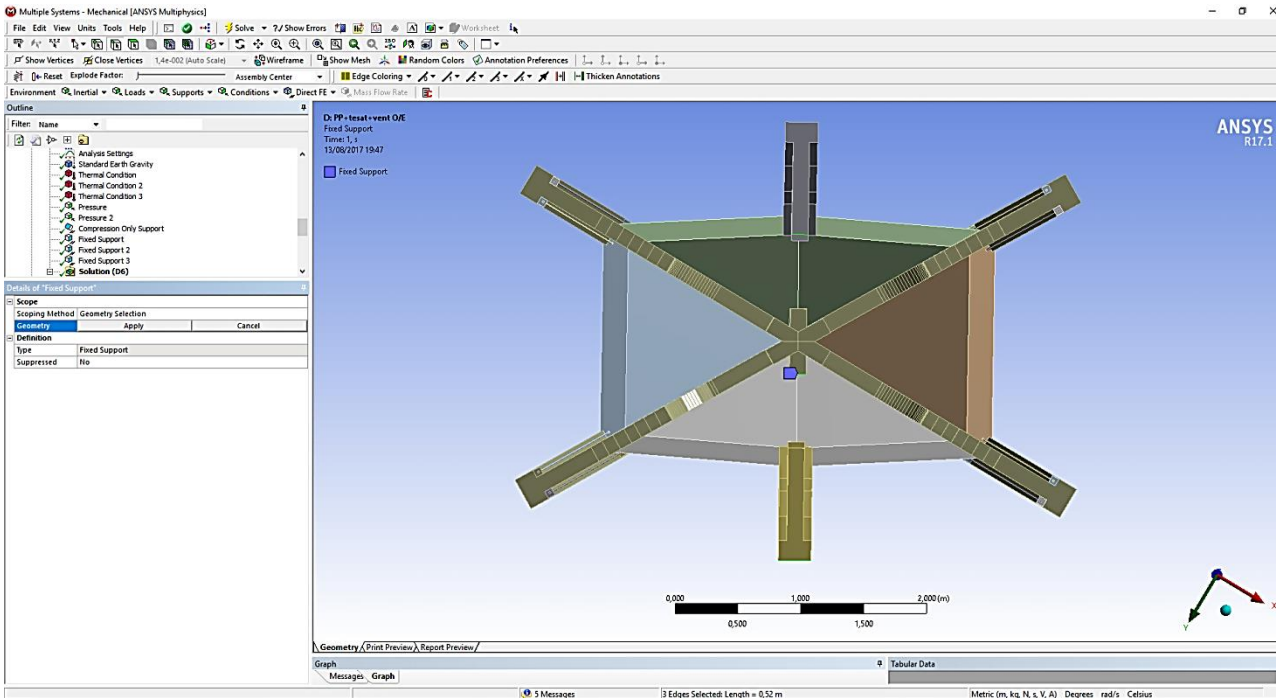


Figura 54: Assignació de geometria a *Fixed Support* a sòlids ceràmics per a l'anàlisi a PP+vent O/E i PP+Tesat+vent O/E

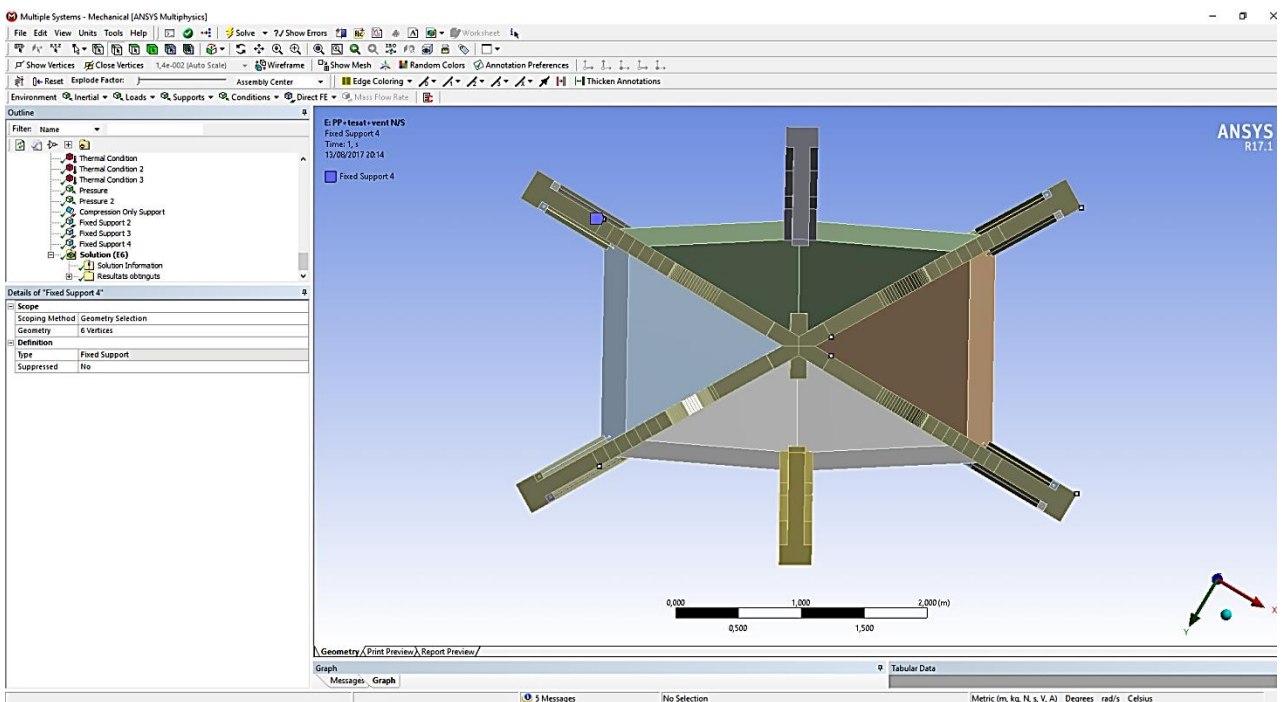
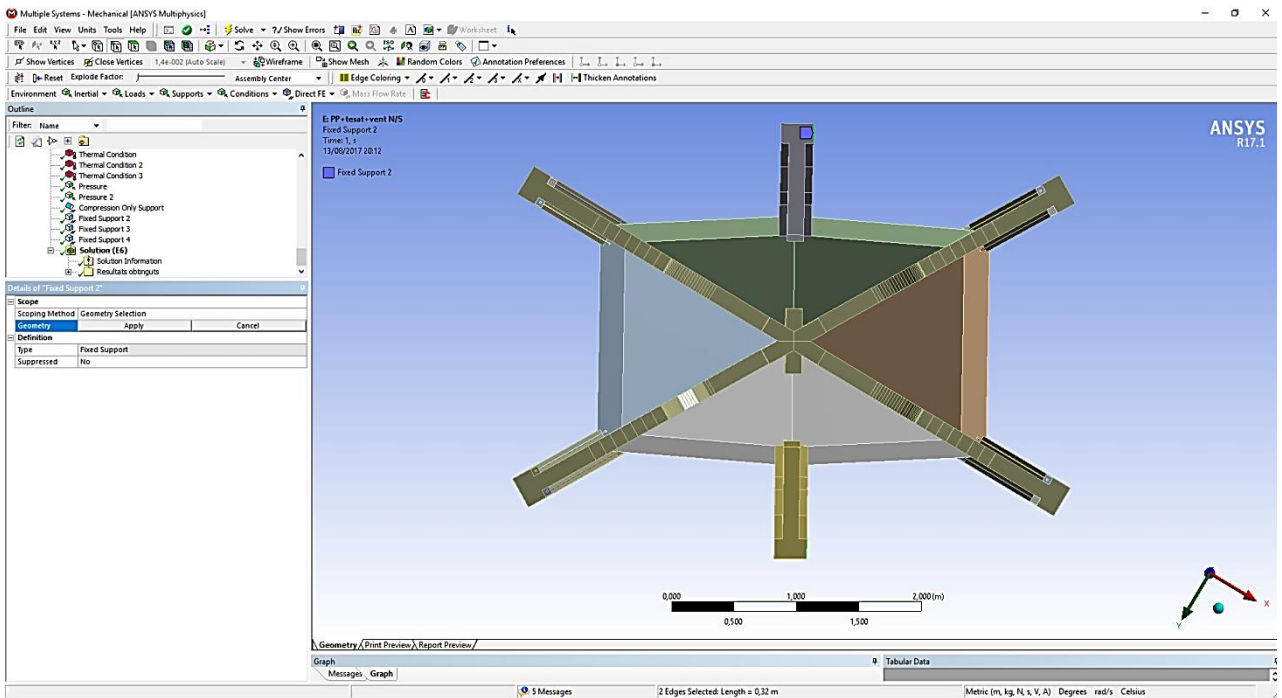


Figura 55: Assignació de geometria a *Fixed Support* a sòlids ceràmics per a l'anàlisi a PP+vent N/S i PP+Tesat+vent N/S

De la mateixa manera, s'assigna un *Fixed Support* a la cara de la base dels tirants i a la platina d'aquest mateix nivell.

Aquest és l'últim dels paràmetres referents directament al model o a les seves condicions de contorn. Els models estan a punt per ser calculats un cop se'ls afegeixi les accions pertinents.

8.6.3 Gravetat

La gravetat és una acció pròpia del programa. Per afegir-la cal dirigir-se a *Static Structural/Insert* i triar *Standard Earth Gravity*. Llavors apareix un vector que ensenya la direcció i el sentit d'aplicació (per defecte sobre l'eix Z en sentit negatiu).

8.6.4 Tesat

L'efecte de tesat s'ha decidit simular-lo aplicant un decrement de temperatura equivalent, tal com s'explica i calcula a l'apartat 7.2.3.2 d'aquest treball. A *Static Structural/Insert* es pot afegir una condició tèrmica, *Thermal Condition*. A continuació s'explica el procés per aplicar aquest esforç a un nivell de tirants:

Al menú de propietats, primer es selecciona la geometria. Per treballar amb més comoditat i rapidesa, es poden ocultar els elements de fàbrica (figura 56).

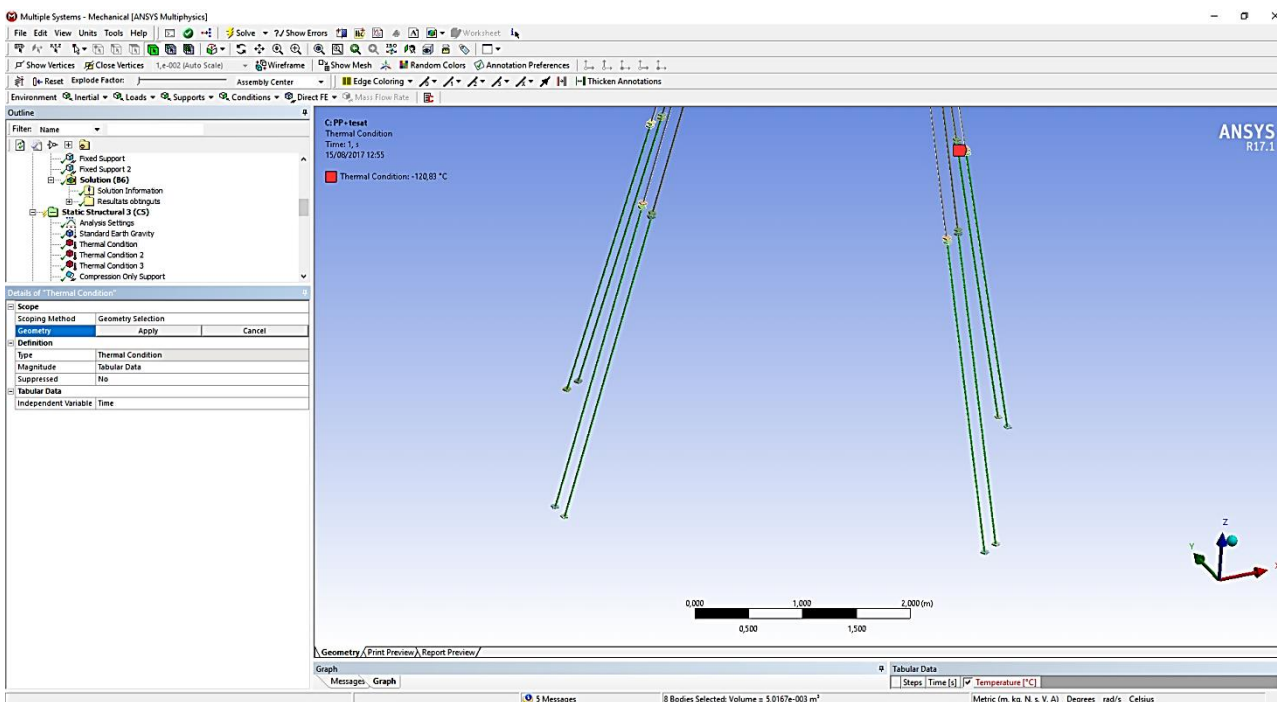


Figura 56: Selecció de geometria

Un cop escollida la geometria, cal establir quina condició tèrmica li pertoca. Això es pot fer de diverses maneres, en funció del nombre de fases que tingui l'anàlisi en qüestió. En cas de l'anàlisi a Pes Propi+Tesat, on totes les accions s'apliquen al mateix moment, s'escull *Ramped* (progressiu) i s'hi escriu el valor desitjat. Per a la resta d'anàlisis, en canvi, caldrà aplicar els valors des d'una *Tabular Data*, on es pot decidir el moment en què aquest esforç comença a actuar, i descriure la manera en què es va aplicant a través de les fases de l'anàlisi. Això es pot triar a l'apartat *Magnitude*.

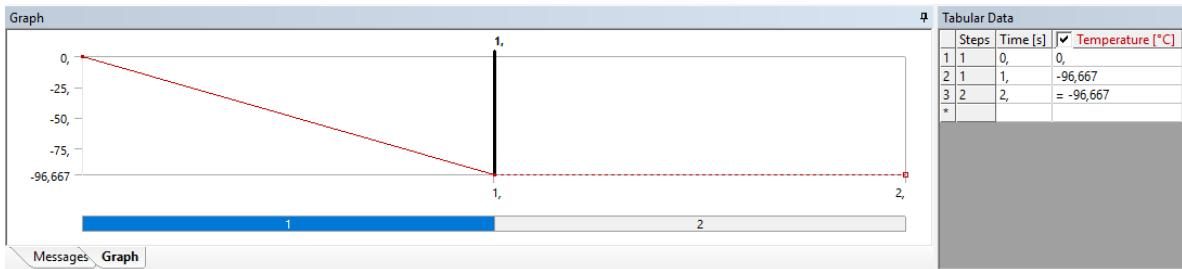


Figura 57: Aplicació per *Tabular Data*. A la taula es modifiquen els valors i al gràfic es mostra el seu comportament

8.6.5 Vent

El vent pot introduir-se per diversos mètodes amb l'ANSYS Workbench. A grans trets, pot aplicar-se de manera estàtica, tal com marca el *Codi Tècnic de l'Edificació*, o dinàmica a partir de fer passar el model per un túnel de vent. L'anàlisi estàtic pot servir per justificar el compliment de la normativa pel mètode simplificat, mentre que el dinàmic descriu millor el pas del fluid al voltant del cos i dona resultats més realistes.

L'aplicació de cada un d'aquests mètodes també és diametralment diferent, ja que el mètode estàtic es basa a aplicar una pressió i una succió en la direcció que es vol estudiar i, per tant, pot tractar-se dins de la mateixa anàlisi *Static Structural*. Per altra banda, per elaborar una anàlisi del pas de l'aire s'ha de crear una anàlisi *CFD* i traslladar els esforços resultants al model com a pressions. Per a aquest treball, s'ha dut a terme l'anàlisi estàtica, prenent com a valors de pressió i succió els que es detallen al punt 7.3.3.3.

Per aplicar les accions cal seguir els mateixos passos que per al testat, seleccionant *Pressure* al desplegable *Static Structural/Insert*, però ara serà necessari canviar el sistema de referència utilitzat per al que s'ha creat anteriorment a l'apartat 8.3, per estalviar-se de descompondre les pressions a *Tabular Data*.

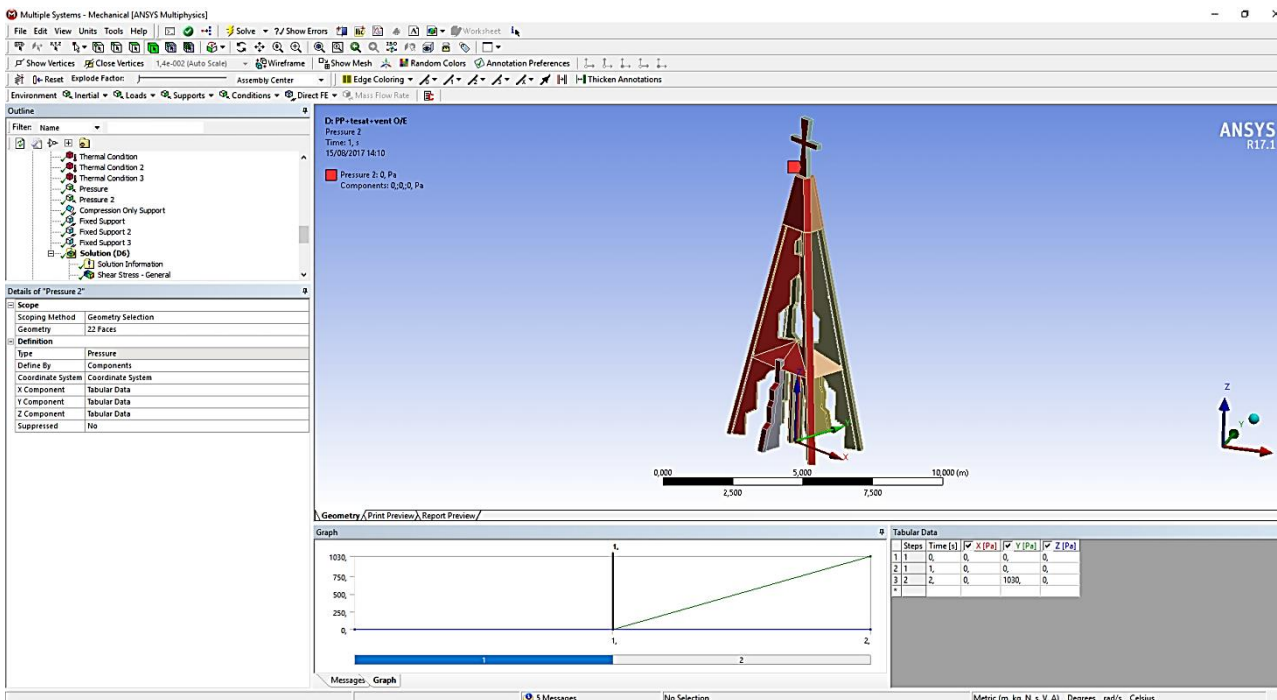


Figura 58: Exemple d'aplicació de la pressió produïda pel vent al campanar, mitjançant *Tabular Data*

9. Anàlisi dels resultats obtinguts

Les anàlisis que s'han dut a terme per caracteritzar el comportament dels models i ser comparades són les que es detallen a la següent taula:

Campanar previ	Campanar tesat
Pes propi	Pes propi + tesat
Pes propi + vent O/E	Pes propi + tesat + vent O/E
Pes propi + vent N/S	Pes propi + tesat + vent N/S

Un cop calculades les anàlisis, es recullen els resultats del treball i se'n fa una confrontació per determinar en quin grau es va millorar el comportament del campanar enfront l'acció del vent. Bàsicament, s'han extret resultats sobre deformació total i en cada un dels tres eixos (X,Y,Z), dels esforços màxims de compressió, dels esforços màxims de tracció i de la determinació del coeficient de seguretat, segons la teoria dels cercles de Mohr i que estan recollits a l'annex 1 d'aquest treball.

A menys que s'indiqui el contrari, les escales de color aniran de blau (valor mínim) a vermell (valor màxim).

9.1 Principi teòric: els cercles de Mohr

Els cercles de Mohr és un mètode gràfic per representar l'estat tensional que pateix un punt d'un sòlid en un moment determinat, encara que també es pot calcular per mitjà de programes de càlcul com ara l'ANSYS.

En una peça on s'aplica una força, els esforços es distribueixen com una funció dins del continu del material. Cada un d'aquests elements infinitesimals que formen la peça, a què generalment es dona forma cúbica, pot experimentar esforços diferents al mateix temps: esforços normals (actuen de manera perpendicular a les cares de l'element) i esforços tallants (actuen en una direcció paral·lela a la cara de l'element). Els esforços normals tenen tendència a estrènyer el cos (compressió) o a estirar-lo (tracció) i els esforços tallants a deformar-lo de manera romboïdal. La representació d'aquest element cúbic amb les components de les dos tipologies d'esforç que hi actuen és el que es denomina com a tensor (figura 59).

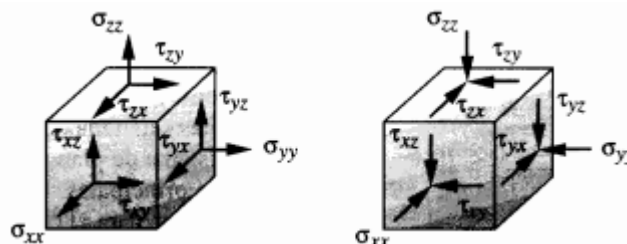


Figura 59: A l'esquerra, tensor amb components d'esforç positives. A la dreta, amb components d'esforç negatives

Per a qualsevol combinació particular d'esforços aplicats a qualsevol dels punts que s'analitzi hi haurà una distribució contínua del camp d'esforços on el valor d'aquests variarà en funció del sistema de coordenades de referència que s'esculli. Els esforços principals, doncs, seran els

esforços normals que actuen sobre les cares on el tallant és 0. Els plans d'aplicació, doncs, seran els plans principals.

Els cercles, consegüentment, permeten dibuixar els estadis límit d'un material, on es poden anar entrant els valors de cada tensor a analitzar i comprovar si l'estat tensional és acceptable o és crític.

9.2 Comparació dels models

La confrontació es fa a través dels resultats del model previ amb els del tesat, però aplicant també a aquest últim la mateixa escala de color que el previ. D'aquesta manera, queden nítidament definits quins canvis provoca el fet d'haver estat tesat en el seu comportament.

En general, els colors vermellosos signifiquen increment, mentre que els blavosos indiquen decrement.

9.2.1 Pes propi

L'efecte del pes propi en els dos models és pràcticament idèntic. S'obtenen petites variacions ja que el campanar tesat és lleugerament més pesant i, sobretot, perquè a la base hi ha més sòlids (corresponents al sistema de tesat) encastats que al previ.

La confrontació en aquest punt serveix per validar que els dos models treballen de manera igual i que, per tant, els resultats que s'han extret de les diferents anàlisis poden ser comparables per treure'n conclusions fermes.

9.2.2 Pes propi / pes propi + tesat

9.2.2.1 Compressió

Les compressions experimenten un canvi brusc un cop s'ha realitzat el tesat. Mentre que al campanar previ s'obtenen valors de tensió molt baixos, on quasi tots són inferiors a 0,14 MPa, el sistema de tesat produeix a les costelles una compressió de fins a 1,4 MPa.

L'esquema de tensions que presenta el campanar tesat és molt similar al del previ. Es pot observar com es produeixen concentracions de tensions a la base del coronament, en els punts on arriba el sistema de tirants.

En l'altra cara, s'observa una continuïtat i simetria del diagrama de tensions, fet lògic en tenir aplicades només forces en l'eix Z-.

En general, no se sobrepassen les tensions admissibles dels materials, tot i que en alguns punts es dona. Aquestes zones es concentren als suports dels tirants, en estar encastats a les costelles. Aquests valors anòmals poden deure's a un mallat poc fi o al fet que calgui un càlcul de fissuració per caracteritzar millor la zona.

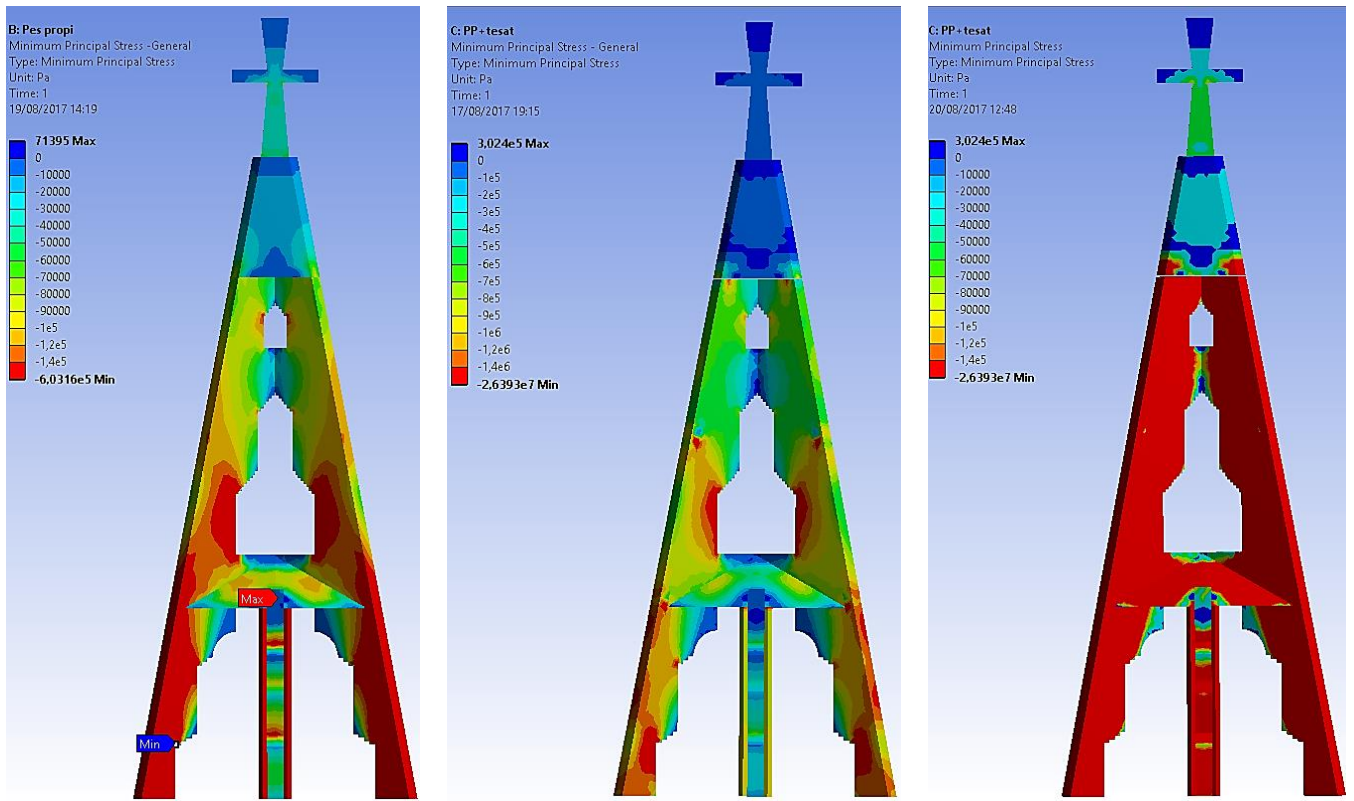


Figura 60: Diagrama de compressions a la cara A. En imatge, 1r.Campanar previ, 2n.Campanar tesat i 3r.Comparació

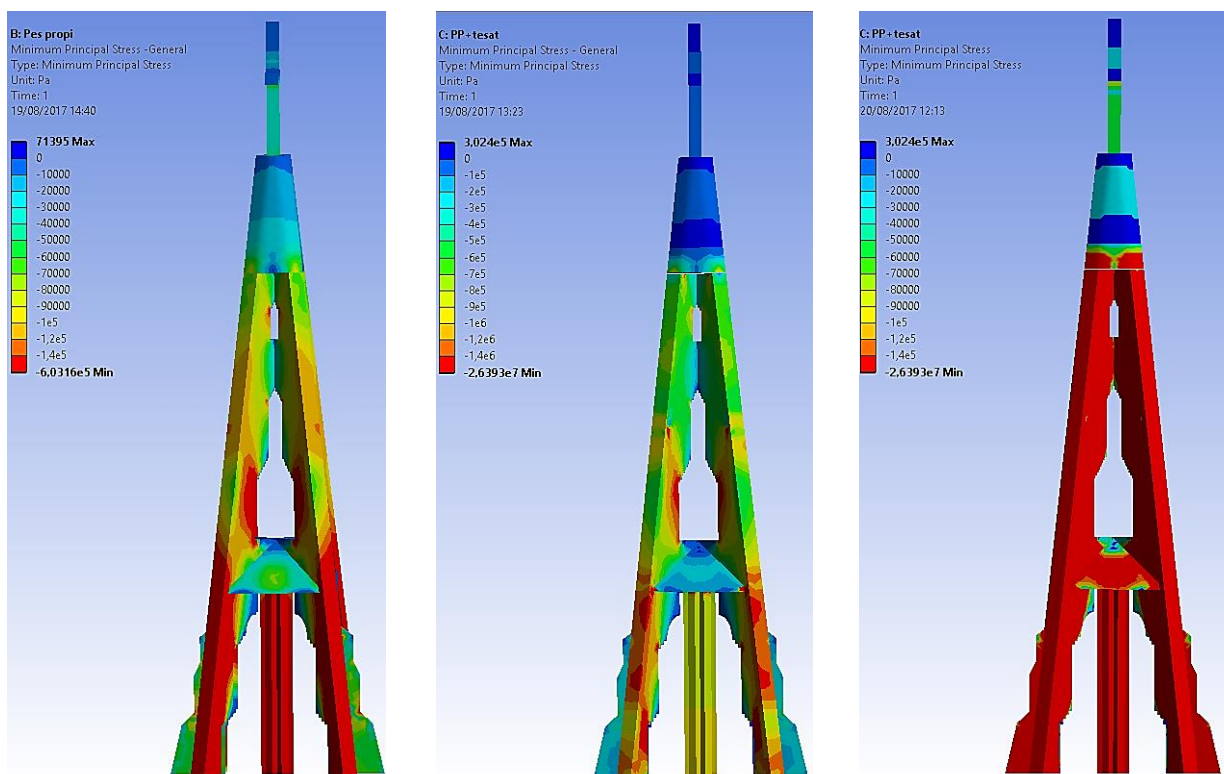


Fig.61: Diagrama de compressions a la cara B. En imatge, 1r.Campanar previ, 2n.Campanar tesat i 3r.Comparació

9.2.2.2 Tracció

L'efecte del tesat aplicat al campanar provoca que les traccions augmentin lleugerament, però sense arribar a valors compromesos, per sobre de $7 \cdot 10^5$ MPa. Cal entendre que part d'aquestes traccions són degudes a la pròpia compressió, pel coeficient de Poisson. A la zona del replà, com en el cas de les compressions, es produeixen concentracions de traccions. Ambdós models comparteixen el mateix esquema de diagrama.

En general, les traccions es distribueixen simètricament respecte de l'eix del campanar i es comprova que el tesat no crea noves zones de traccions, sinó que intensifica les que ja quedaven marcades al model previ. S'experimenten traccions també a la base del campanar, a causa dels contactes encastats, i dels suports dels tirants. El coronament i la creu no pateixen cap canvi.

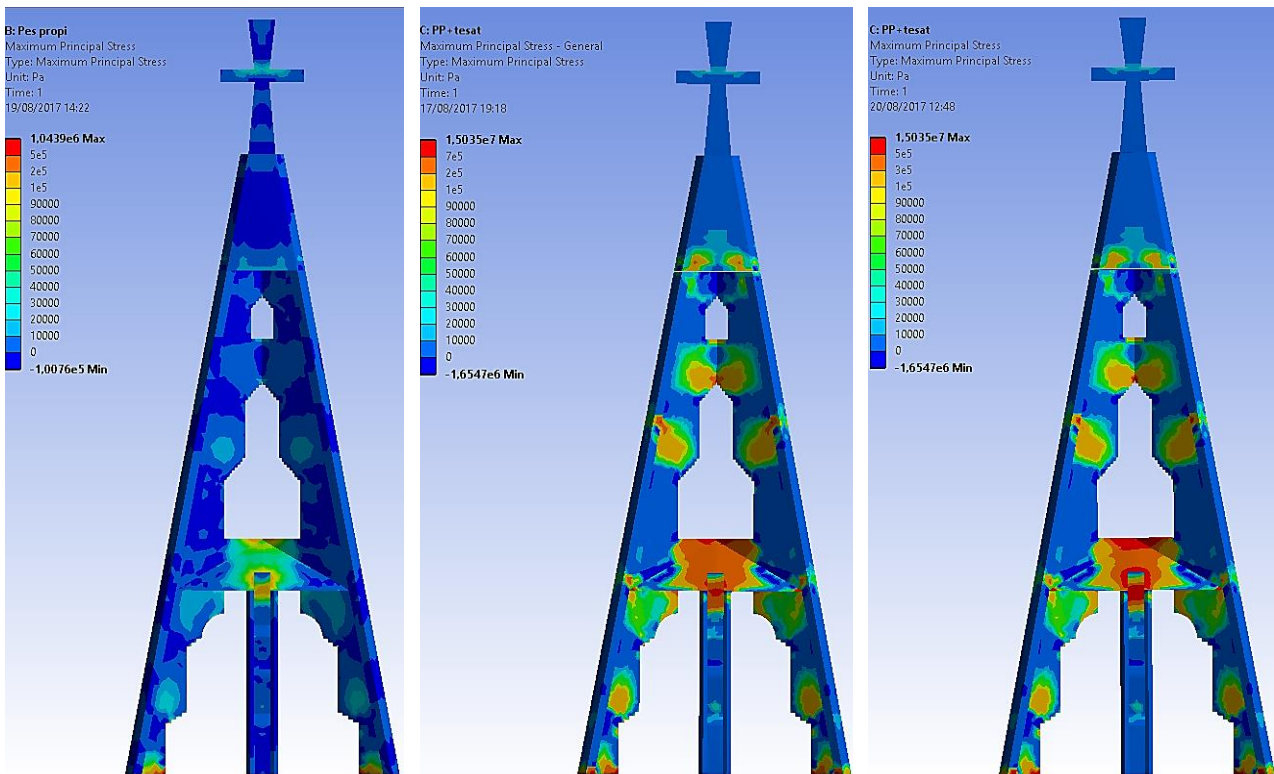


Figura 62: Diagrama de traccions a la cara A. En imatge, 1r.Campanar previ, 2n.Campanar tesat i 3r.Comparació

La cara B ensenya un altre punt on s'hi concentren les tensions: els vèrtexs del replà. Aquí és on es produeixen les traccions més grans de les anàlisis, però cal tenir en compte que pot deure's que la malla no és prou fina per caracteritzar amb detall aquesta zona. Tot i això, aquests pics de tracció es produeixen en zones molt localitzades i tenen poc abast, per la qual cosa no suposen perill per la estabilitat del campanar.

També permet acotar la part de la zona central del replà, on caldria aplicar-hi un reforç que dissipés aquestes traccions, o analitzar-ho a l'estadi no lineal de la fissuració.

Es torna a veure una simetria en els diagrames dels dos models.

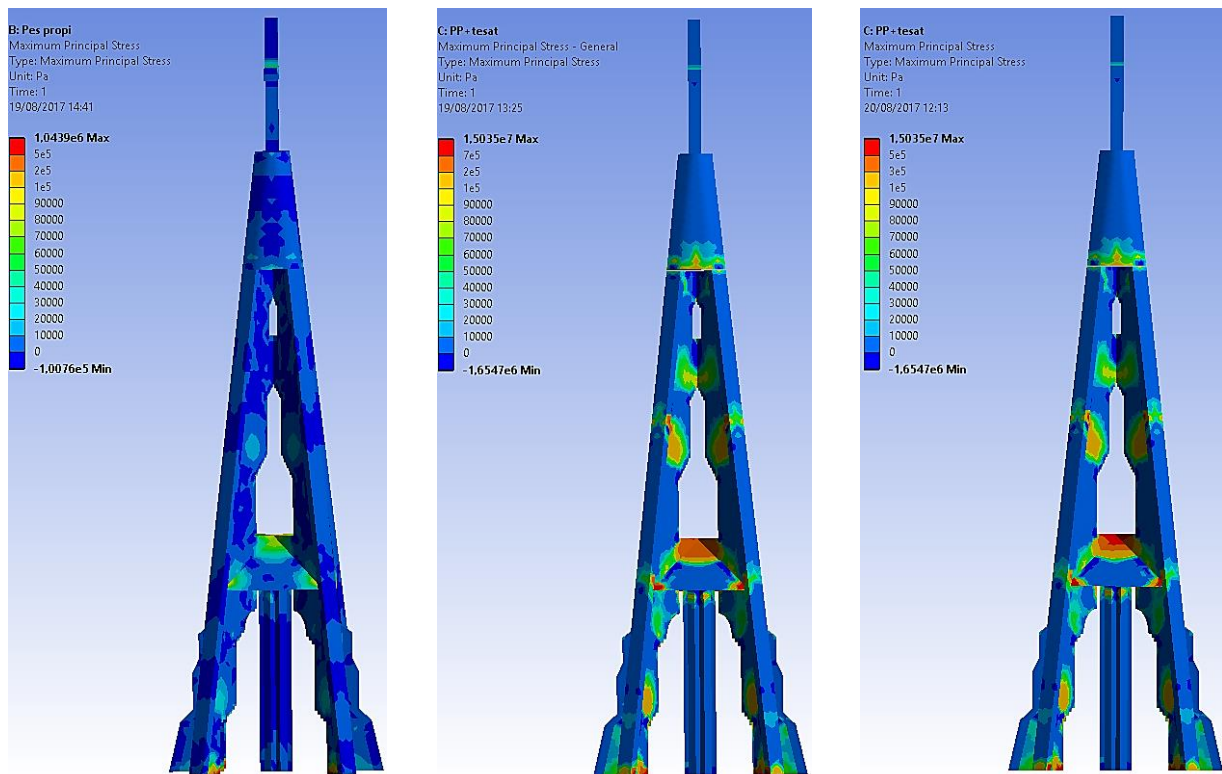


Figura 63: Diagrama de traccions a la cara B. En imatge, 1r.Campanar previ, 2n.Campanar tesat i 3r.Comparació

9.2.2.3 Deformació

El diagrama de deformació és el més explicatiu per veure l'efecte del tesat al campanar. A la comparació, es pot veure com quasi a la base ja s'arriba als valors de deformació màxims del model previ.

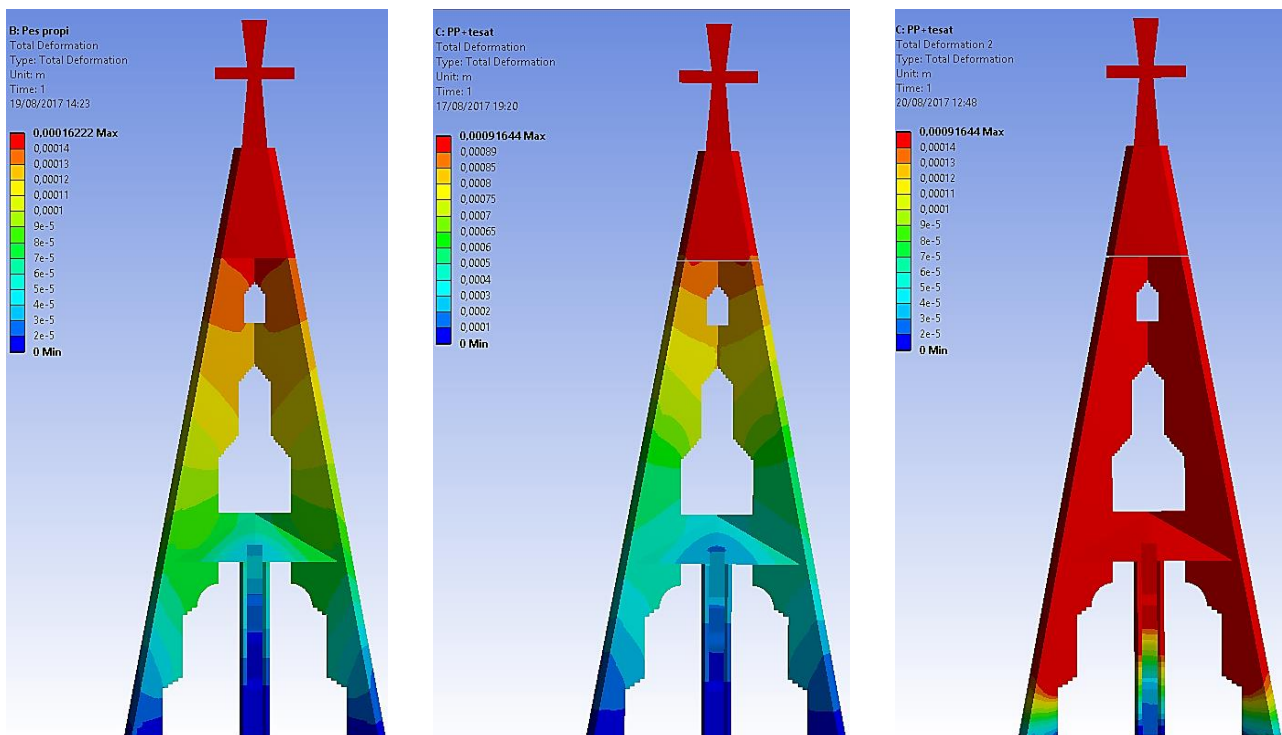


Fig. 64: Diagrama de deformacions totals a la cara A. En imatge, 1r.Campanar previ, 2n.Campanar tesat i 3r.Comparació

Les deformacions són bàsicament a l'eix Z-, produint-se'n algunes de poc notables en els altres eixos per l'esbombament de les costelles. Tot i això, les deformacions creades del tesat són de fins a 0,91 mm, en els punts superiors de la creu, pels 0,16 mm que es deforma el campanar a causa del seu propi pes.

Es distingeix perfectament que les deformacions són progressives i s'estrenyen a les zones dels suports, pels diferents nivells de tesat aplicats. Aquí també es fa evident que el replà és capaç de fer deformar les costelles secundàries fins a cert grau.

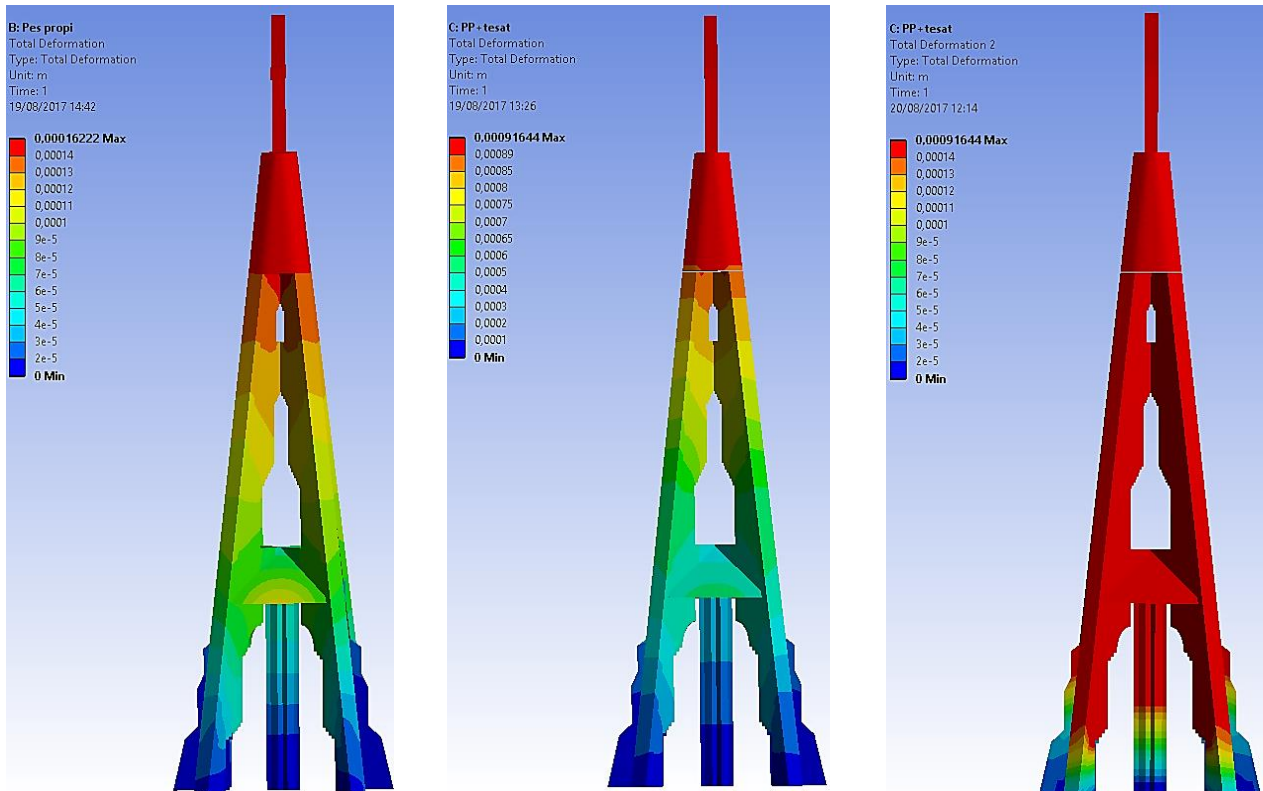


Fig.65: Diagrama de deformacions totals a la cara B. En imatge, 1r.Campanar previ,2n.Campanar tesat i 3r.Comparació

9.2.3 Pes propi + vent O/E / pes propi + tesat + vent O/E

9.2.3.1 Compressió

S'observa com, amb l'aplicació del vent, les cares A i C ja no són simètriques en el model previ, ja que es produeix un efecte de flexió, on la cara succionada queda més comprimida que la cara pressionada. Això es veu clarament als resultats de la cara B.

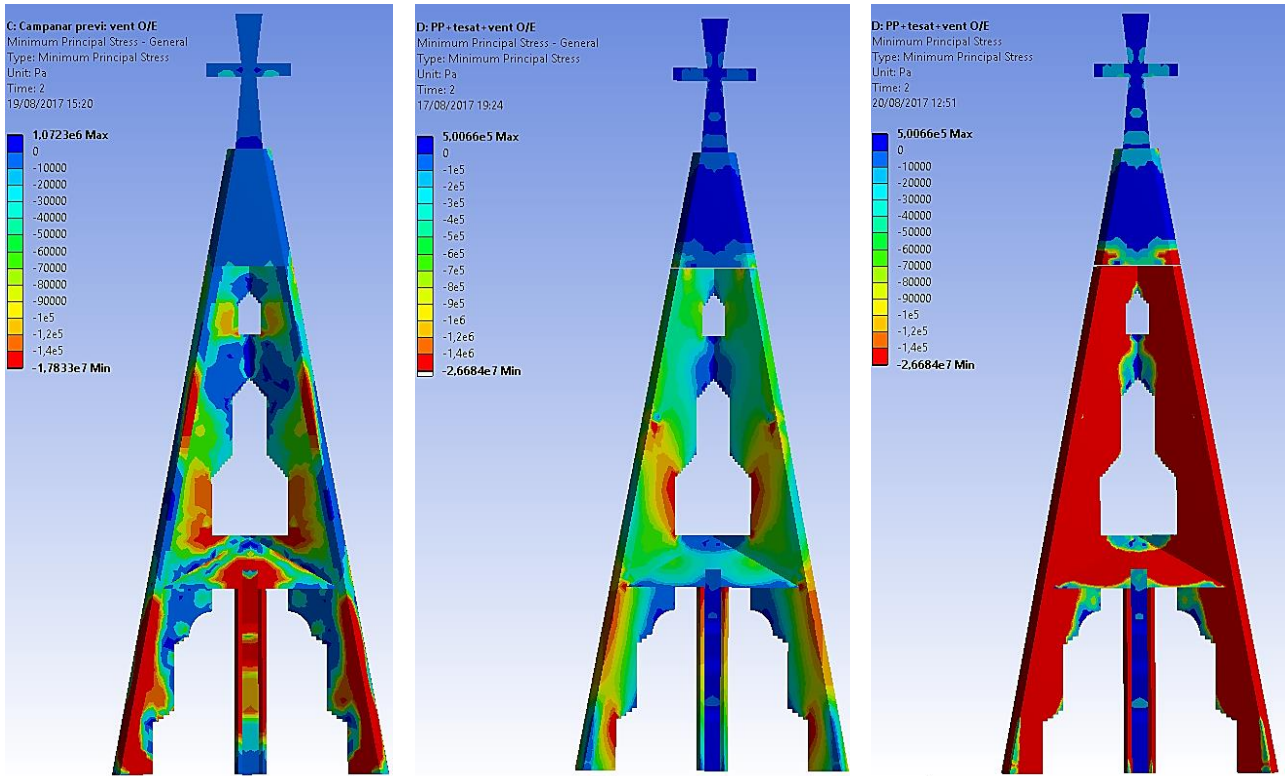


Figura 66: Diagrama de compressions a la cara A. En imatge, 1r.Campanar previ, 2n.Campanar tesat i 3r.Comparació

Per contra, en el model reforçat es manté la semblança entre els esquemes de la cara 1 i 3, mentre que l'efecte del vent és menys notori.

Un fet interessant és que, tal com s'observa, les costelles secundàries treballen a menys compressió al campanar tesat, fet que indica que es produeix poca flexió en aquests elements i, per contra, les costelles principals arriben a valors de 1,5 MPa (vegi's Annex 1).

En general, no se sobrepassen les tensions admissibles dels materials, tot i que en alguns punts es dona. Aquestes zones es concentren als suports dels tirants, en estar encastats a les costelles i a les cantonades del replà. Aquests valors anòmals poden deure's a un mallat poc fi o al fet que calgui un càlcul de fissuració per caracteritzar millor aquestes zones.

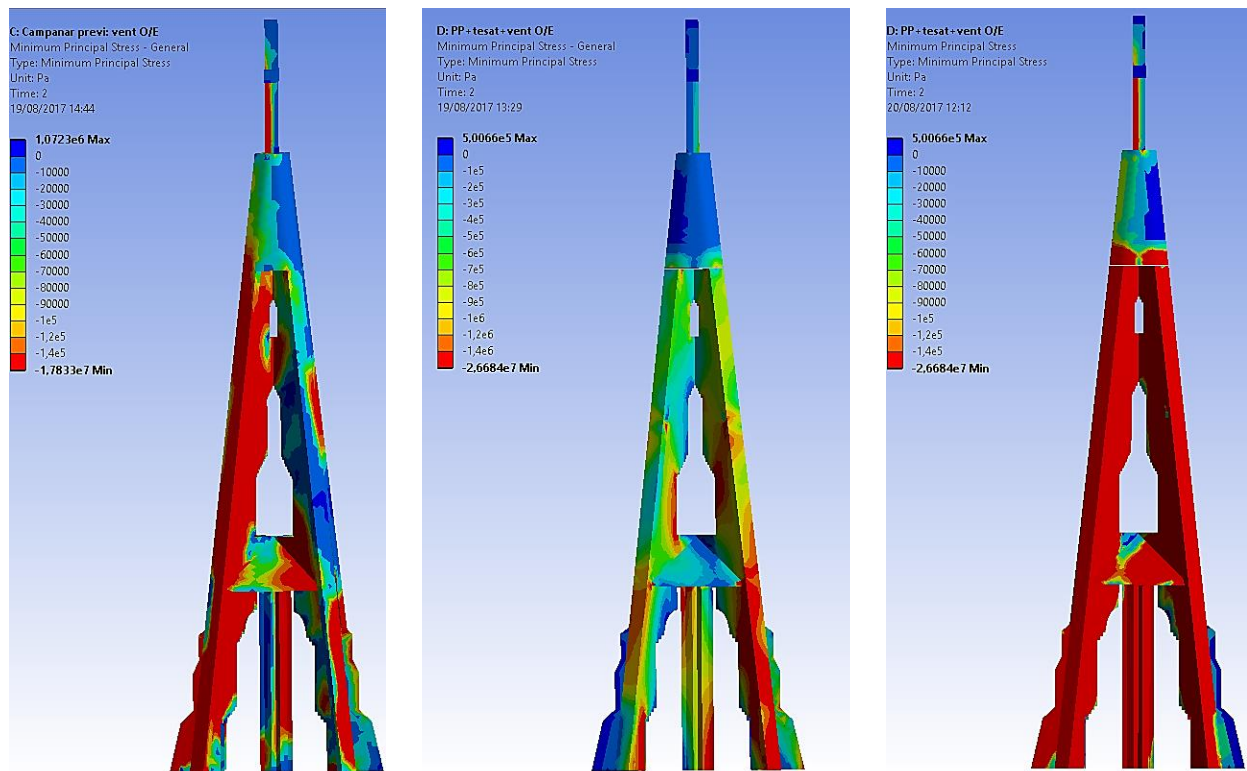


Fig. 67: Diagrama de compressions a la cara B. En imatge, 1r.Campanar previ, 2n.Campanar tesat i 3r.Comparació

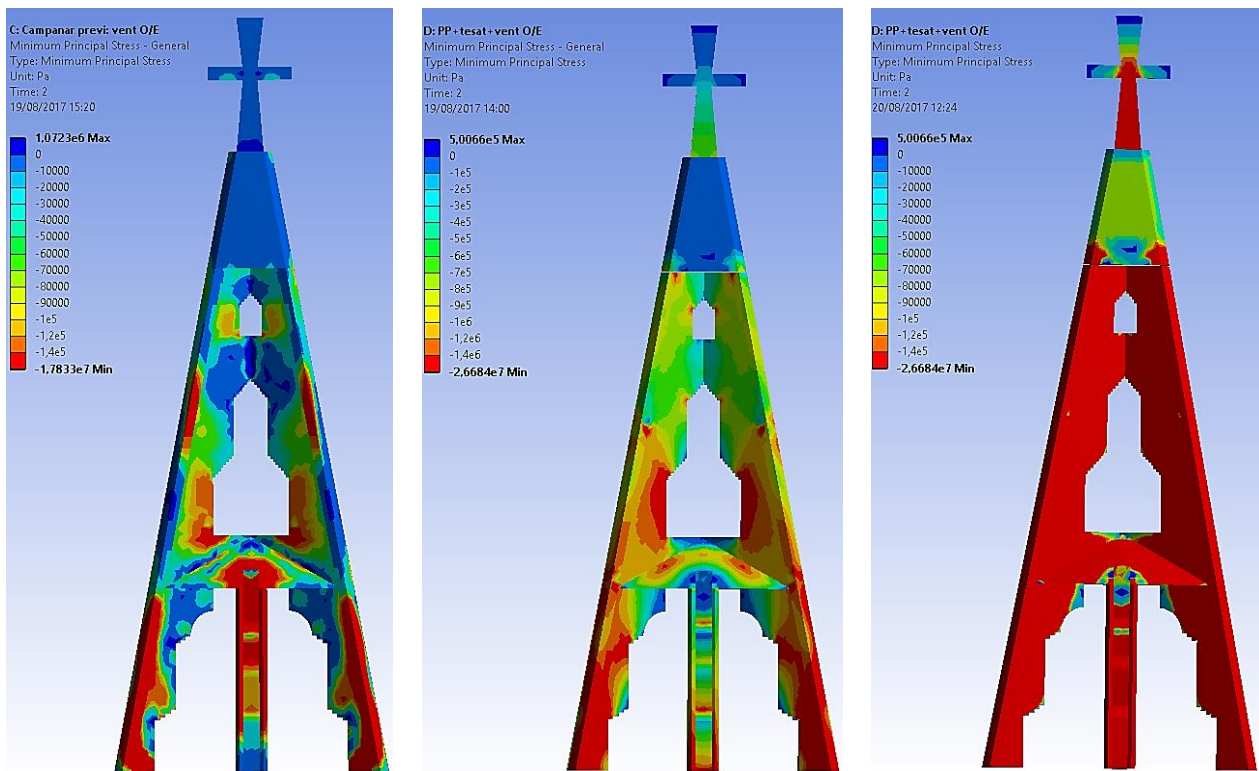


Fig.68: Diagrama de compressions a la cara C. En imatge, 1r.Campanar previ, 2n.Campanar tesat i 3r.Comparació

9.2.3.2 Tracció

El vent aplicat al campanar provoca que les distribucions de les traccions canviïn completament entre els dos models. Al campanar previ, les cares A i C pateixen canvis bruscos: mentre que a la cara A les traccions augmenten de manera generalitzada, creant-se grans zones on la tracció és superior a $2 \cdot 10^5$ Pa, a la façana C pateixen un lleuger descens a causa de la flexió produïda en el campanar. Al campanar tesat també s'aprecia com la cara pressionada està més traccionada que la cara succionada, però aquí les costelles principals es mantenen amb traccions properes a 0. A més, l'esquema és pràcticament igual a ambdues cares.

Es comprova que el tesat no crea noves zones de traccions, sinó que intensifica les que ja quedaven marcades a l'anàlisi de pes propi + tesat. S'experimenten traccions també a la base del campanar, a causa dels contactes encastats, i dels suports dels tirants. El coronament i la creu no presenten variacions entre els models.

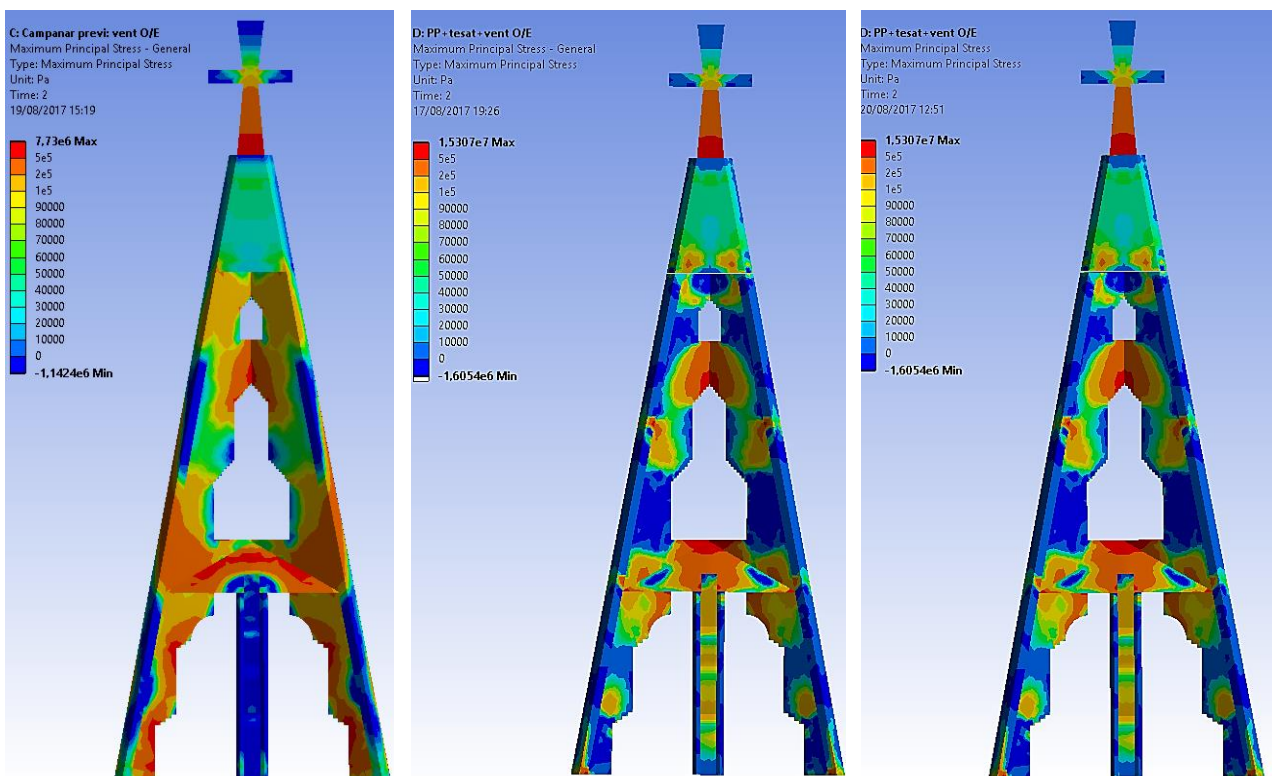


Figura 69: Diagrama de traccions a la cara A. En imatge, 1r.Campanar previ, 2n.Campanar tesat i 3r.Comparació

La cara B mostra amb nitidesa el diferent comportament de les costelles principals, en el cas del model previ, però també mostra com en el model tesat les traccions són molt properes a 0.

La base concentra traccions a l'entorn del pivot encastat que hi ha configurat, fet que fa que els resultats en aquest punt no puguin ser realistes. Aquest efecte no és tan acusat en el cas del campanar tesat, ja que els suports dels tirants en aquest nivell també estan encastats i ajuden a relaxar les traccions que es donen al pivot.

Caldria utilitzar algun sistema de reforç per ajudar a dissipar les traccions de les costelles al nivell del replà o analitzar aquestes zones tenint en compte la fissuració de la fàbrica.

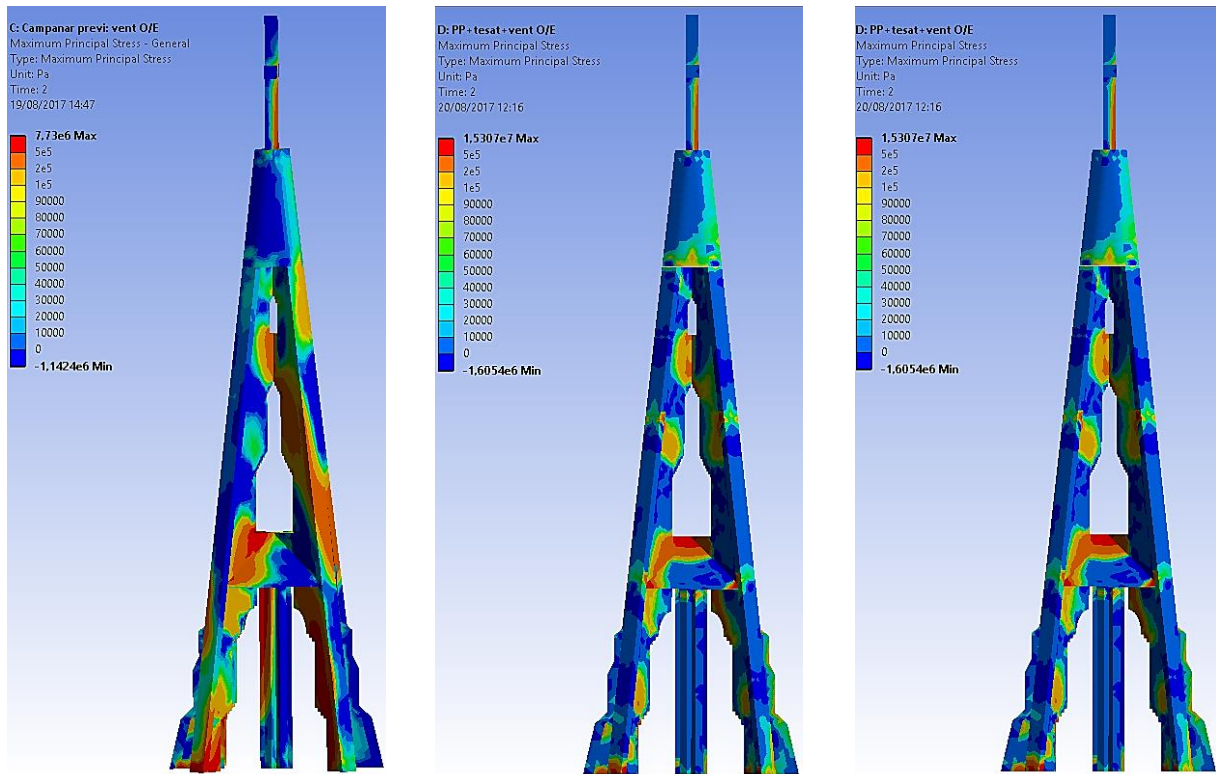


Fig.70: Diagrama de traccions a la cara B. En imatge, 1r.Campanar previ, 2n.Campanar tesat i 3r.Comparació

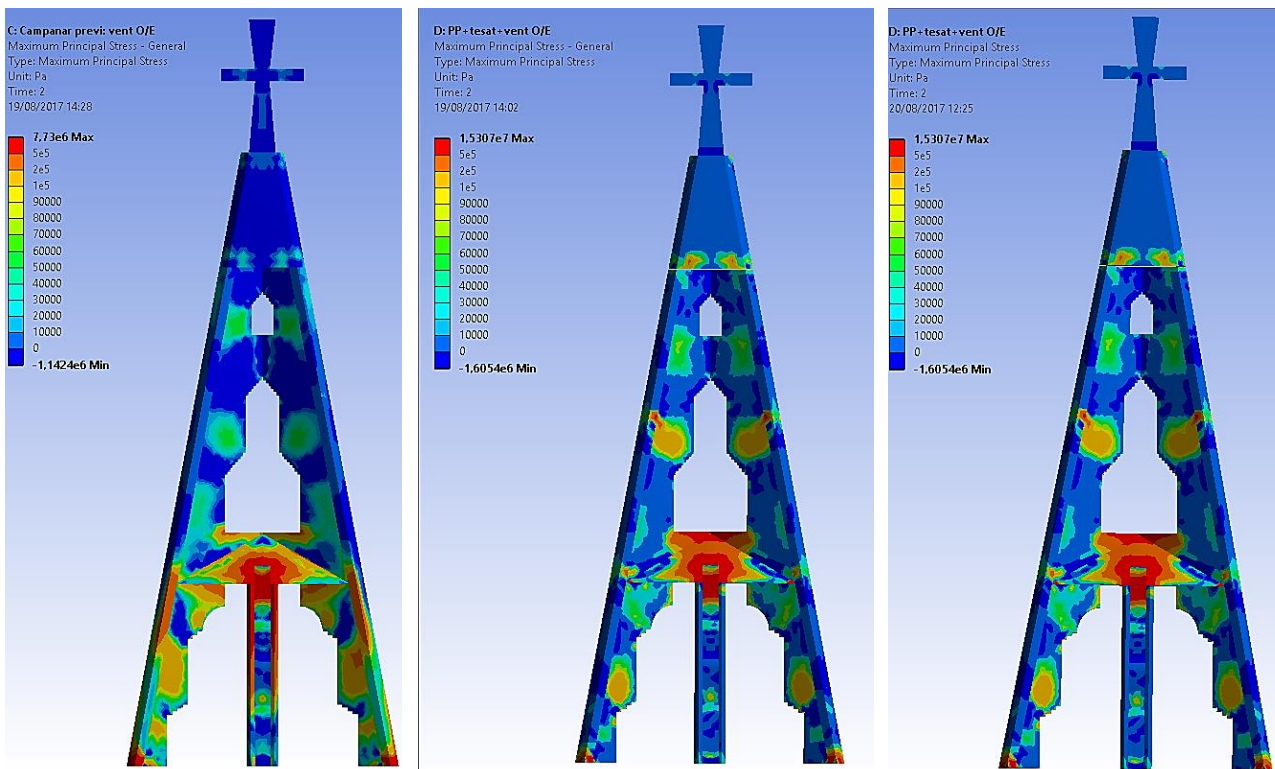


Fig.71: Diagrama de traccions a la cara C. En imatge, 1r.Campanar previ, 2n.Campanar tesat i 3r.Comparació

9.2.3.3 Deformació

La reducció de la deformació és notable en aquesta anàlisi, ja que la deformació passa de 7,2 mm a 3,8 mm a la cara superior de la creu, una millora de quasi el 50% gràcies al tesat. Al diagrama de comparació es pot veure que la base del campanar tesat presenta la mateixa deformació que la zona del replà del campanar previ.

Un altre resultat que s'obté és la deformació creada a la base: mentre que el campanar tesat pateix molt poca deformació, es pot apreciar com al campanar previ comença a haver-hi deformacions a l'eix Z+ (vegi's Annex 1). Aquest fet pot ocasionar un procés de bolcada del campanar.

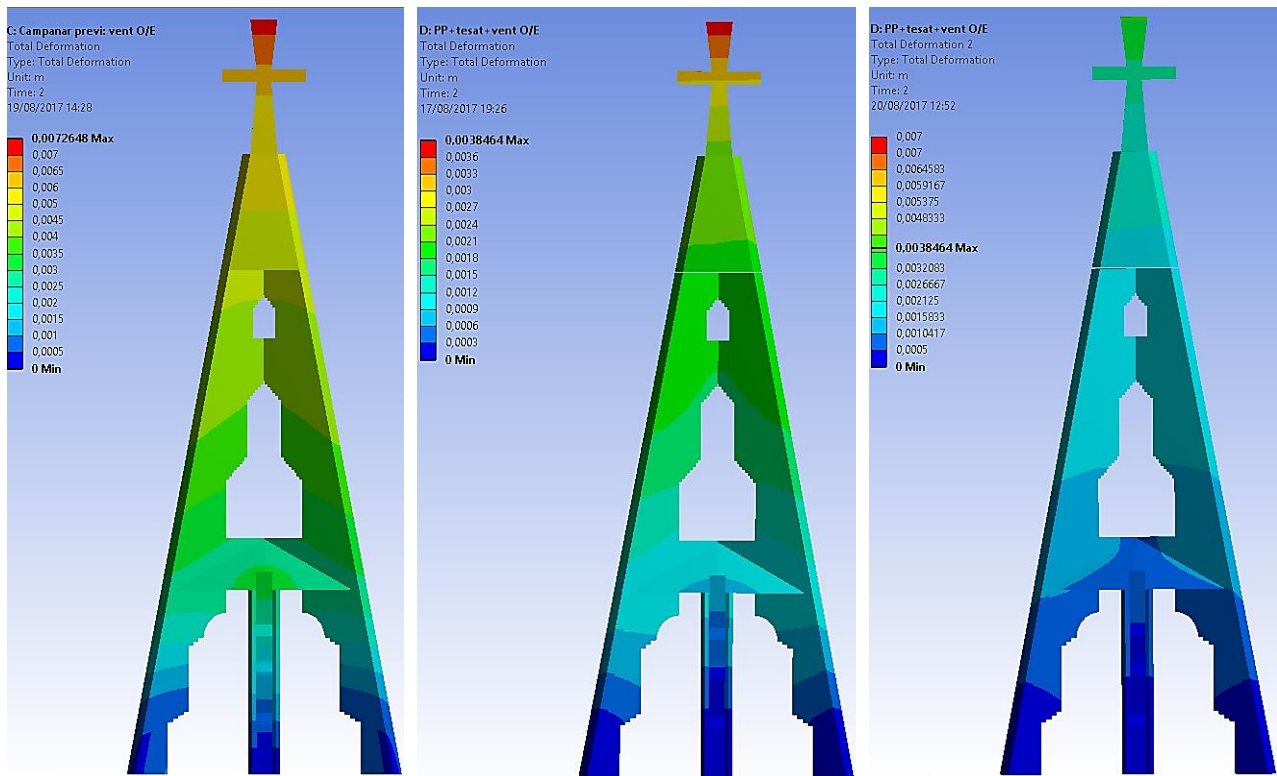


Fig.72: Diagrama de deformacions totals a la cara A. En imatge, 1r.Campanar previ, 2n.Campanar tesat i 3r.Comparació

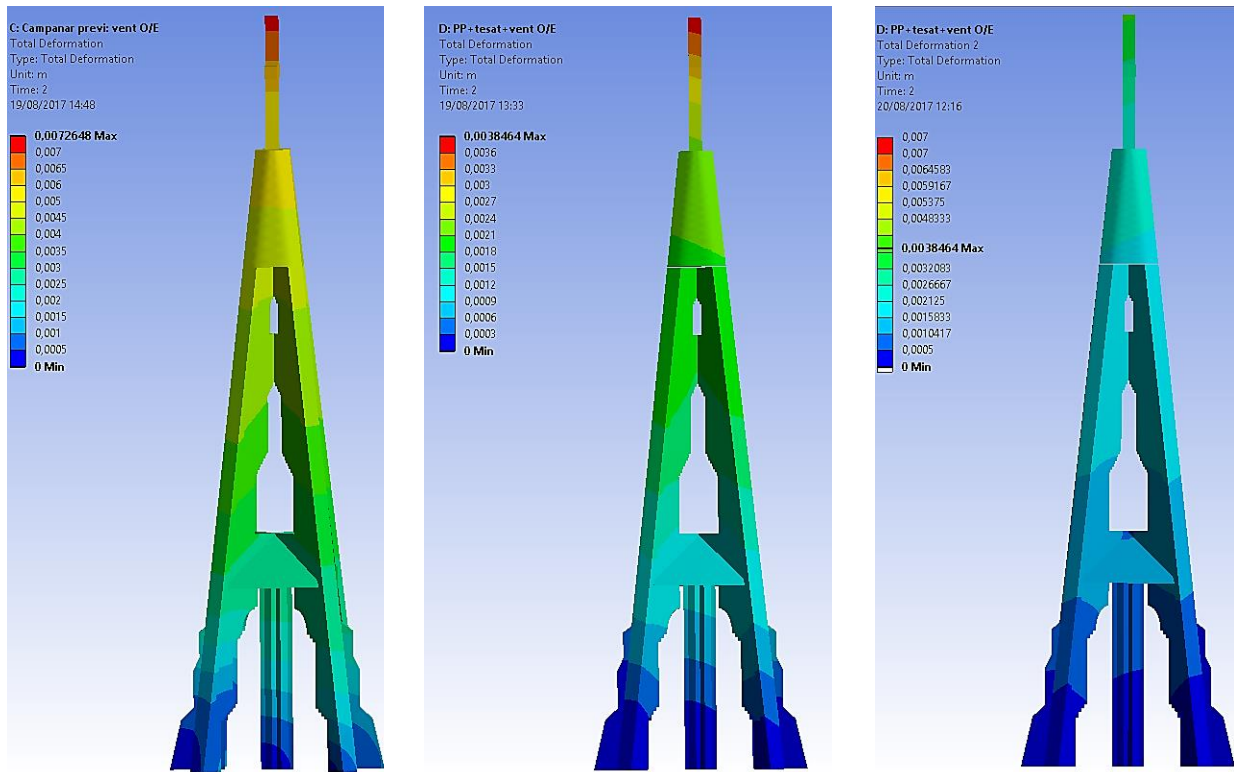


Fig.73: Diagrama de deformacions totals a la cara B. En imatge, campanar previ, 2n.Campanar tesat i 3r.Comparació

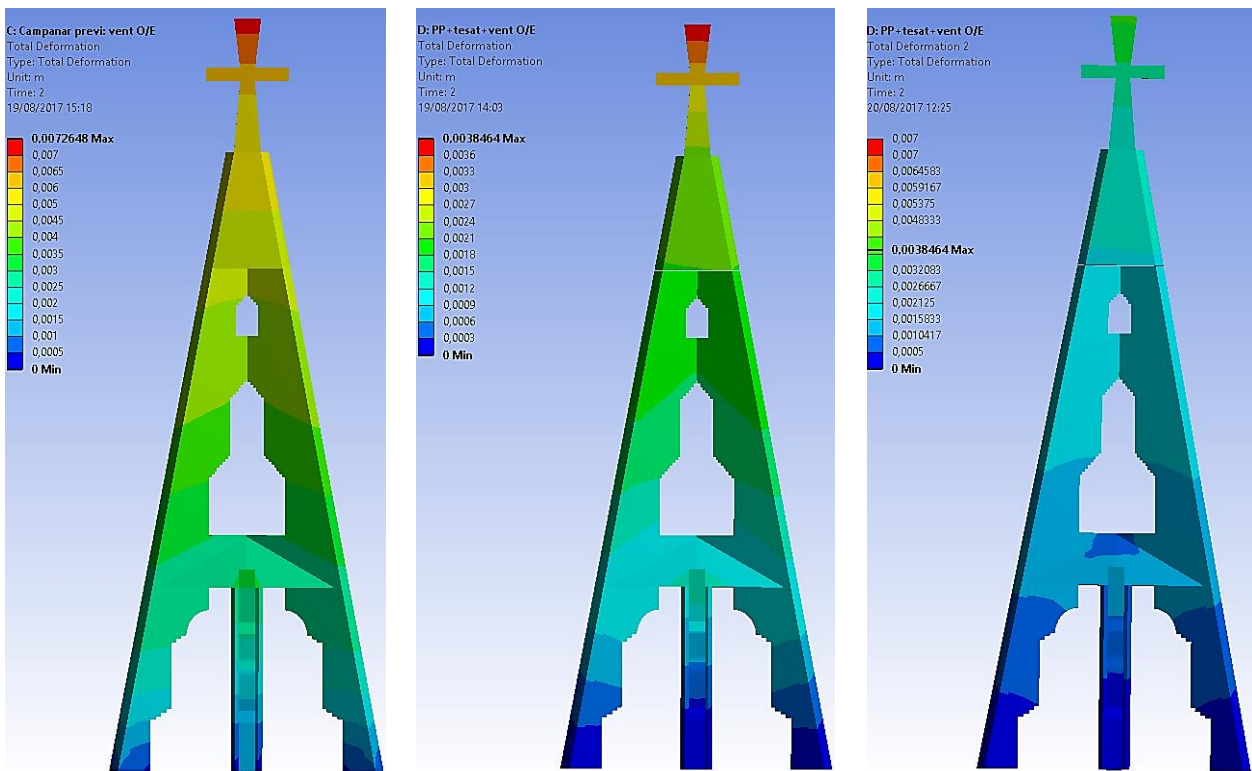


Fig.74: Diagrama de deformacions totals a la cara C. En imatge, campanar previ, 2n.Campanar tesat i 3r.Comparació

9.2.4 Pes propi + vent N/S / pes propi + tesat + vent N/S

9.2.4.1 Compressió

S'observa com amb l'aplicació del vent, les cares A i C ja no són simètriques en el model previ, ja que es produeix un efecte de flexió, on la cara succionada queda més comprimida que la cara pressionada. Tot i això, aquesta asimetria no és tan acusada com amb el vent O/E, ja que el campanar té més inèrcia en aquest eix.

En el model tesat, en canvi, segueix havent-hi un diagrama de tensions molt semblant al model previ, deformant-se lleugerament per l'acció del vent. Els valors de les compressions oscil·len majoritàriament fins a 1,4 MPa, creant-se zones més crítiques que poden ser consultades a l'Annex 1.

En general, no se sobrepassen les tensions admissibles dels materials, tot i que el model dona alguns valors més elevats. Aquestes zones es concentren als vèrtexs i arestes encastats a la base i als suports dels tirants, en estar encastats a les costelles i a les cantonades. Aquests valors anòmals poden deure's a un mallat poc fi o al fet que calgui un càlcul de fissuració per caracteritzar millor aquestes zones.

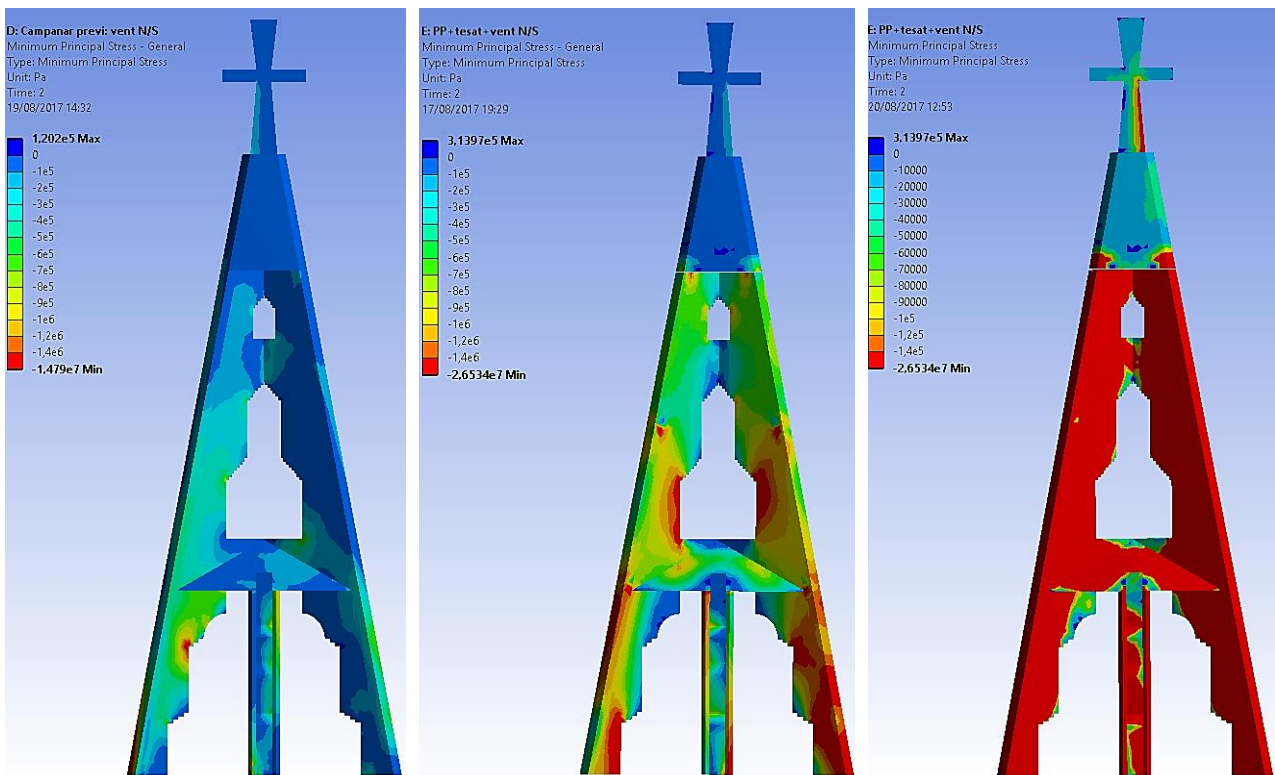


Fig. 75: Diagrama de compressions a la cara A. En imatge, 1r.Campanar previ, 2n.Campanar tesat i 3r.Comparació

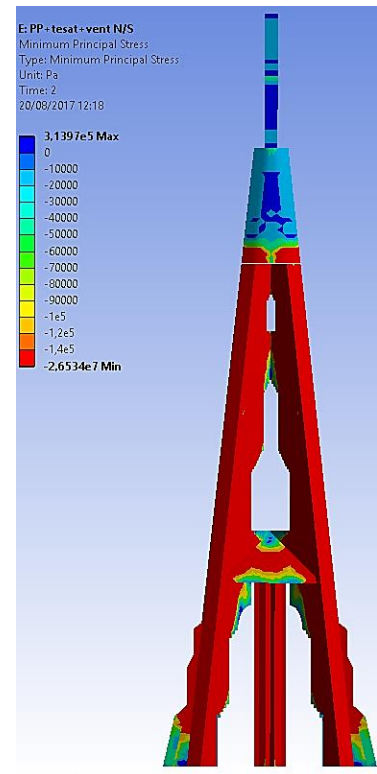
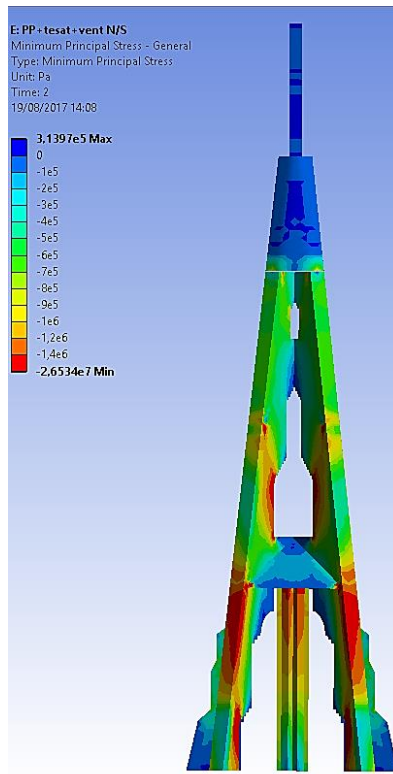
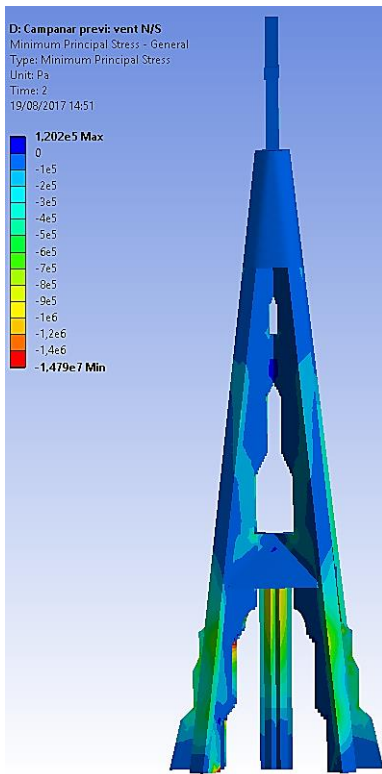


Fig.76: Diagrama de compressions a la cara B. En imatge, 1r.Campanar previ, 2n.Campanar tesat i 3r.Comparació

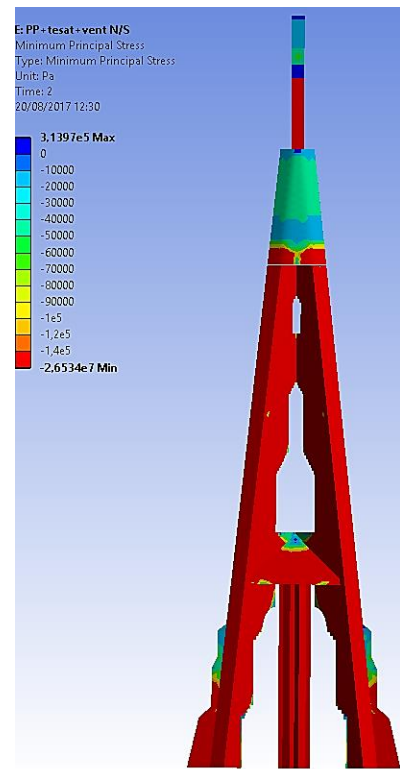
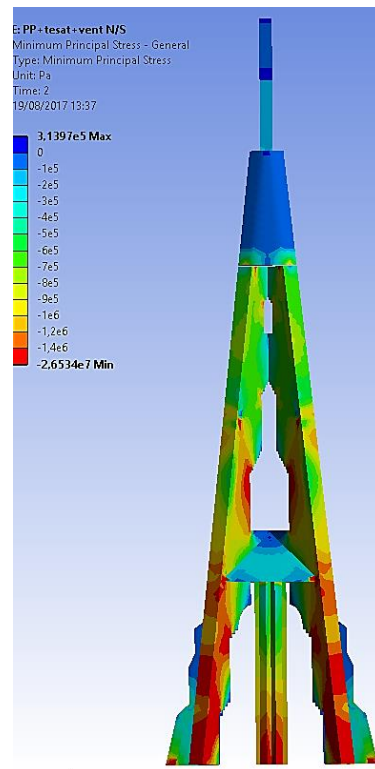
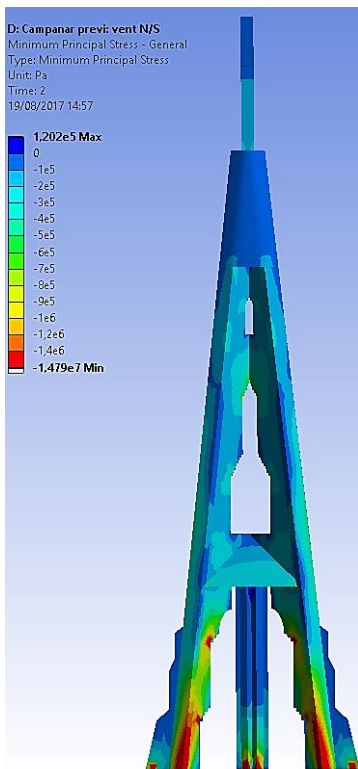


Fig.77: Diagrama de compressions a la cara D. En imatge, 1r.Campanar previ, 2n.Campanar tesat i 3r.Comparació

9.2.4.2 Tracció

El vent aplicat al campanar torna a provocar que les distribucions de les traccions canviïn completament entre els dos models. Al campanar previ, es generen uns fluxos de tracció en diagonal i s'estenen per la base de les altres costelles. En canvi, el campanar tesat conserva pràcticament l'esquema de l'anàlisi de pes propi + tesat, tot i que es marquen dues zones lleugerament més traccionades, també en diagonal.

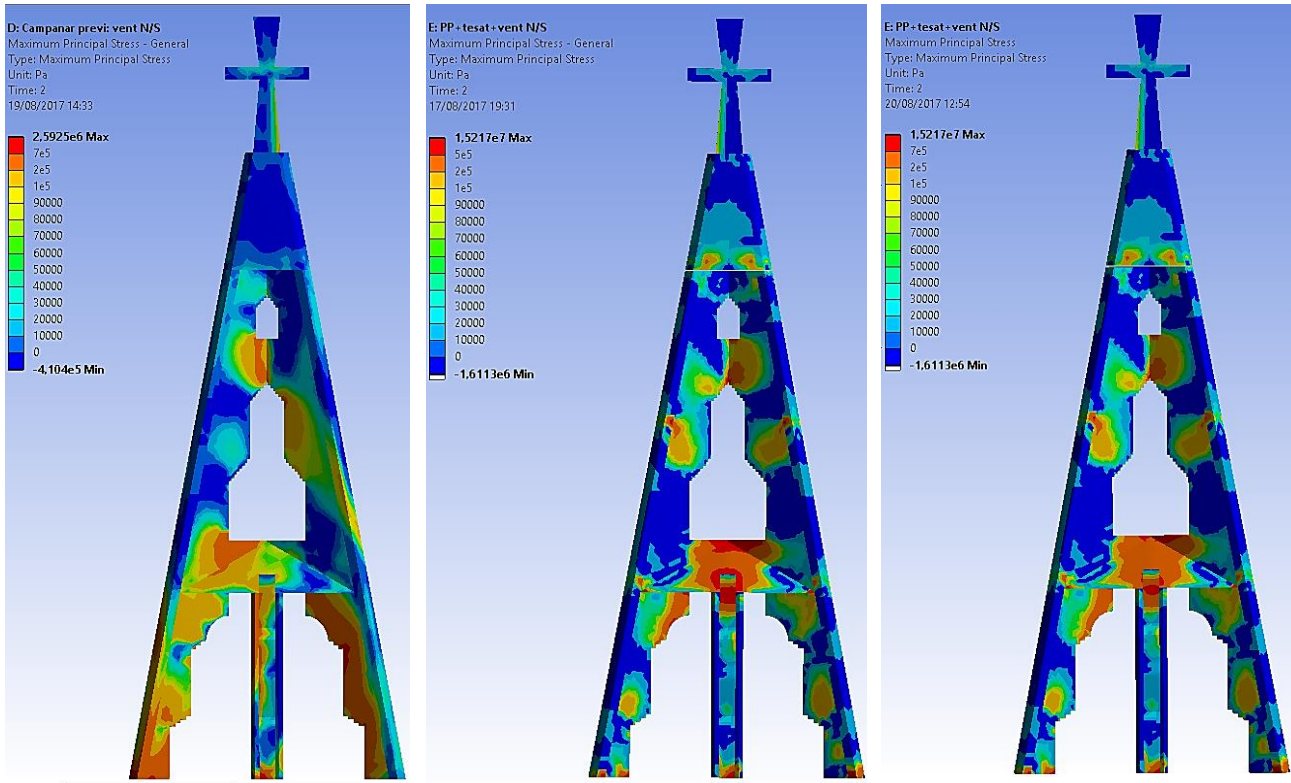


Fig.78: Diagrama de traccions a la cara A. En imatge, 1r.Campanar previ, 2n.Campanar tesat i 3r.Comparació

Les cares B i D també mostren diferències entre els dos casos. Es torna a fer notori aquest flux de traccions en diagonal que envolta el campanar previ, mentre que amb l'ajuda del tesat les costelles principals es mantenen amb traccions properes a 0.

La base concentra traccions a l'entorn del pivot encastat que hi ha configurat, fet que fa que els resultats en aquest punt no puguin ser realistes. Aquest efecte no és tan acusat en el cas del campanar tesat, ja que els suports dels tirants en aquest nivell també estan encastats i ajuden a relaxar les traccions que es donen al pivot.

Caldria utilitzar algun sistema de reforç per ajudar a dissipar les traccions de les costelles al nivell del replà o analitzar aquestes zones tenint en compte la fissuració de la fàbrica.

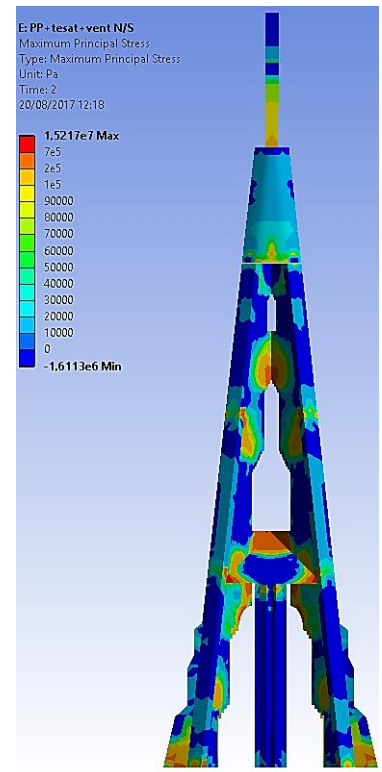
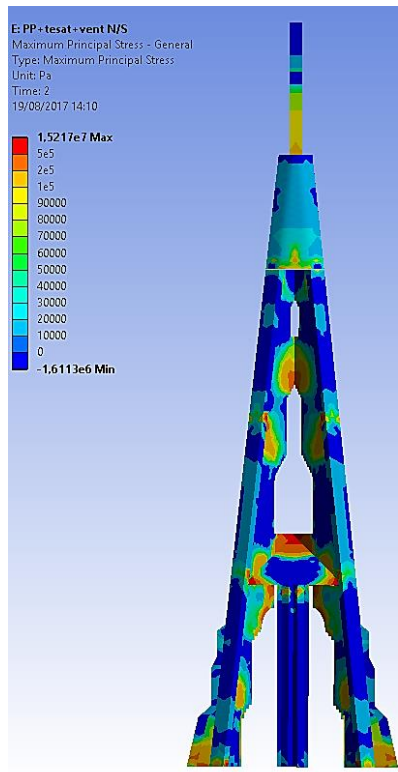
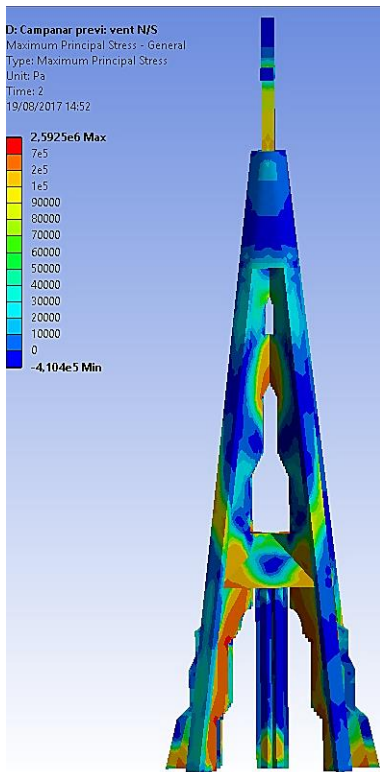


Fig.79: Diagrama de traccions a la cara B. En imatge, 1r.Campanar previ, 2n.Campanar tesat i 3r.Comparació

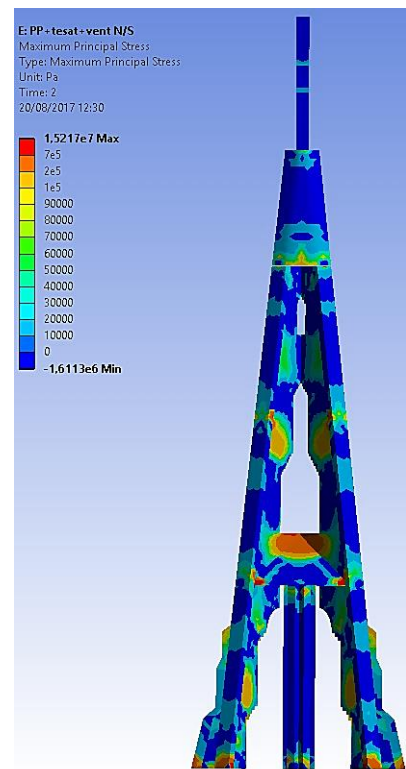
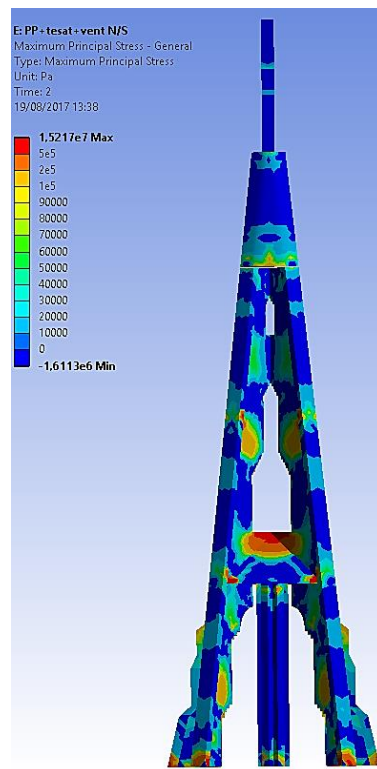
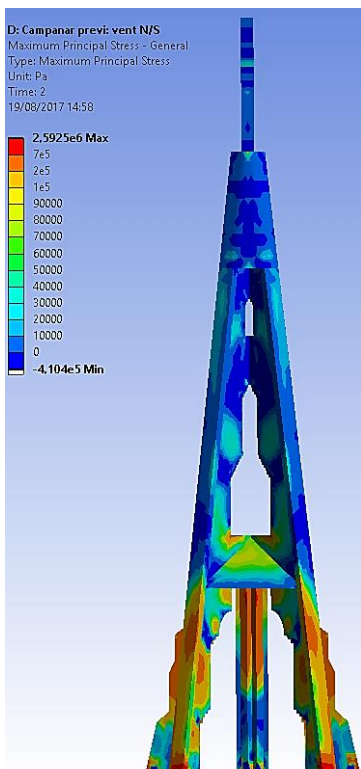


Fig.80: Diagrama de traccions a la cara D. En imatge, 1r.Campanar previ, 2n.Campanar tesat i 3r.Comparació

9.2.4.3 Deformació

El diagrama comparatiu mostra com les deformacions han minvat i es manté una certa simetria en les deformacions. En el model anterior, per contra, es pot observar que les costelles de la cara pressionada es deformen lleugerament a causa d'aquesta exposició.

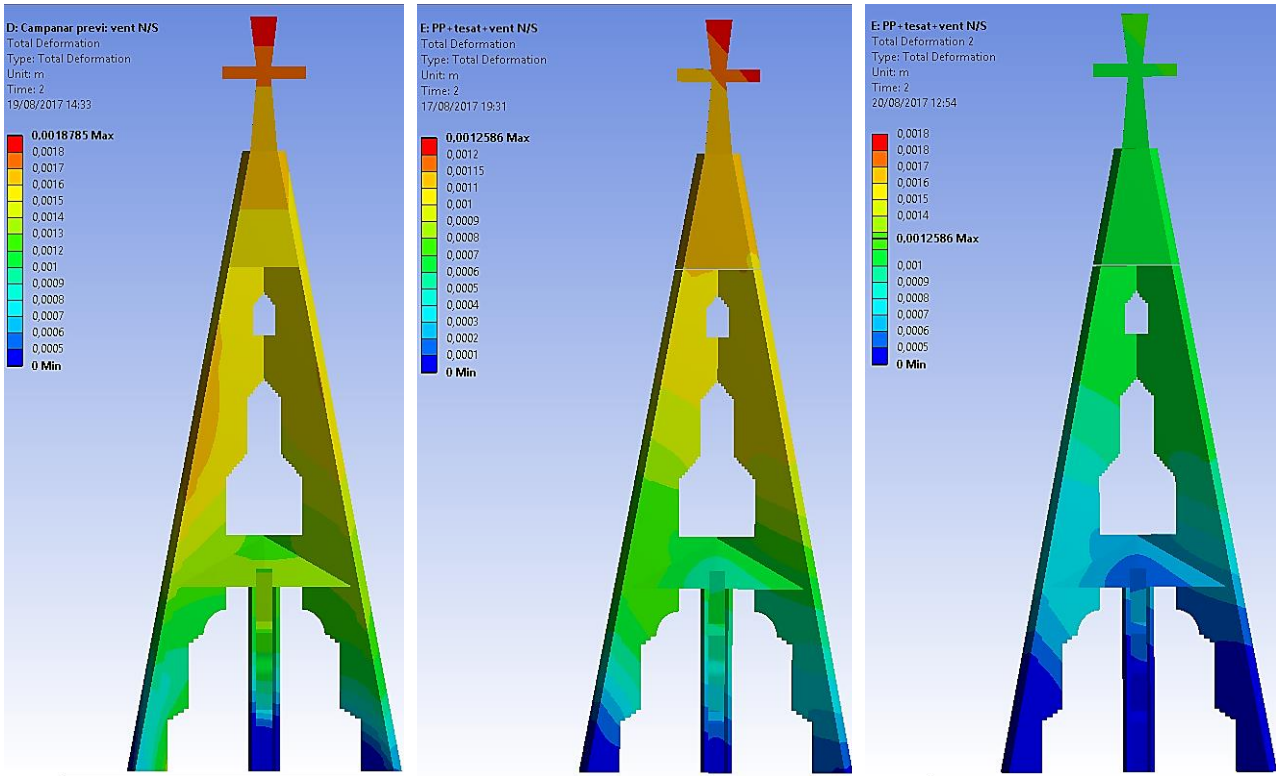


Fig.82: Diagrama de deformacions totals a la cara A. En imatge, 1r.Campanar previ, 2n.Campanar tesat i 3r.Comparació

La reducció de la deformació és notable en aquesta anàlisi, ja que passa de 1,8 mm a 1,2 mm, una millora del 33% respecte de model previ.

També cal destacar les deformacions a la base. En el model tesat, no hi ha deformacions a la base, però al model previ es produeixen algunes deformacions a l'eix Z+. Això significa que la base de les costelles s'aixeca lleugerament i provoca l'inici del procés de bolcada.

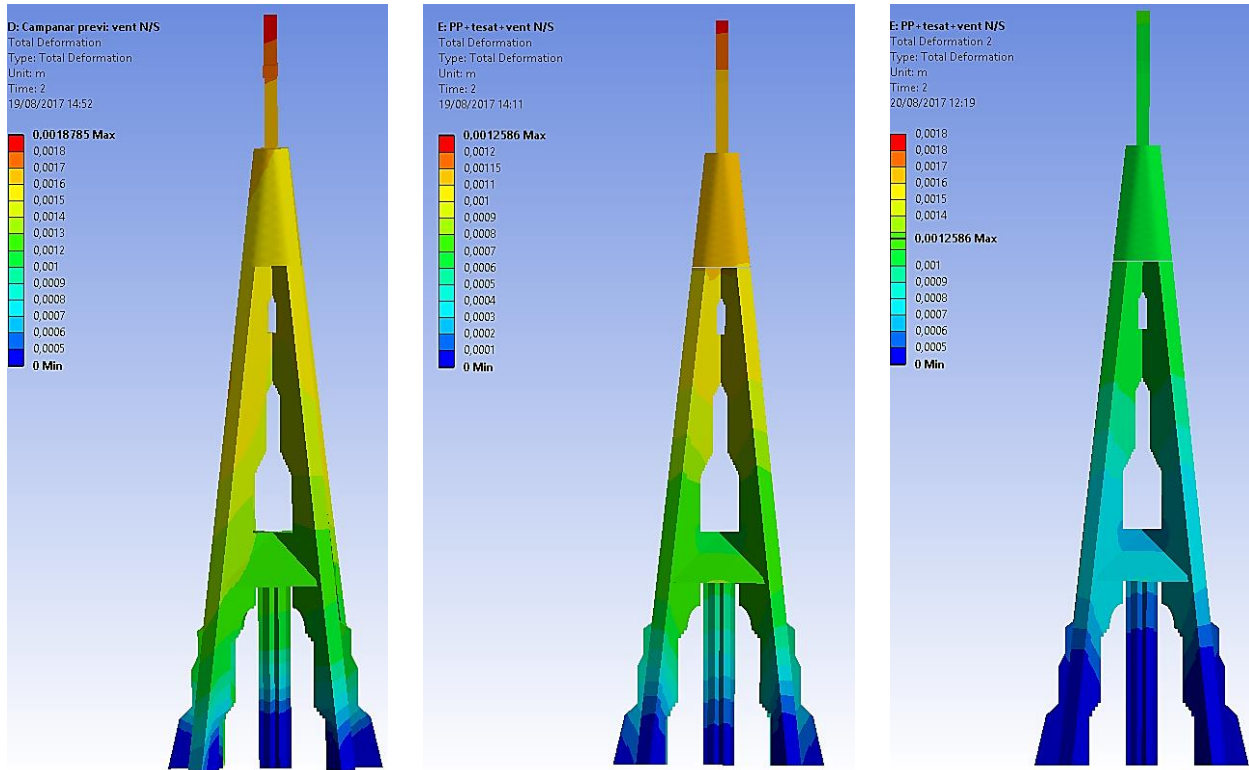


Fig.83: Diagrama de deformacions totals a la cara B. En imatge, campanar previ, 2n.Campanar tesat i 3r.Comparació

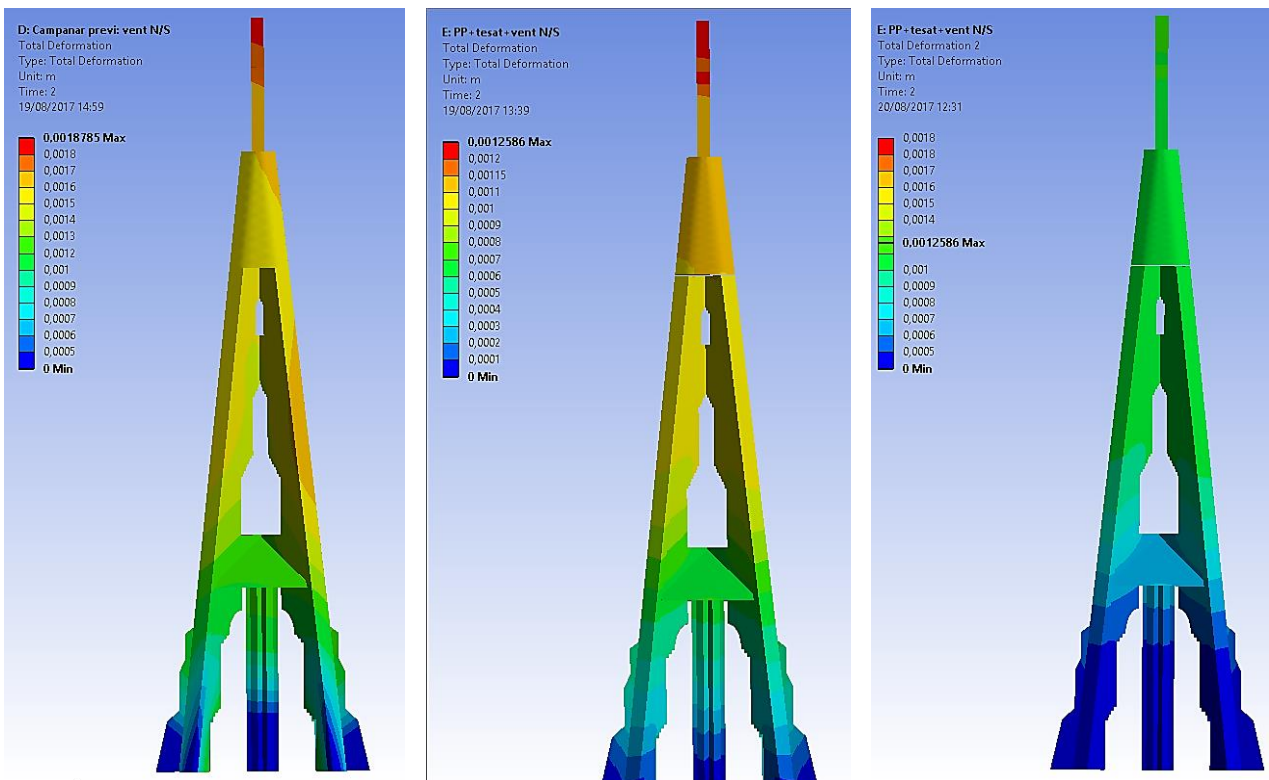


Fig.84: Diagrama de deformacions totals a la cara D. En imatge, campanar previ, 2n.Campanar tesat i 3r.Comparació

10. Conclusions

Aquest Treball Final de Grau s'ha dut a terme tenint en compte diversos objectius promoguts pel director del projecte i l'autor, i que es poden llegir en el capítol 1 d'aquest estudi. A continuació es descriuen les conclusions que se'n poden extreure:

10.1 Aprenentatge

- S'ha aprofundit en el camp del càlcul estructural, a través del Mètode d'Elements Finitos (MEF) d'estructures no assimilables a barres. Aquest tipus de mètode no té restriccions d'aplicació i permet conèixer d'una manera més precisa els estats tensionals de cada punt dels elements estructurals per ser avaluats, en funció de la geometria i de l'estat de càrregues a què està sotmesa.
- S'ha obtingut un aprenentatge i coneixement d'eines de disseny, modelització i càlcul per dur a terme una anàlisi pel MEF i que queda recollit al capítol 8 d'aquest treball a mode de guia per a futurs treballs, la qual cosa facilitarà l'ús dels programes a futurs estudiants que necessitin utilitzar-los:
 - El procés d'aprenentatge dels programes utilitzats ha estat present gairebé fins al final. La manca d'experiència amb la utilització d'aquest tipus de *software* ha provocat que el procés de modelització i refinament del model, com també la creació de contactes i suports hagi estat llarg i hagi calgut molts ajustaments per aconseguir el model definitiu.

10.2 Resultats obtinguts

- L'efecte del tesat produeix que el campanar vegi augmentades les tensions màximes de compressió i tracció, així com la deformació màxima, respecte de l'estat previ. Aquest no provoca zones de concentració de tensions noves, sinó que intensifica les que ja apareixien degudes al pes propi.
- En general, el sistema de consolidació estructural utilitzat provoca esforços completament assumibles pels materials que formen el campanar. Les compressions en el model tesat, al voltant de 1,4 MPa, són 10 vegades superiors als valors de compressió del model previ, però molt per sota del límit de resistència a compressió de la fàbrica, 7 MPa.
- El vent provoca que els models entrin en flexió, produint-se un augment de les traccions a la cara pressionada i un increment de les compressions a la cara succionada. Tot i això, l'afectació d'aquesta flexió és completament diferent en els dos casos estudiats.
 - En el model previ, aquesta flexió es fa molt evident, on les cares pressionada i succionada passen a treballar d'una manera diferent. Mentre que la cara succionada veu incrementada la compressió en els seus punts, la cara pressionada es presenta

amb valors propers al límit, 0,7 MPa, fet que pot provocar la fissuració massiva d'aquestes zones o l'inici d'un procés de bolcada.

Les deformacions també fan arribar a la mateixa conclusió: es produeixen lleugeres deformacions en l'eix Z+ i uns valors de deformació màxima en l'eix on actua el vent.

- En el model tesat, en canvi, l'efecte del vent sobre el campanar és menor. En aquest cas les cares ja no presenten canvis tan bruscs com en el model previ, degut a la compressió inicial produïda pel tesat. Ara, la cara succionada presenta valors de compressió més elevats però perfectament assumibles per les característiques mecàniques de la fàbrica, mentre que es redueixen les traccions a la cara pressionada, on en gran part del campanar són properes a 0, especialment als elements portants del campanar, les costelles.

Els valors de deformació també denoten aquesta millora amb un decrement de les deformacions màximes produïdes en l'eix actuant del vent i un decrement de les deformacions màximes globals.

- Per absorbir les traccions produïdes a la zona del replà és convenient col·locar-hi un reforç que ajudi a dissipar aquestes traccions dels elements de fàbrica.

10.3 Noves línies d'investigació

- Es proposa l'estudi dinàmic del vent al campanar, fent passar els models per un túnel de vent que determini d'una manera més realista les zones de pressió i succió que es creen al seu voltant i els valors resultants d'aquestes. Per últim, es suggereix fer la comparació dels resultats obtinguts amb els d'aquest treball i contrastar els dos mètodes.
- Es proposa l'estudi de les zones crítiques identificades en aquest treball, majoritàriament concentrades a la zona del replà, analitzant-les tenint en compte la fissuració. Aquest treball proposat també hauria de comptar amb un estudi detallat de suports i contactes i l'optimització d'aquests, així com un estudi de la malla, per tal de poder caracteritzar les zones crítiques d'una manera fidedigna.

Girona, setembre del 2017

L'estudiant redactor del projecte,

Jordi van Leeuwen Bernat

11. Bibliografia

La bibliografia utilitzada per a la realització d'aquest treball ha estat:

- *Codi Tècnic de l'Edificació* (2006), Ministerio de Vivienda. Any 2006
- PRATS I ROCAVERT, SANTI (2015). *Projecte de restauració de l'església del Sagrat Cor de Vistabella* [Document en línia]. Arquebisbat de Tarragona [Data de consulta: 2 de febrer de 2017] <http://www.arquebisbattarragona.cat/03_PT_Projecte_Tecnic_+Annexos.pdf>
- *L'univers de Jujol*, Barcelona, Col·legi d'Arquitectes de Catalunya, 28 d'abril-27 de maig 1998 (Catàleg d'exposició)
- *Jujol dissenyador*, Barcelona, Museu Nacional d'Art de Catalunya, 17 de maig-18 d'agosta 2002 (Catàleg d'exposició)
- SOLÀ-MORALES, IGNASI (1990). *Jujol*. Barcelona: Edicions Polígrafa S.A.
- SERRA FONT, NARCÍS (2009). *Modelització numèrica d'un sistema de descàrrega d'una columna de la catedral de Girona mitjançant el Mètode d'Elements Finites*. Projecte Final de Carrera. Escola Politècnica Superior. Universitat de Girona.
- CANTAL VERJUAN, ALBERT; AGUIREGOMOZCORTA GIL, JUAN (2010). *Estudi de l'aplicació d'accions a un pinacle a escala del campanar de l'església de Sant Fèlix*. Projecte Final de Carrera. Escola Politècnica Superior. Universitat de Girona.
- CAÑON MALLÉN, EDUARD (2006). *Modelització numèrica d'estructures d'obra de fàbrica mitjançant el mètode dels elements finits (anàlisi no lineal)*. Projecte Final de Carrera. Escola Politècnica Superior. Universitat de Girona
- GONZALEZ GARCÍA, JUANA MARIA [et al] (2014), *Cómo escribir un Trabajo de fin de grado*. Madrid: Editorial Síntesis.
- KENT, LAWRENCE (2014). *ANSYS Tutorial: Release 14* [Llibre en línia]. Google Scholar. [Data de consulta: 11 de febrer de 2017] <<http://www.sdcpublications.com/pdfs/sample/1-58503-268-9-2.pdf>>
- BUCHE, FREDERICK J.; HECHT, EUGENE (2007). *Física general* [Llibre en línia]. Google Scholar. [Data de consulta: 4 de maig de 2017] <https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/44772560/fc3adsica-general-10ma-edicio3b3n-schaum.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A&Expires=1504099939&Signature=2bDv2u3X5yYW0L4Sq4qYkQyPB7A%3D&response-content-disposition=inline%3B%20filename%3DFisica_general_10ma_edicion_schaum.pdf>
- Cercaterm [En línia] [Barcelona: TERMCAT] <http://www.termcat.cat/> [Consulta: diverses dates]

12. Annexos

Annex 1. Resultats de les anàlisis realitzades

Annex 2. Documentació gràfica utilitzada⁽¹⁾

Annex 1. Resultats de les anàlisis realitzades

A1.1 Campanar previ

A1.1.1 Pes propi

A1.1.1.1 Compressions màximes

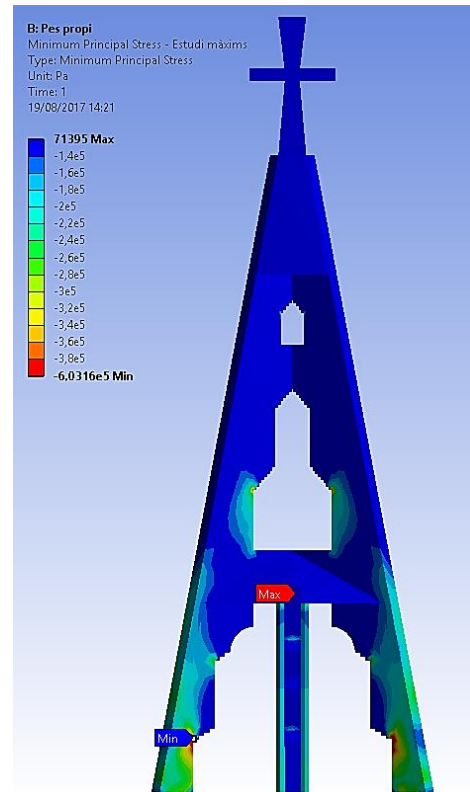
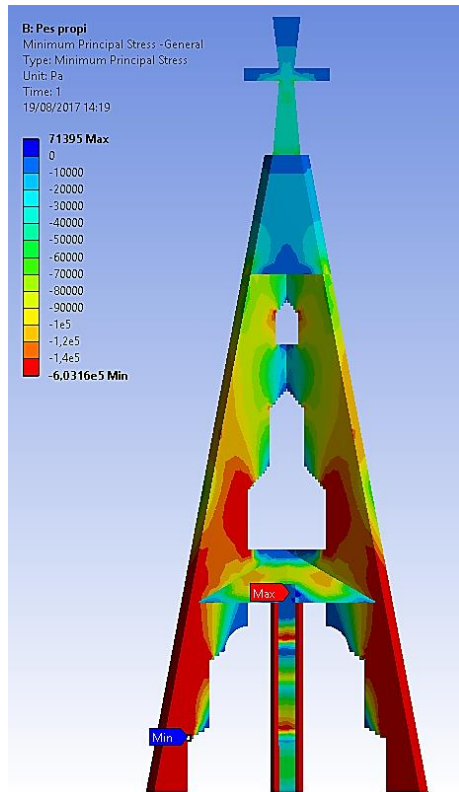


Figura 85: A l'esquerra, diagrama de compressions màximes a la cara A. A la dreta, estudi de màxims.

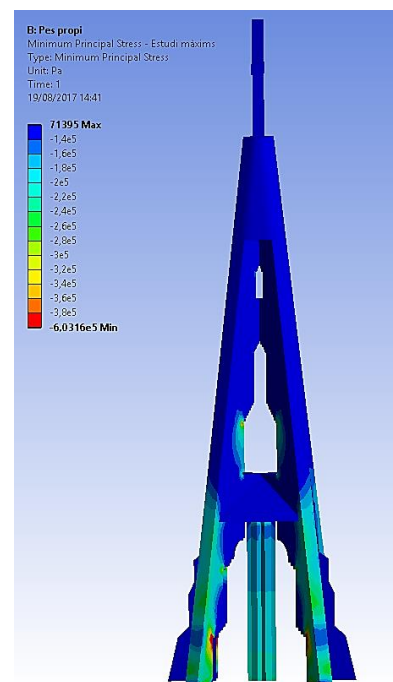
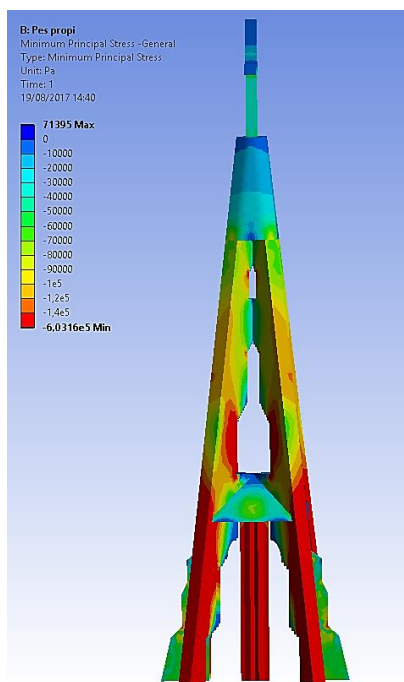


Figura 86: A l'esquerra, diagrama de compressions màximes a la cara B. A la dreta, estudi de màxims.

A1.1.1.2 Traccions màximes

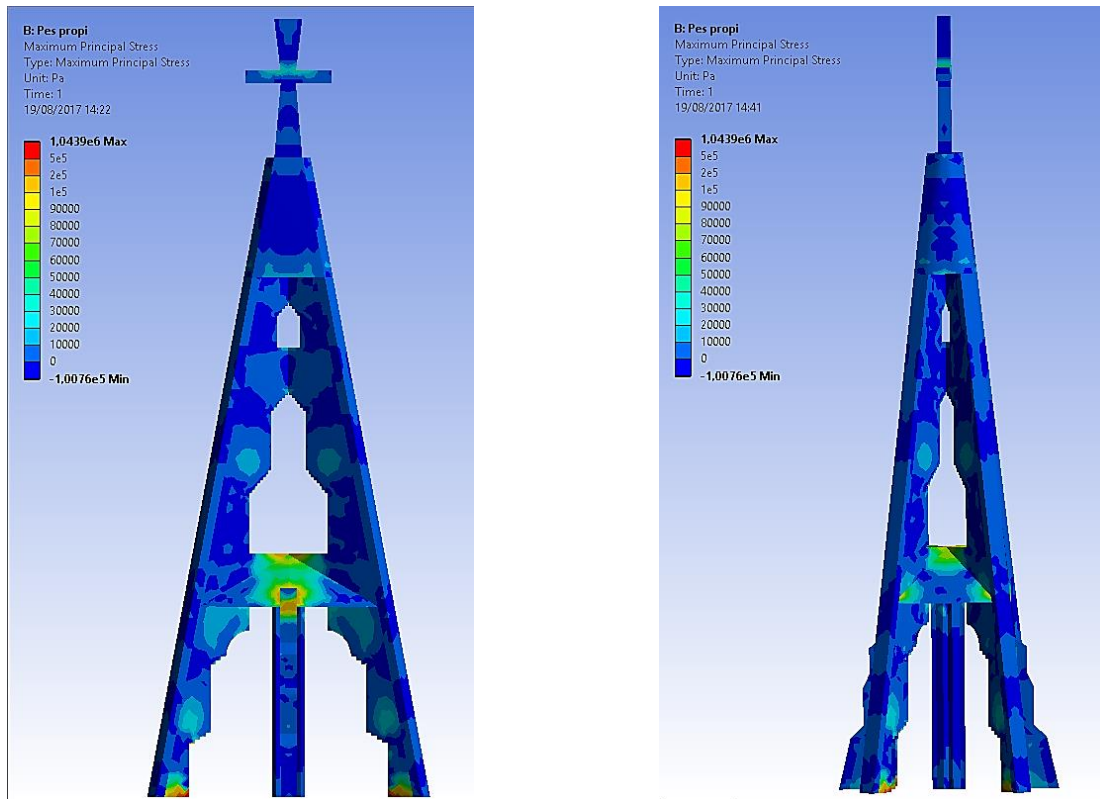


Figura 87: A l'esquerra, diagrama de traccions màximes a la cara A. A la dreta, estudi de màxims.

A1.1.1.3 Deformacions

A1.1.1.3.1 Total

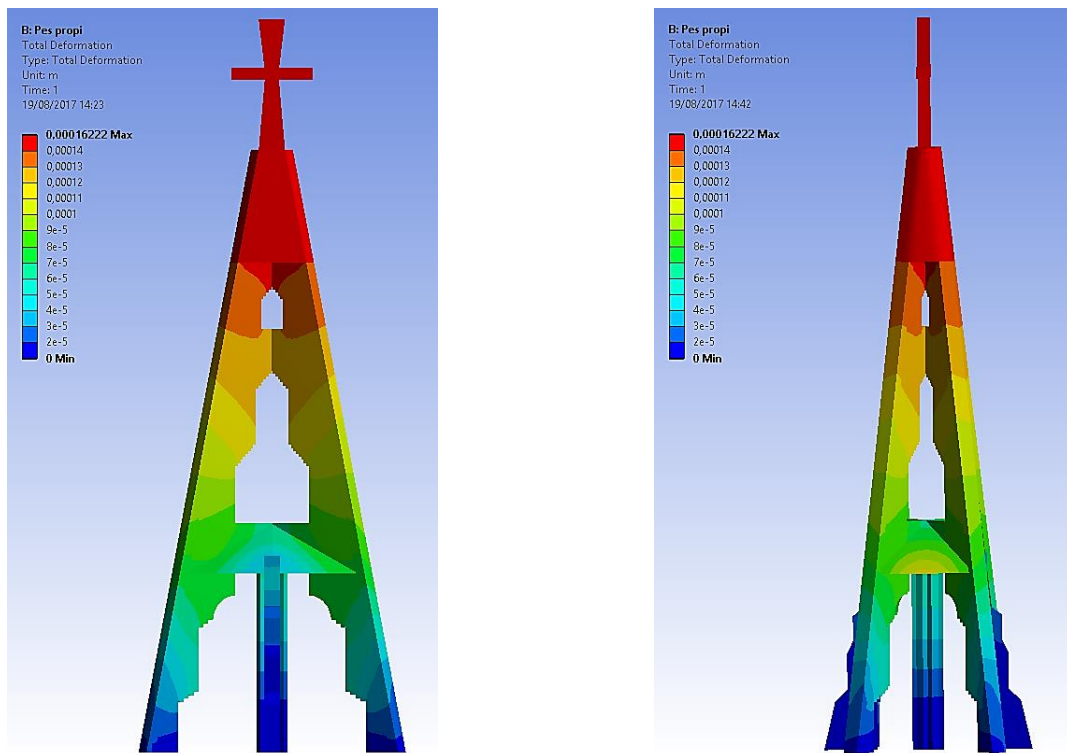


Figura 88: A l'esquerra, diagrama de deformació total a la cara A. A la dreta, a la cara B.

A1.1.1.3.2 Eix X

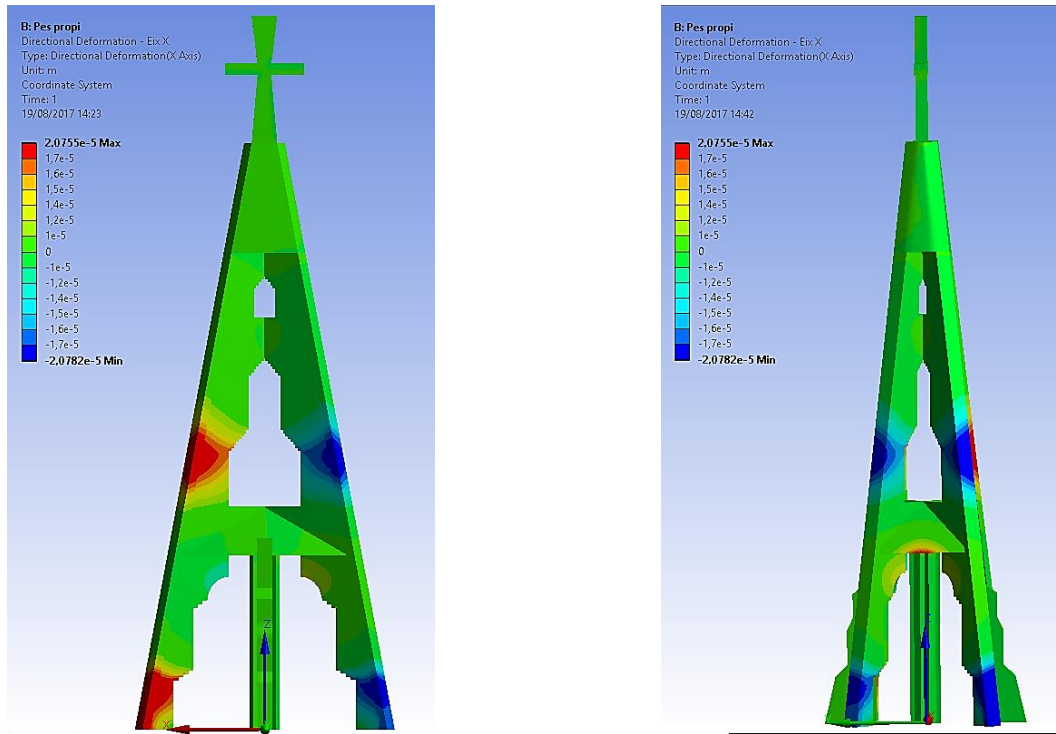


Figura 89: A l'esquerra, diagrama de deformació a l'eix X a la cara A. A la dreta, a la cara B.

A1.1.1.3.3 Eix Y

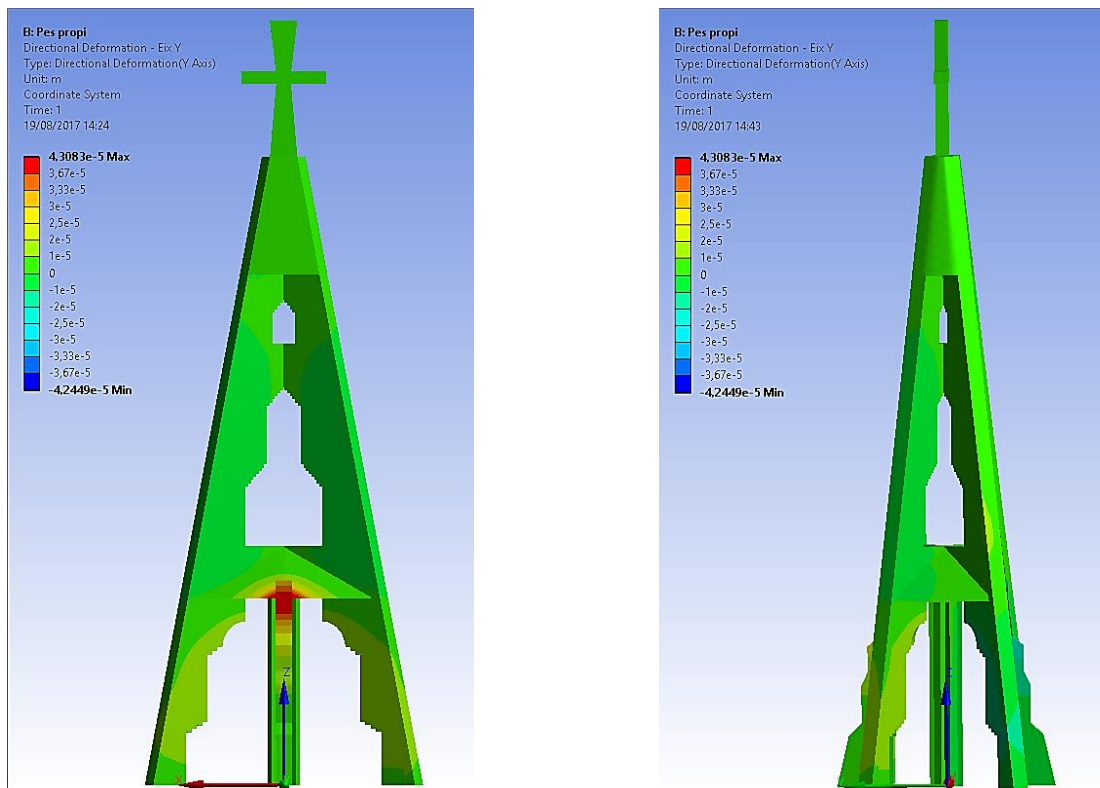


Figura 90: A l'esquerra, diagrama de deformació a l'eix Y a la cara A. A la dreta, a la cara B.

A1.1.1.3.4 Eix Z

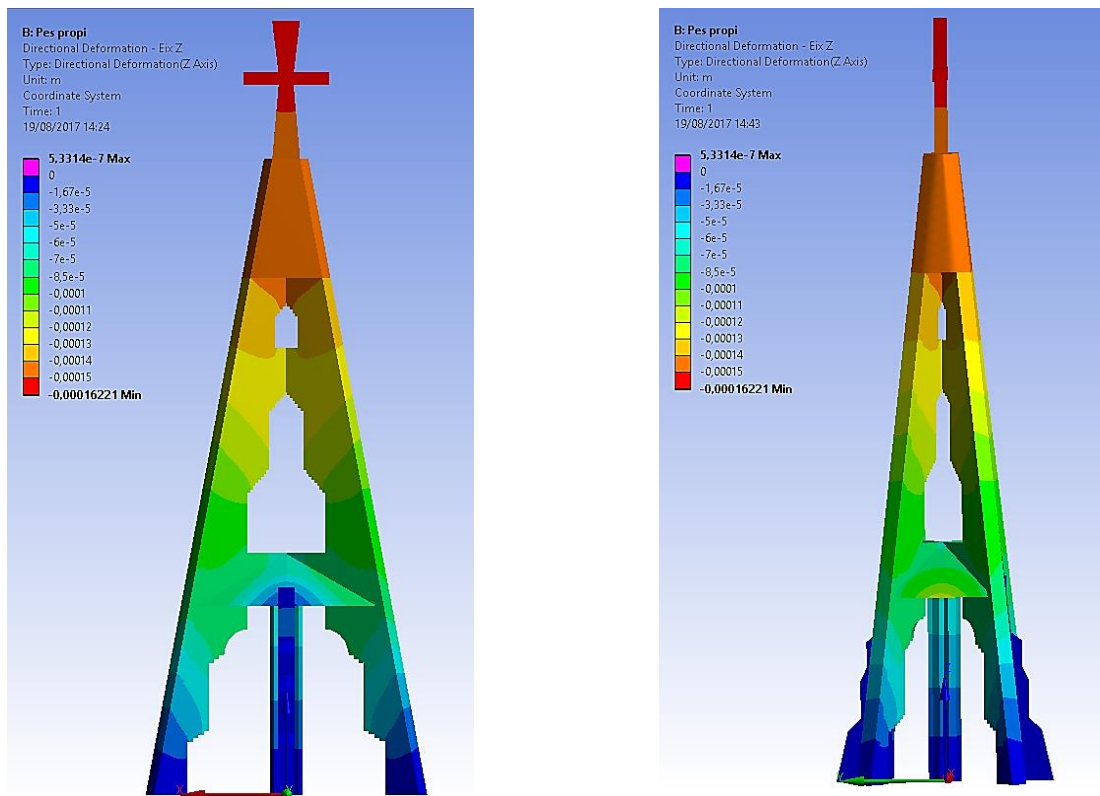


Figura 91: A l'esquerra, diagrama de deformació a l'eix Z a la cara A. A la dreta, a la cara B.

A1.1.1.4 Coeficient de seguretat

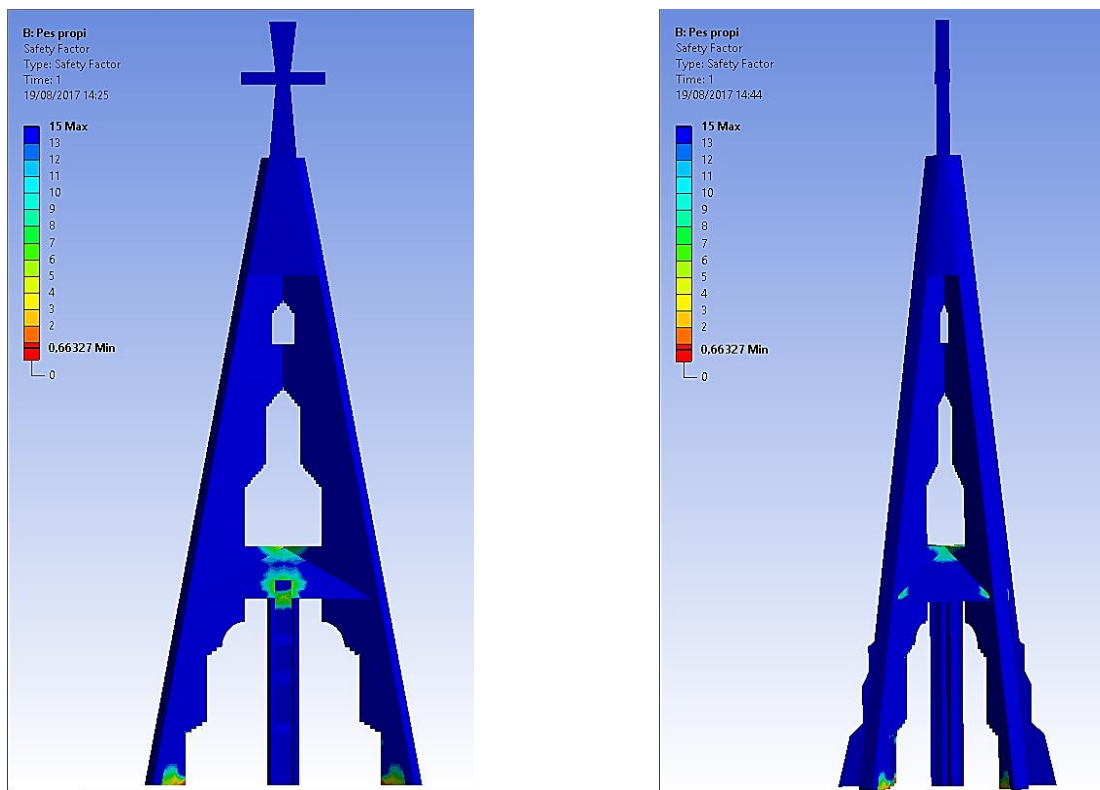


Figura 92: A l'esquerra, diagrama del coeficient de seguretat a l'eix X a la cara A. A la dreta, a la cara B.

A1.1.2 Pes propi + vent O/E

A1.1.2.1 Compressions màximes

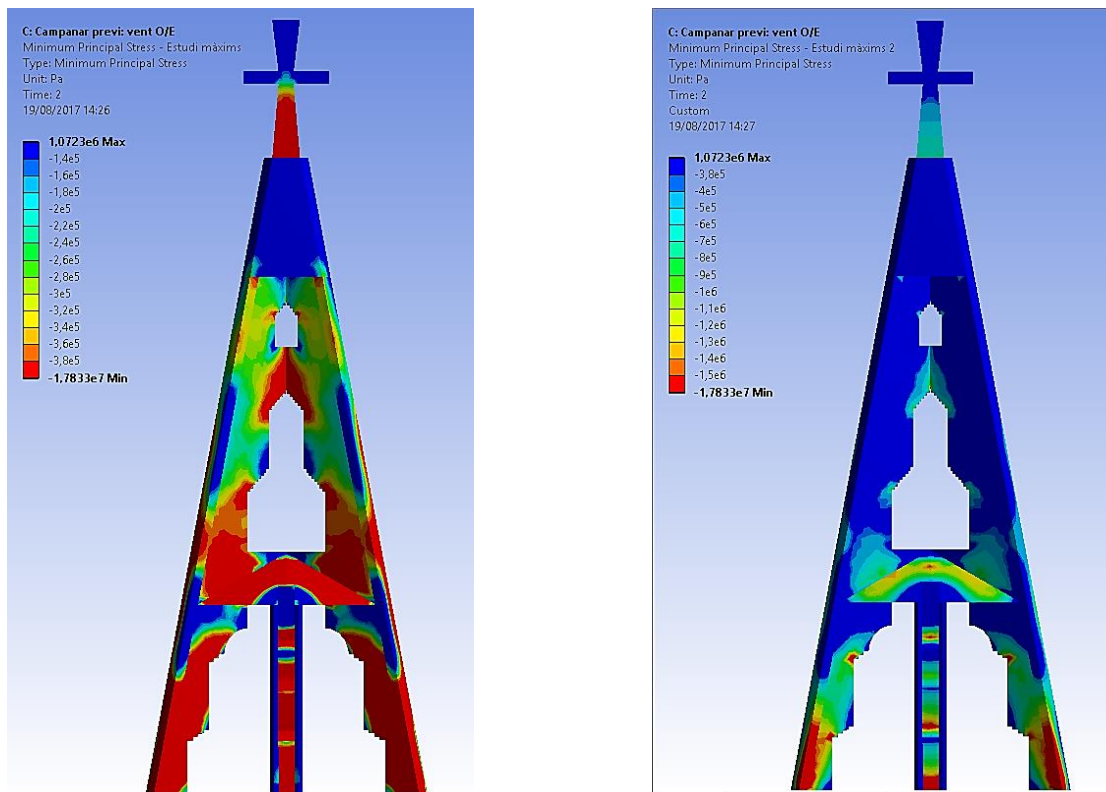


Figura 93: A l'esquerra, diagrama de compressions màximes a la cara A. A la dreta, estudi de màxims.

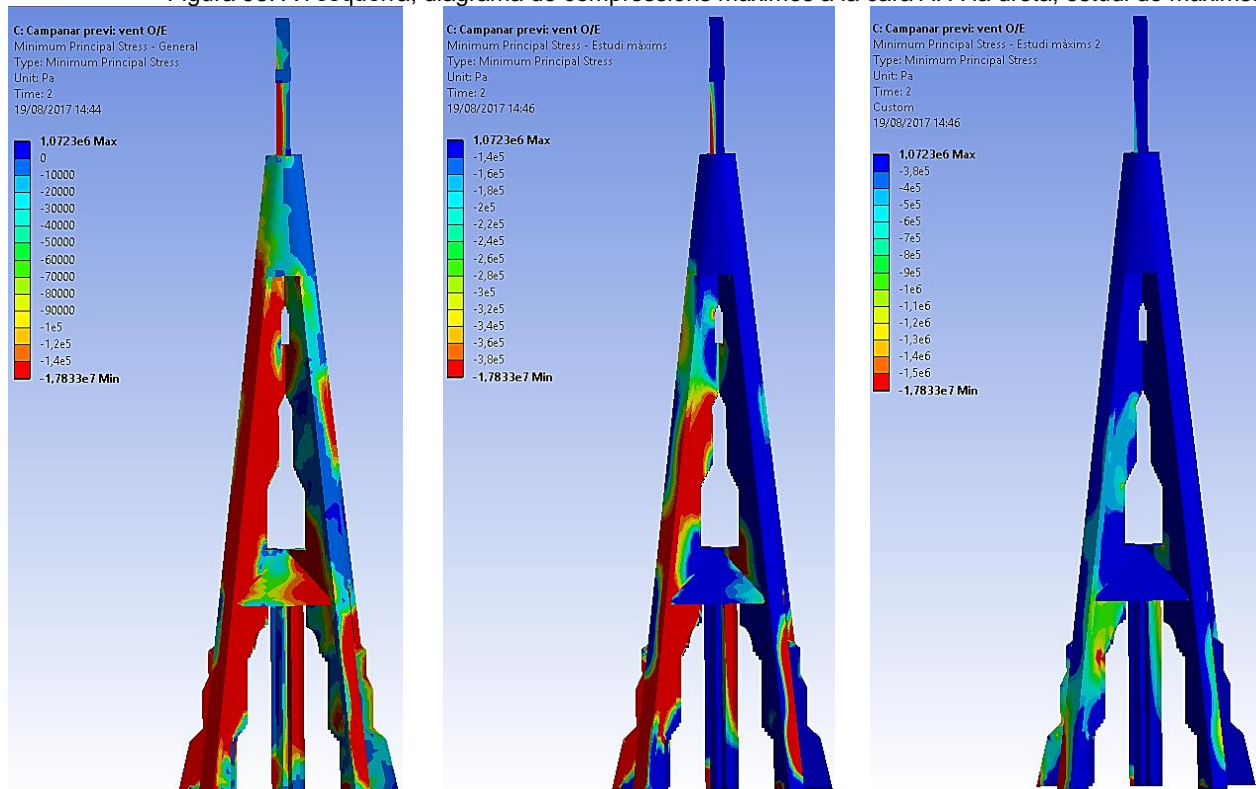


Figura 94: A l'esquerra, diagrama de compressions màximes a la cara B. Al centre i a la dreta, estudi de màxims.

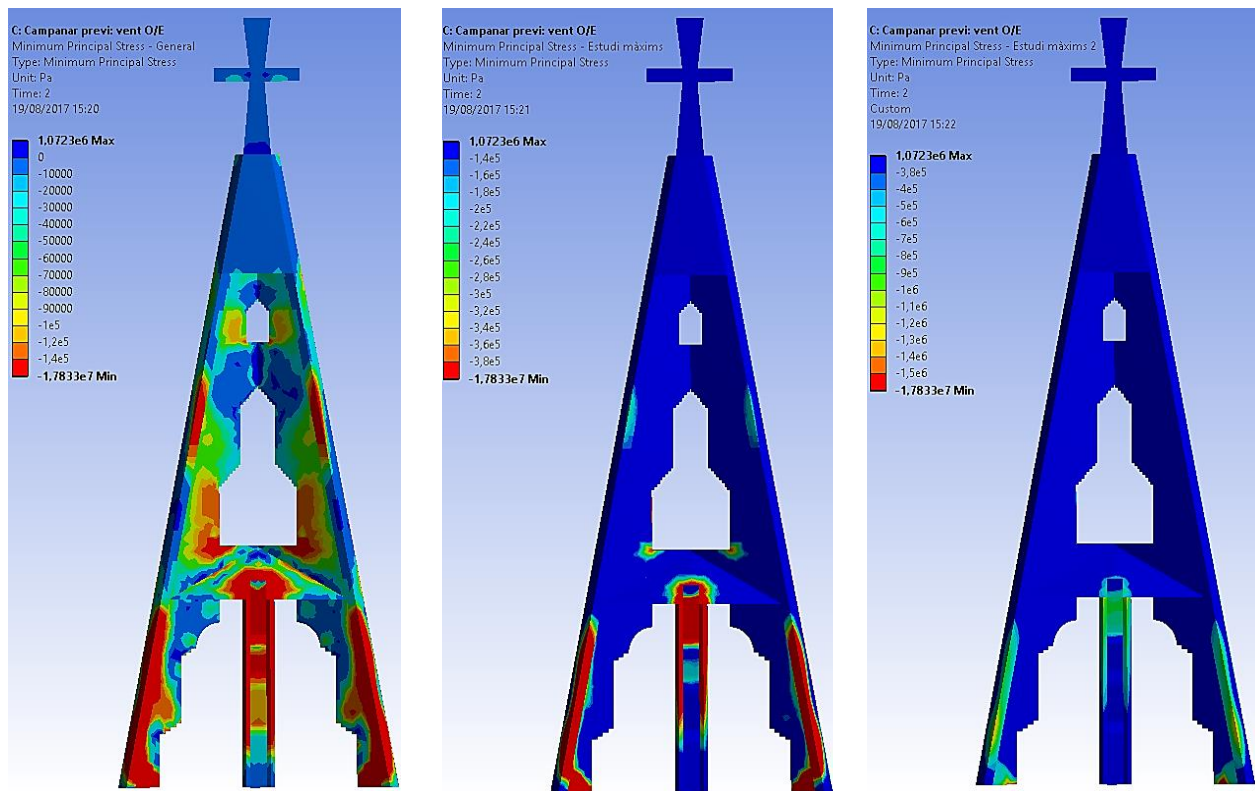


Figura 95: A l'esquerra, diagrama de compressions màximes a la cara C. Al centre i a la dreta, estudi de màxims.

A1.1.2.2 Traccions màximes

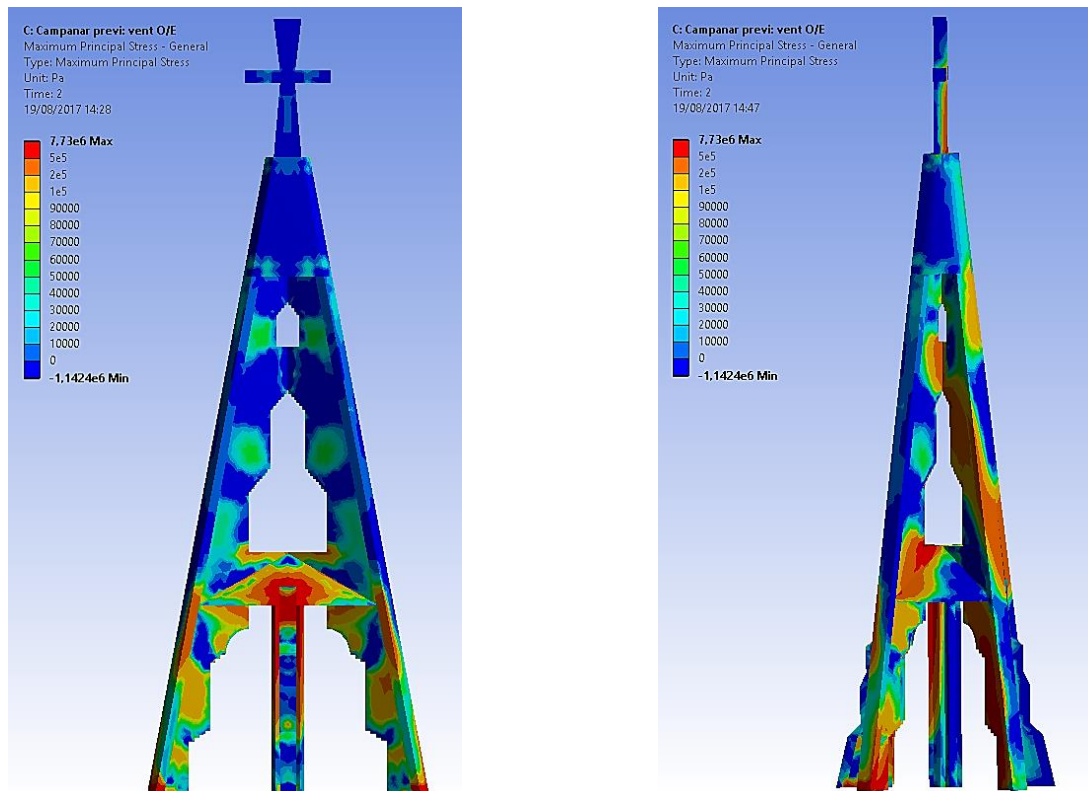


Figura 96: A l'esquerra, diagrama de traccions màximes a la cara A. A la dreta, a la cara B.

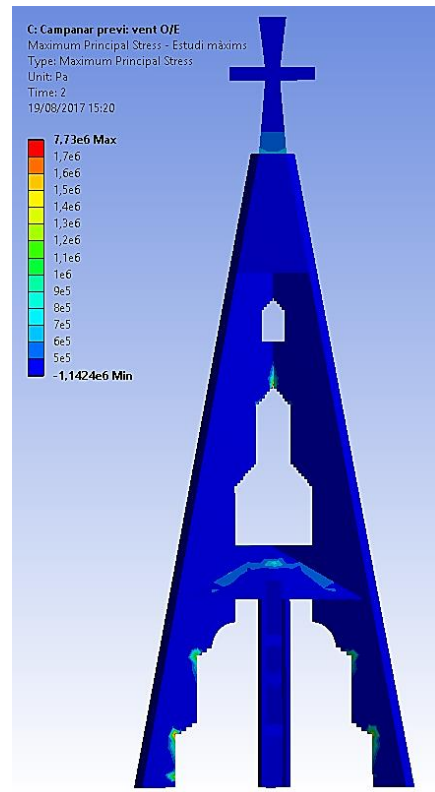
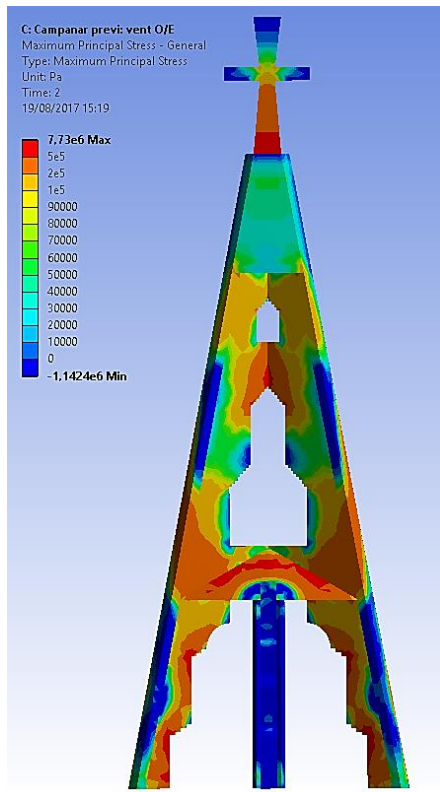


Figura 97: A l'esquerra, diagrama de traccions màximes a la cara C. A la dreta, estudi de màxims

A1.1.2.3 Deformacions

A1.1.2.3.1 Total

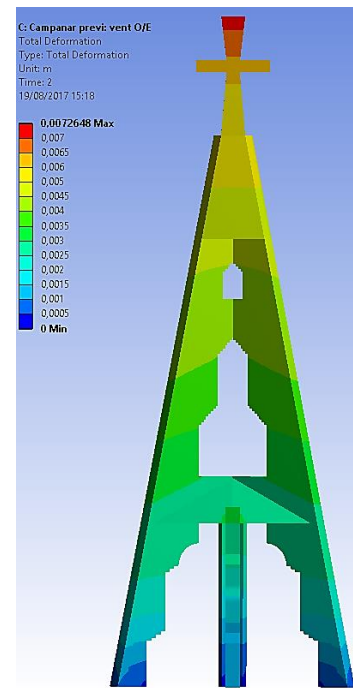
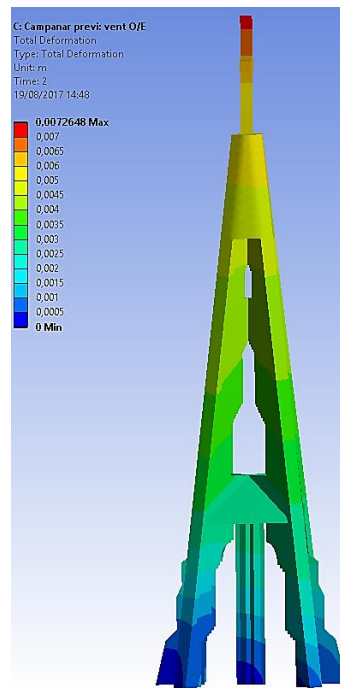
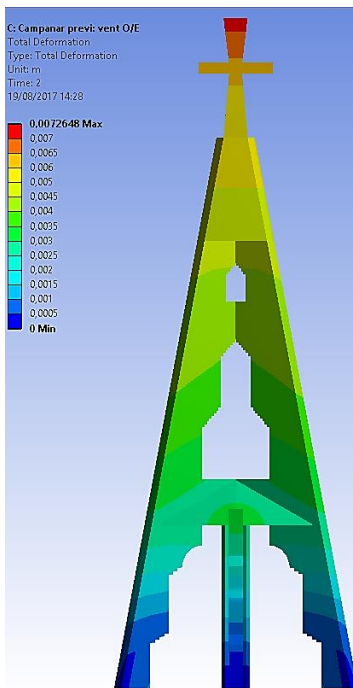


Figura 98: A l'esquerra, diagrama de deformació total a la cara A. Al centre, a la cara B. A la dreta, a la cara C.

A1.1.2.3.2 Eix X

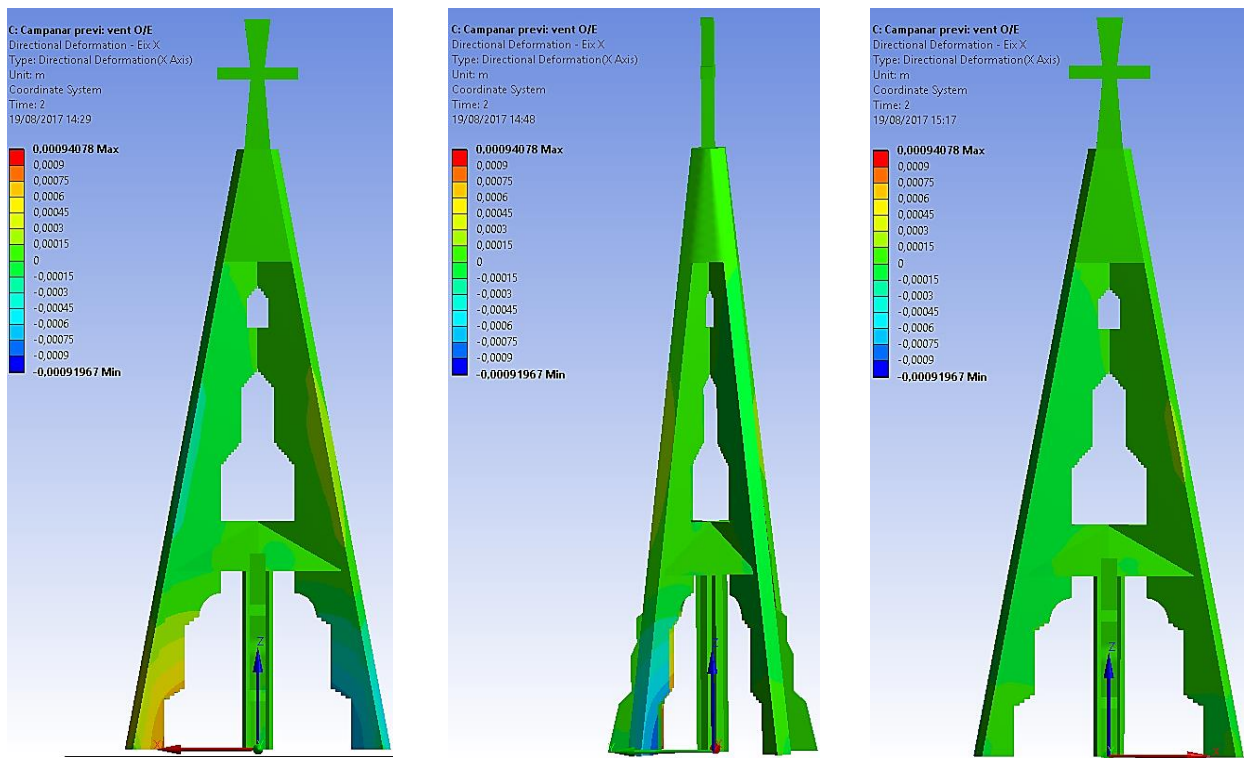


Figura 99: A l'esquerra, diagrama de deformació a l'eix X a la cara A. Al centre, a la cara B. A la dreta, a la cara C.

A1.1.2.3.3 Eix Y

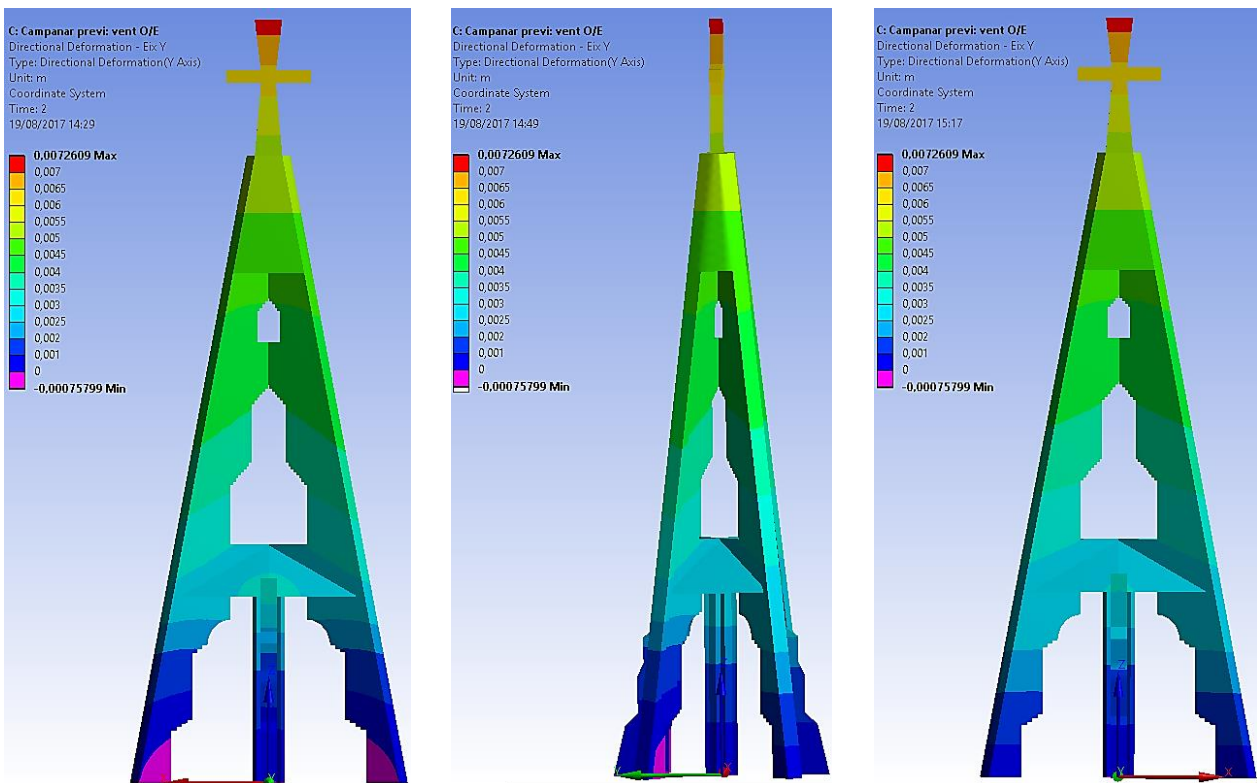


Figura 100: A l'esquerra, diagrama de deformació a l'eix Y a la cara A. Al centre, a la cara B. A la dreta, a la cara C.

A1.1.2.3.4 Eix Z

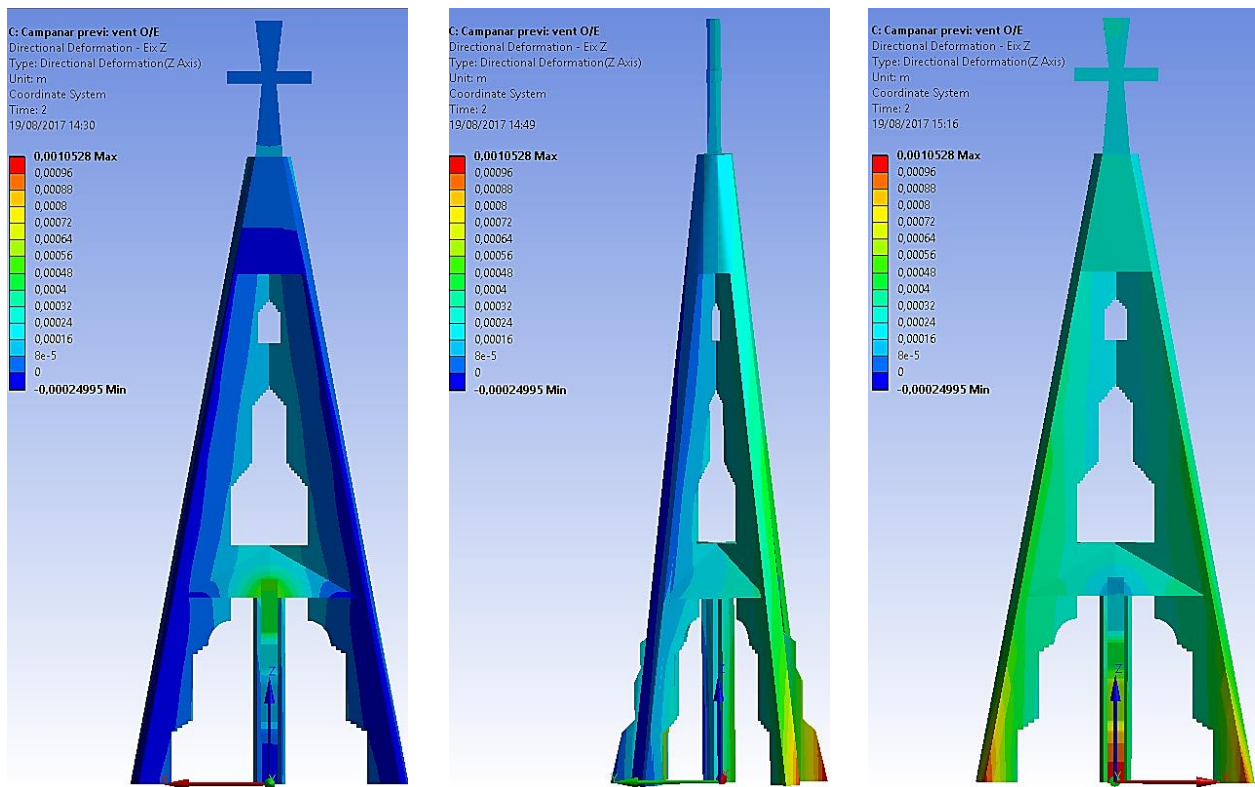


Figura 101: A l'esquerra, diagrama de deformació a l'eix Z a la cara A. Al centre, a la cara B. A la dreta, a la cara C.

A1.1.2.4 Coeficient de seguretat

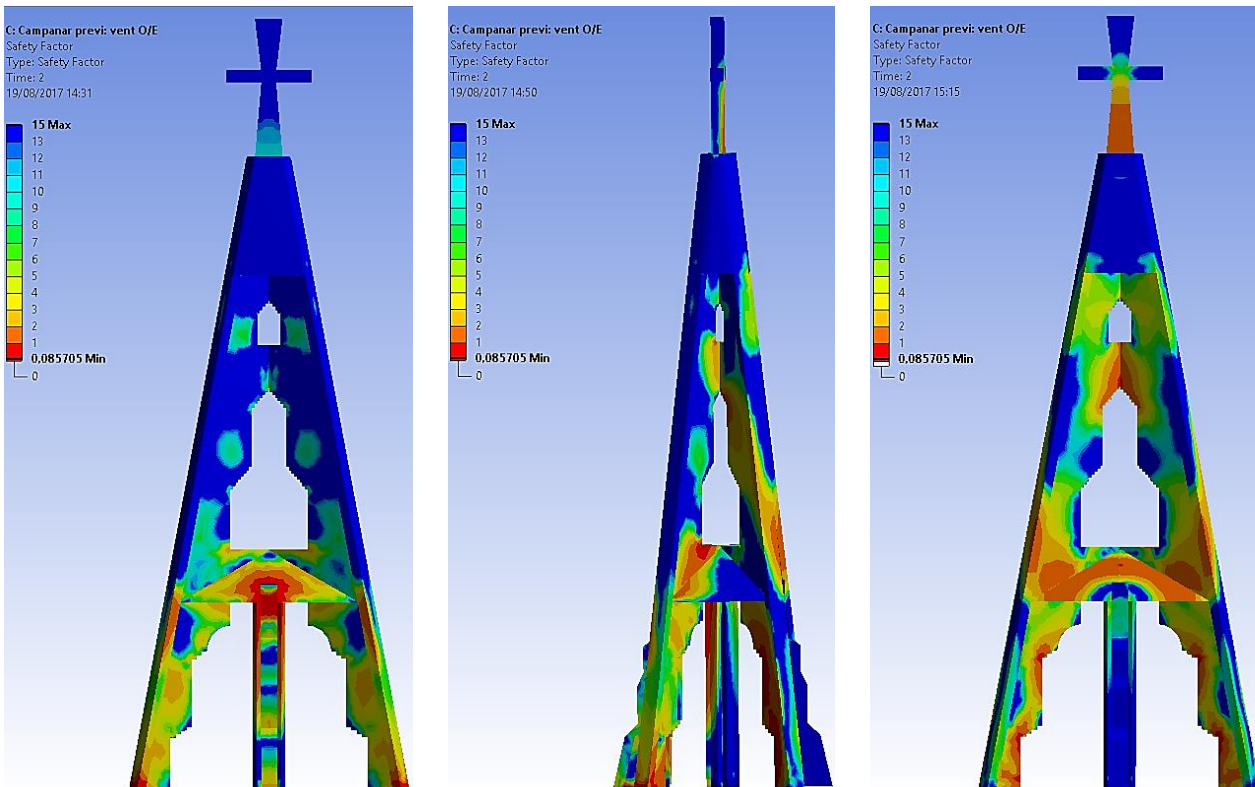


Figura 102: A l'esquerra, diagrama del coeficient de seguretat a la cara A. Al centre, a la cara B. A la dreta, a la cara C.

A1.1.3 Pes propi + vent N/S

A1.1.3.1 Compressions màximes

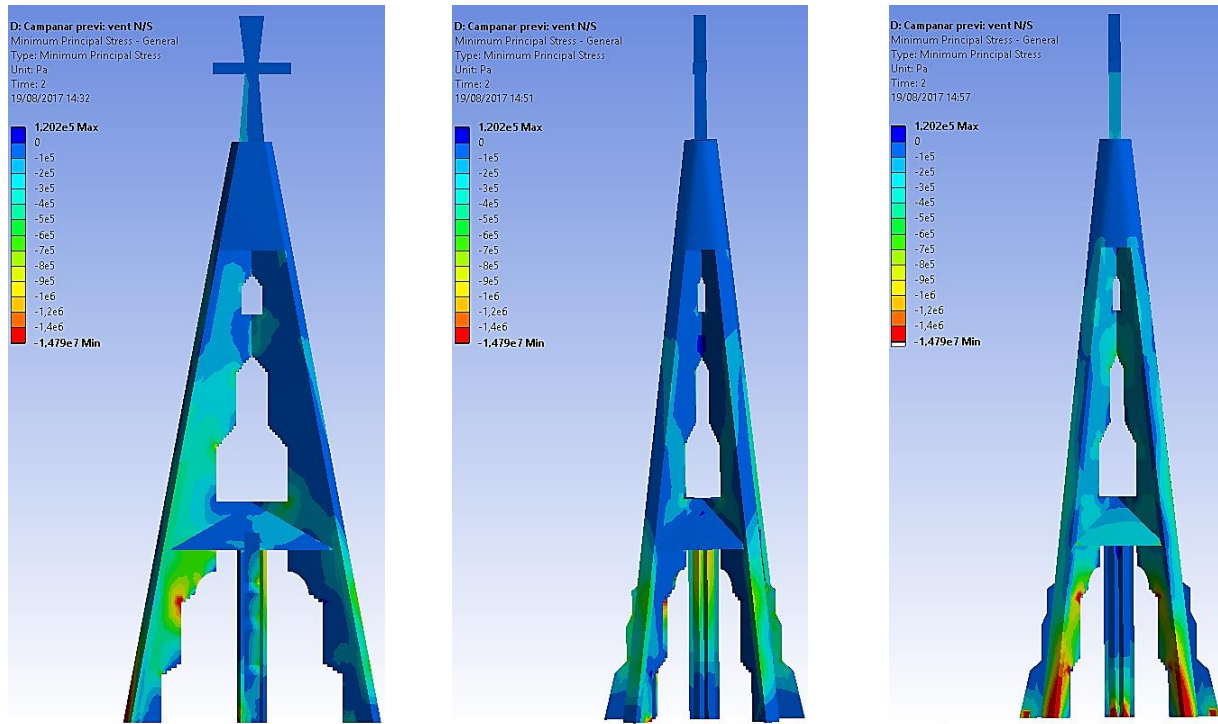


Figura 103: A l'esquerra, diagrama de compressions màximes a la cara A. Al centre, a la cara B. A la dreta, a la cara C.

A1.1.3.2 Traccions màximes

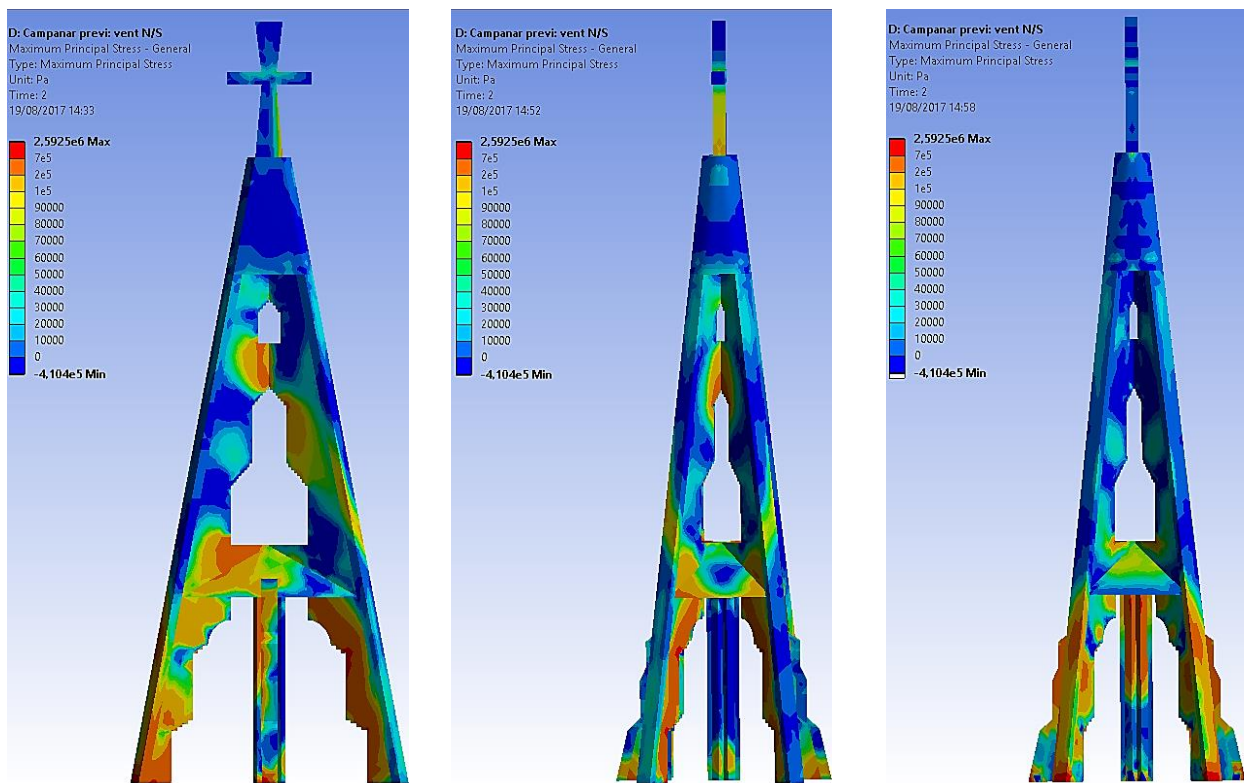


Figura 104: A l'esquerra, diagrama de traccions màximes a la cara A. Al centre, a la cara B. A la dreta, a la cara C.

A1.1.3.3 Deformacions

A1.1.3.3.1 Total

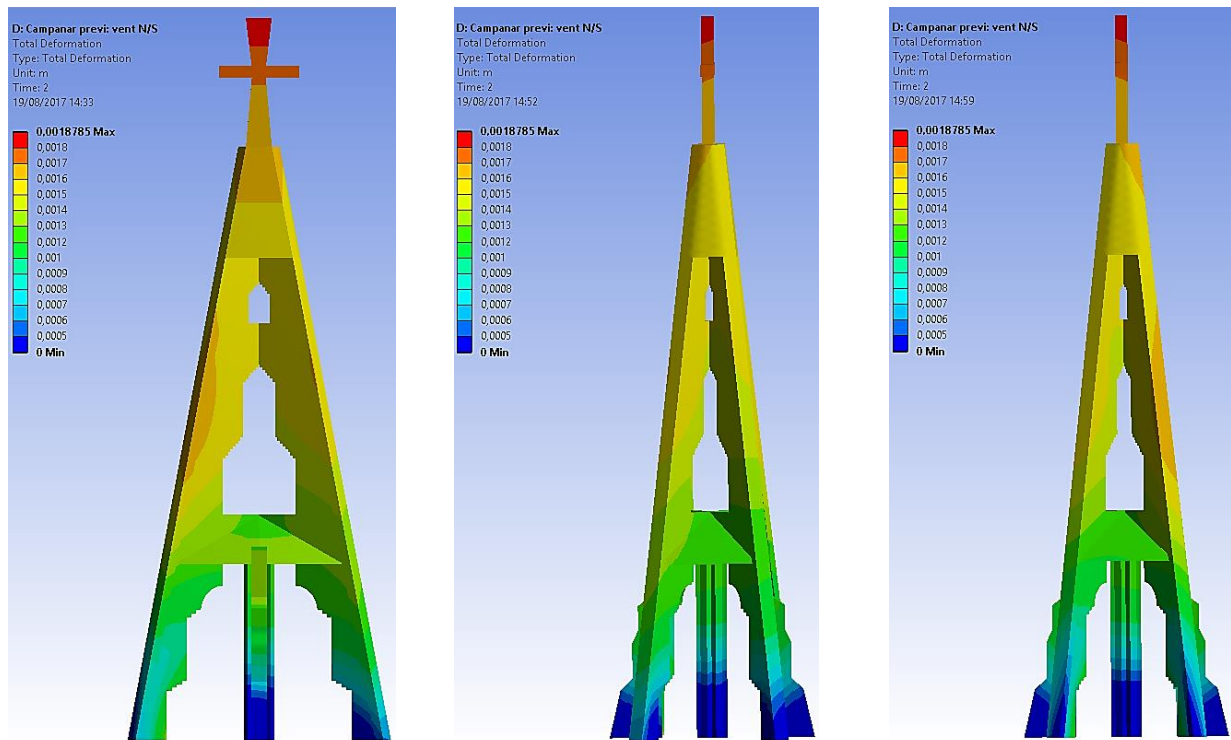


Figura 105: A l'esquerra, diagrama de deformació total a la cara A. Al centre, a la cara B. A la dreta, a la cara D.

A1.1.3.3.2 Eix X

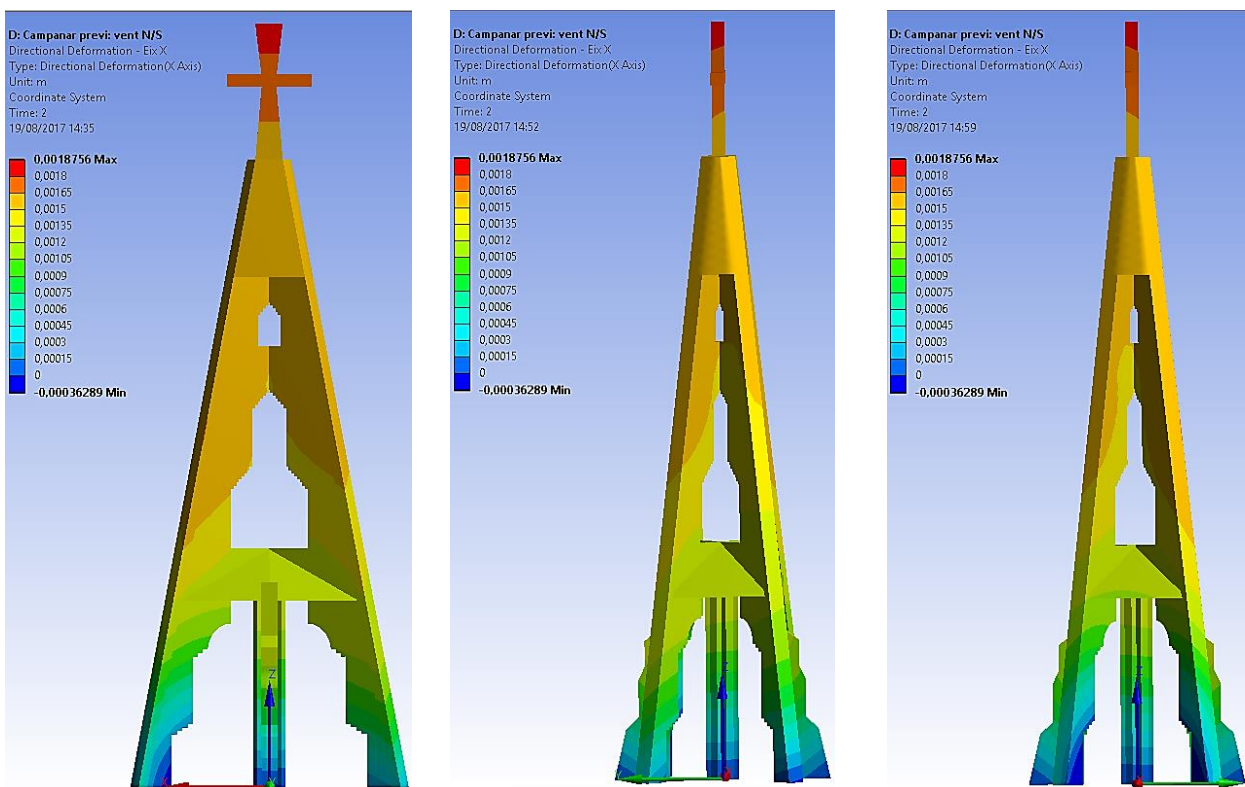


Figura 106: A l'esquerra, diagrama de deformació a l'eix X a la cara A. Al centre, a la cara B. A la dreta, a la cara D.

A1.1.3.3.3 Eix Y

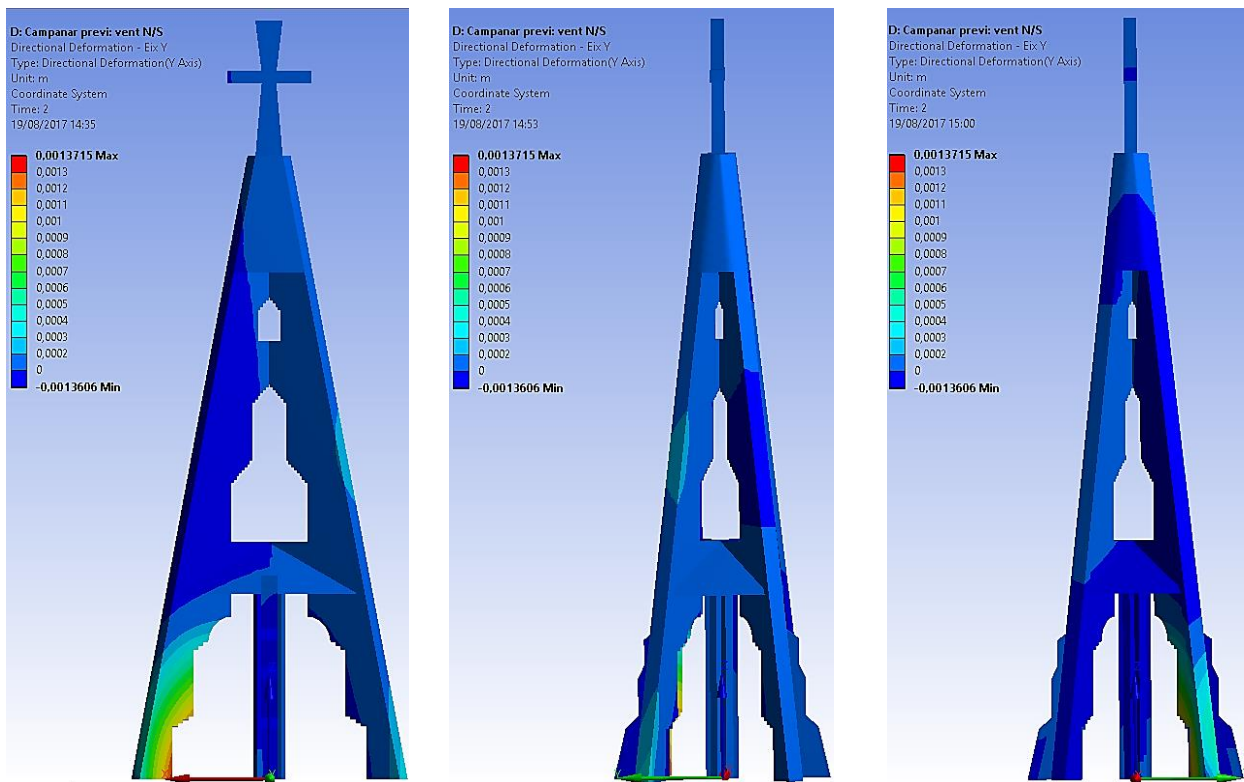


Figura 107: A l'esquerra, diagrama de deformació a l'eix Y a la cara A. Al centre, a la cara B.A la dreta, a la cara D.

A1.1.3.3.4 Eix Z

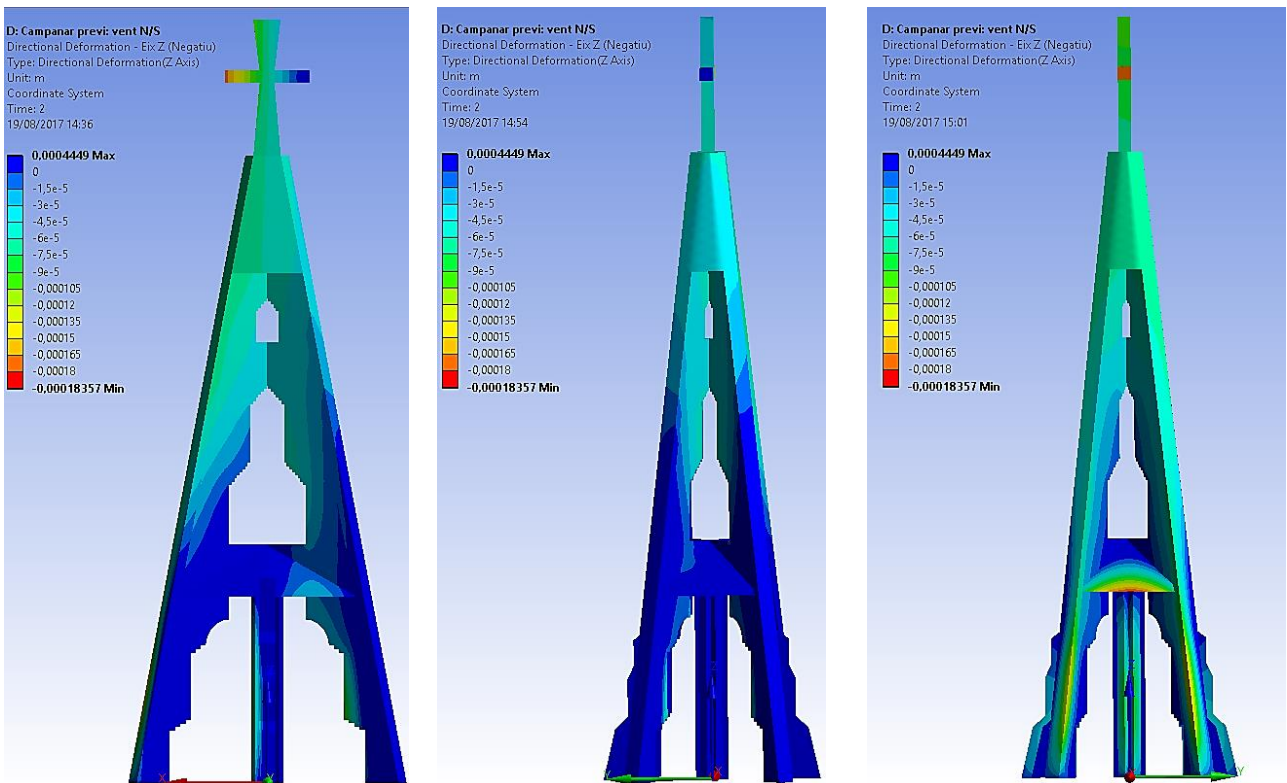


Figura 108: A l'esquerra, diagrama de deformació a l'eix Z positiu a la cara A. Al centre, a la cara B.A la dreta, a la cara D.

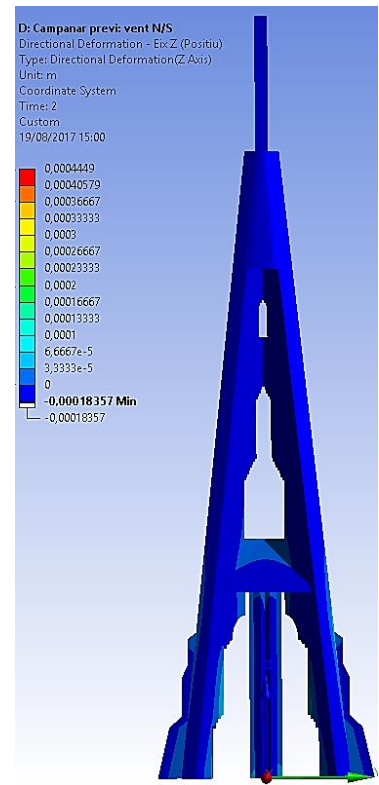
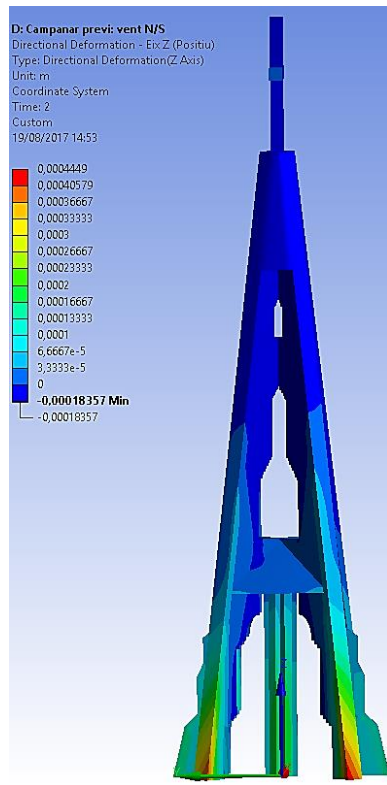
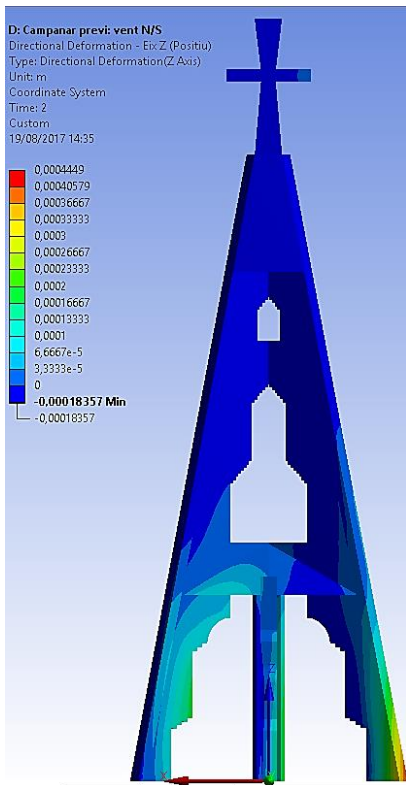


Figura 109:A l'esquerra, diagrama de deformació a l'eix Z negatiu a la cara A. Al centre, a la cara B.A la dreta,a la cara D.

A1.1.3.4 Coeficient de seguretat

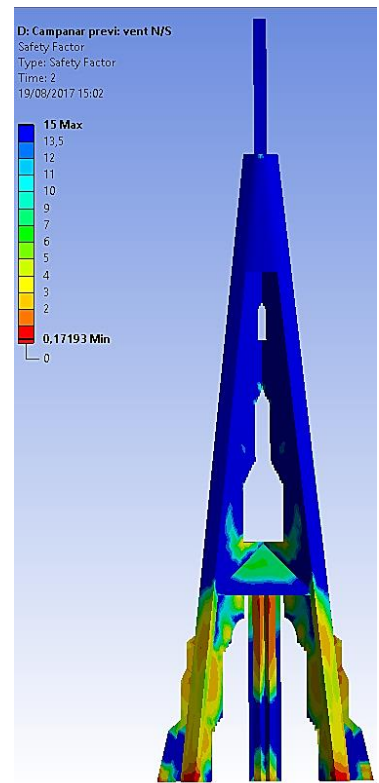
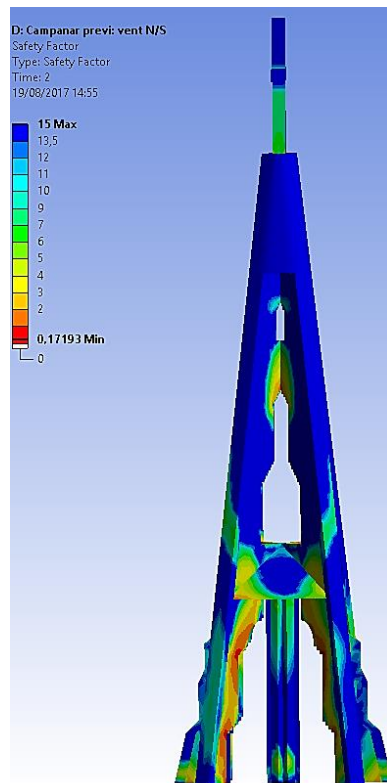
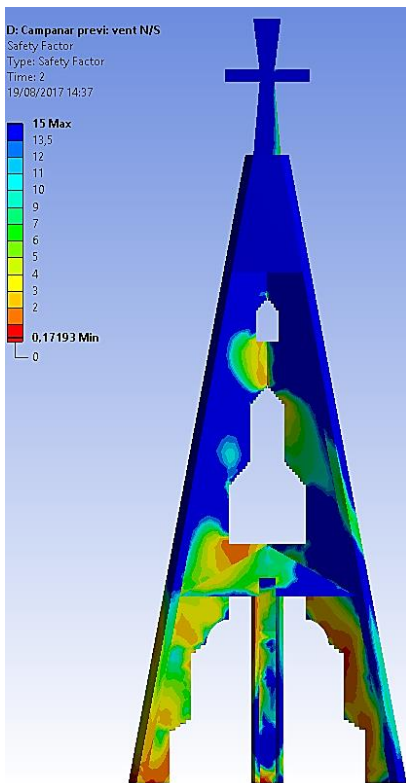


Figura 110:A l'esquerra, diagrama del coeficient de seguretat a la cara A. Al centre, a la cara B. A la dreta,a la cara D.

A1.2 Campanar tesat

A1.2.1 Pes propi

A1.2.1.1 Compressions màximes

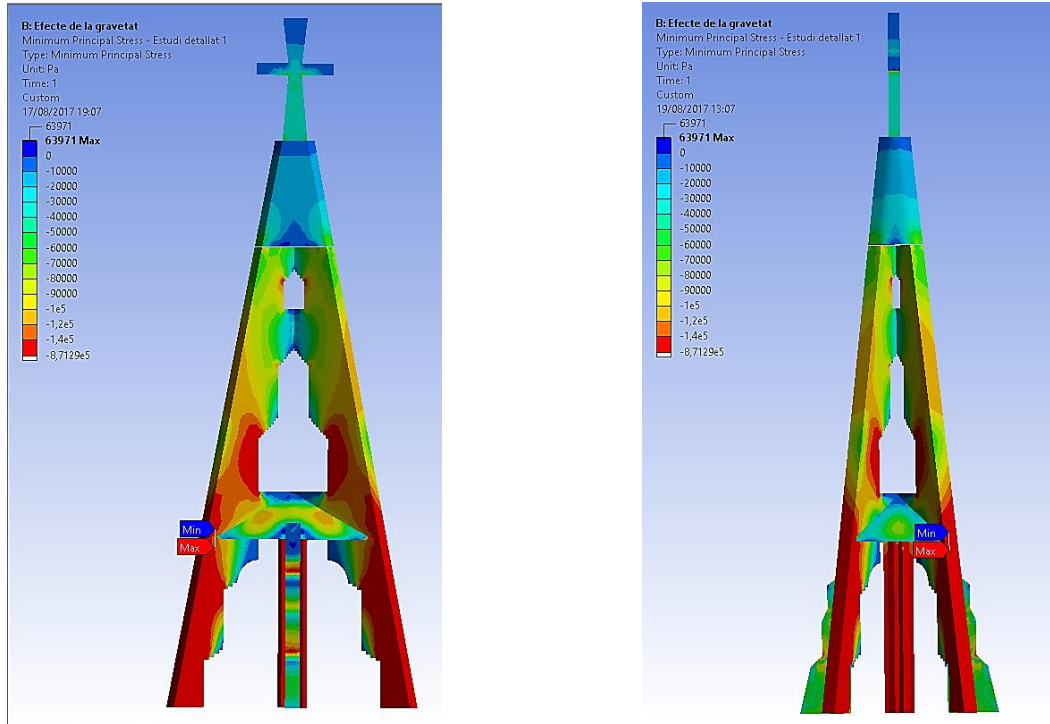


Figura 111: A l'esquerra, diagrama de compressions màximes a la cara A. A la dreta, a la cara B.

A1.2.1.2 Traccions màximes

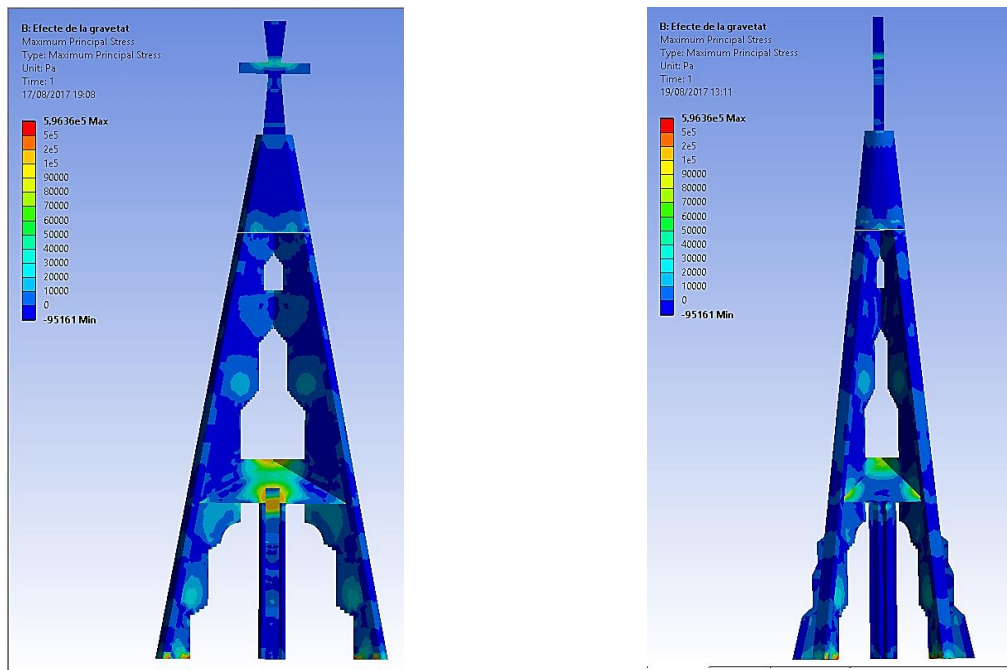


Figura 112: A l'esquerra, diagrama de traccions màximes a la cara A. A la dreta, a la cara B.

A1.2.1.3 Deformacions

A1.2.1.3.1 Total

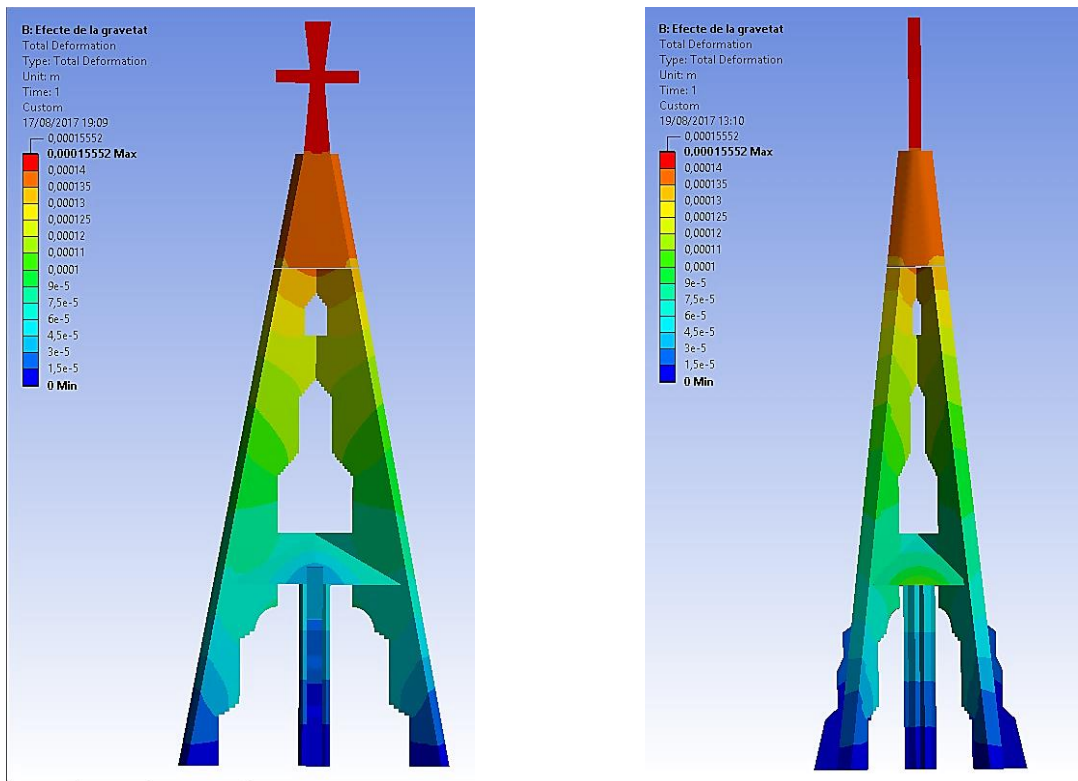


Figura 113: A l'esquerra, diagrama de deformació total a la cara A. A la dreta, a la cara B.

A1.2.1.3.2 Eix X

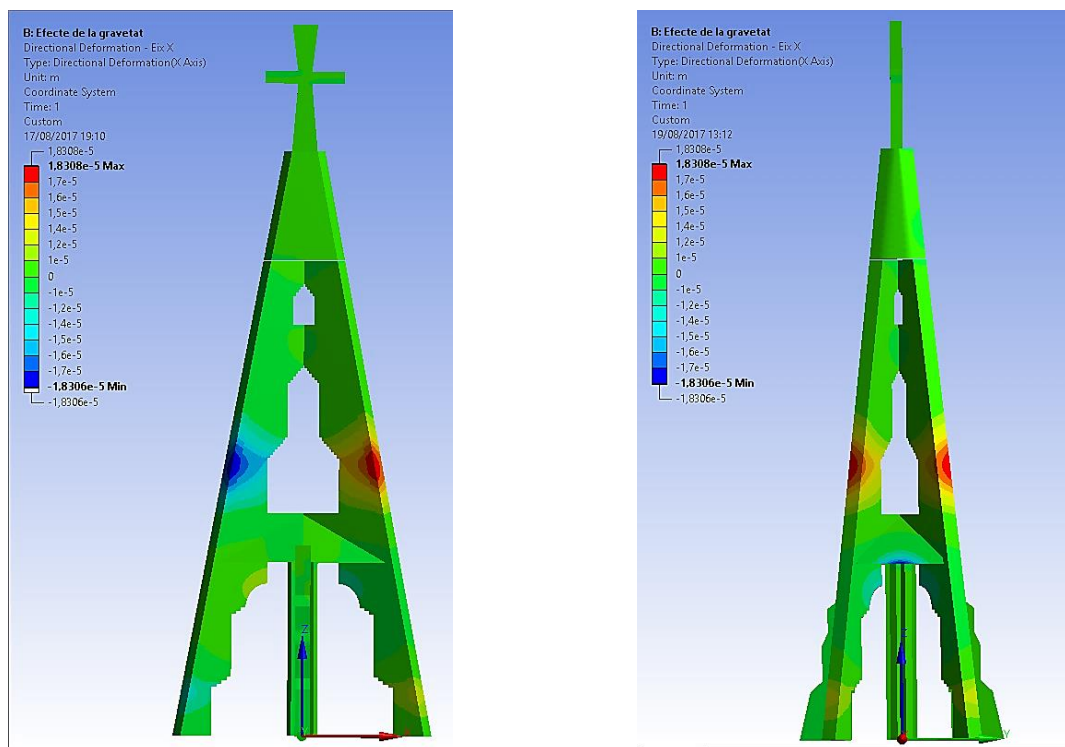


Figura 114: A l'esquerra, diagrama de deformació a l'eix X a la cara A. A la dreta, a la cara B.

A1.2.1.3.3 Eix Y

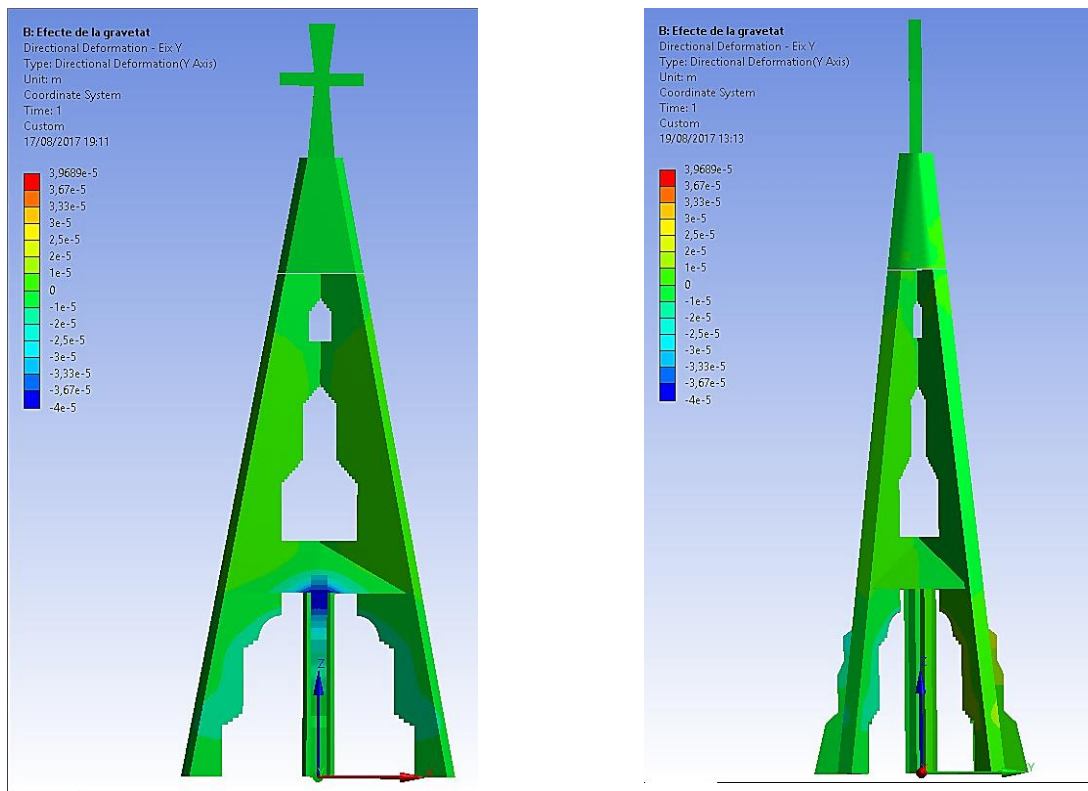


Figura 115: A l'esquerra, diagrama de deformació a l'eix Y a la cara A. A la dreta, a la cara B.

A1.2.1.3.4 Eix Z

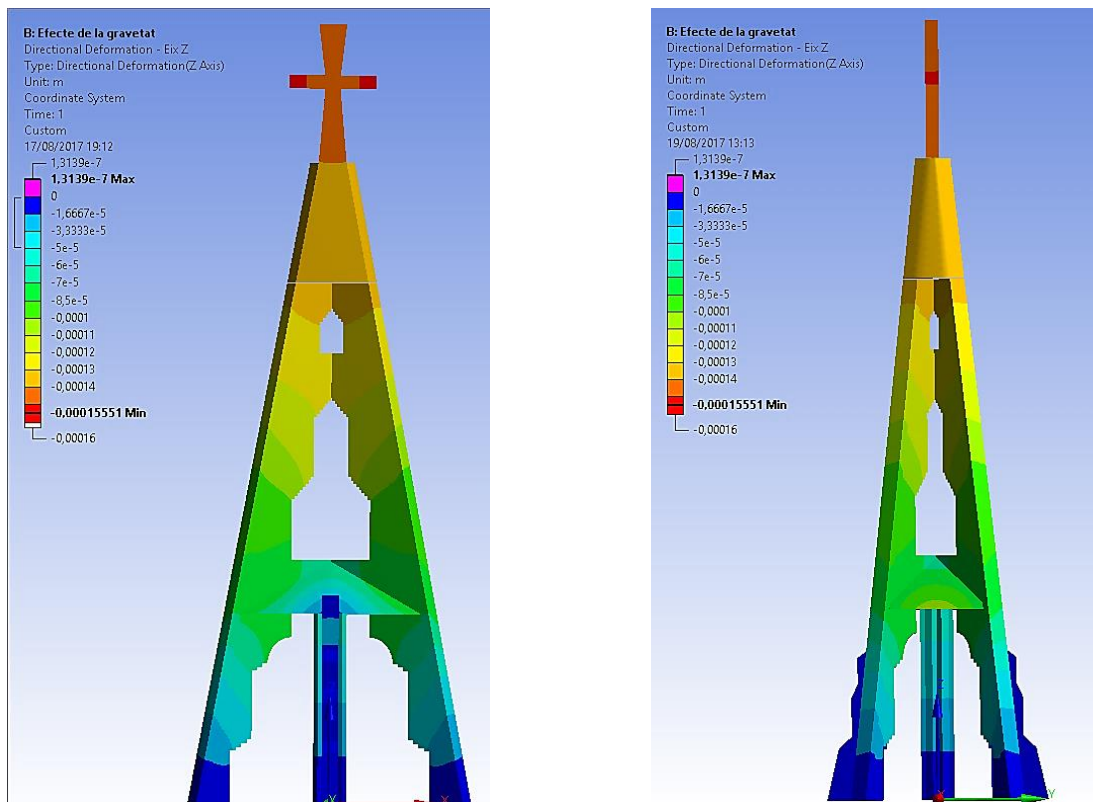


Figura 116: A l'esquerra, diagrama de deformació a l'eix Z a la cara A. A la dreta, a la cara B.

A1.2.1.4 Coeficient de seguretat

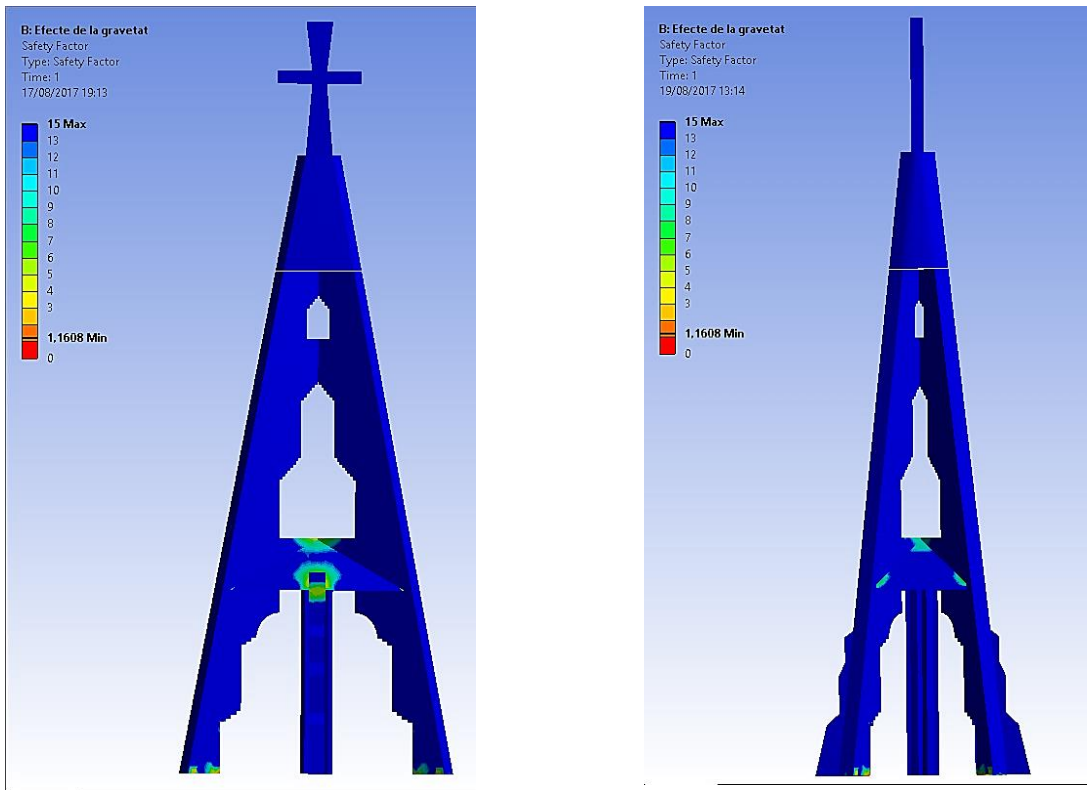


Figura 117: A l'esquerra, diagrama del coeficient de seguretat a la cara A. A l'esquerra, a la cara B.

A1.2.2 Pes propi + testat

A1.2.2.1 Compressions màximes

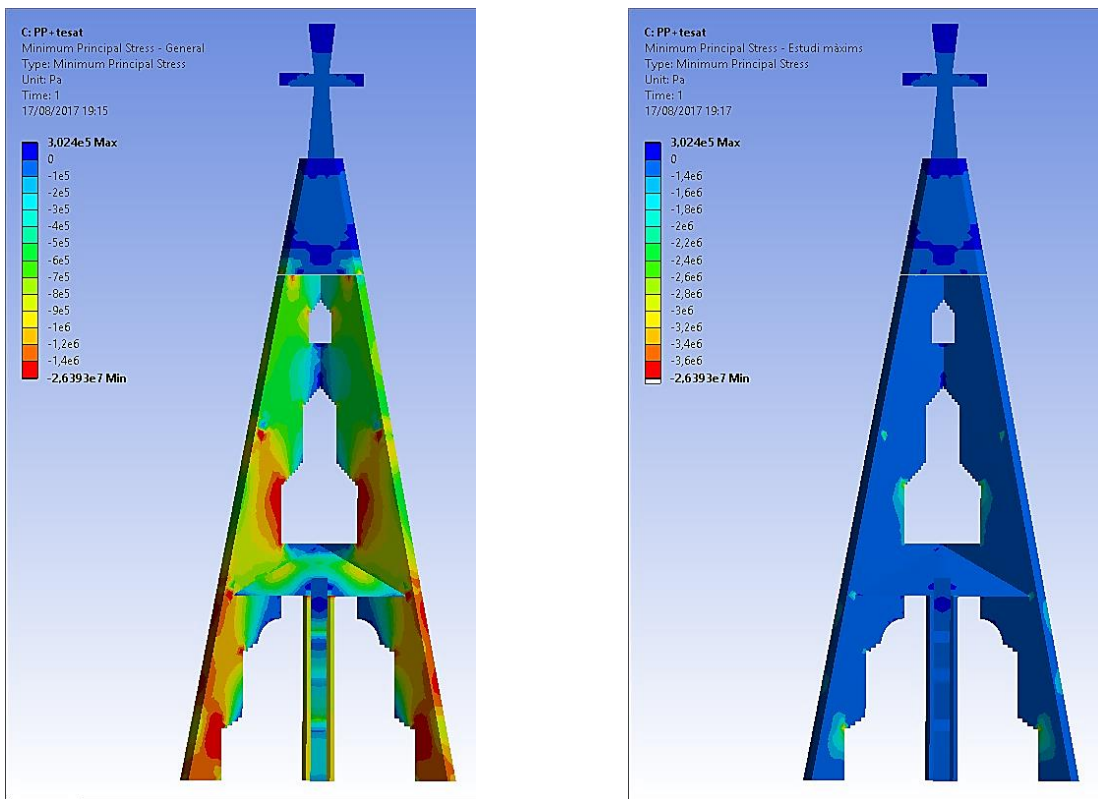


Figura 118: A l'esquerra, diagrama de compressions màximes a la cara A. A la dreta, estudi de màxims.

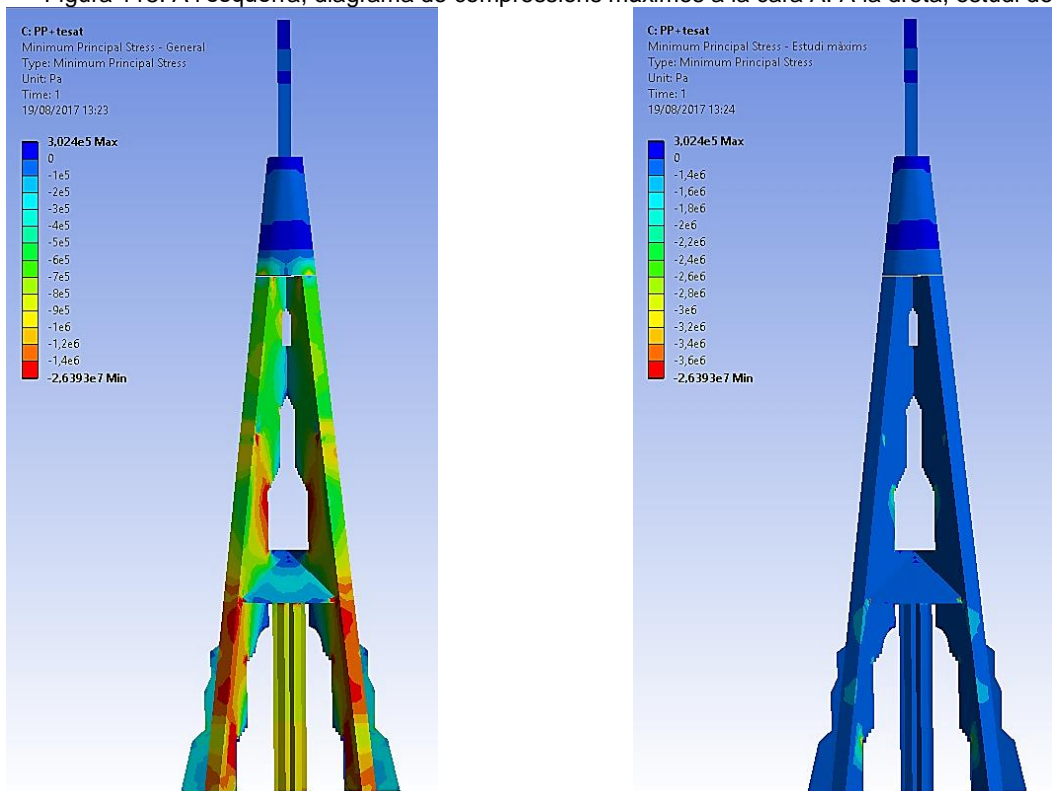


Figura 119: A l'esquerra, diagrama de compressions màximes a la cara B. A la dreta, estudi de màxims.

A1.2.2.2 Traccions màximes

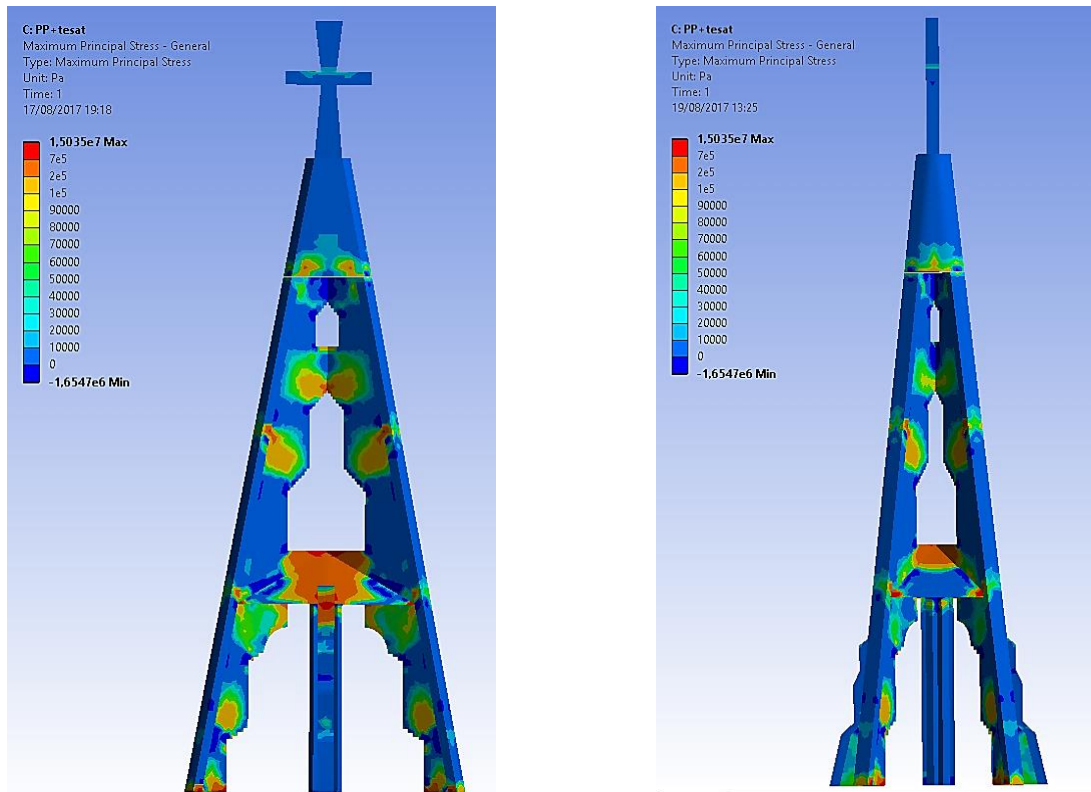


Figura 120: A l'esquerra, diagrama de traccions màximes a la cara A. A la dreta, a la cara B.

A1.2.2.3 Deformacions

A1.2.2.3.1 Total

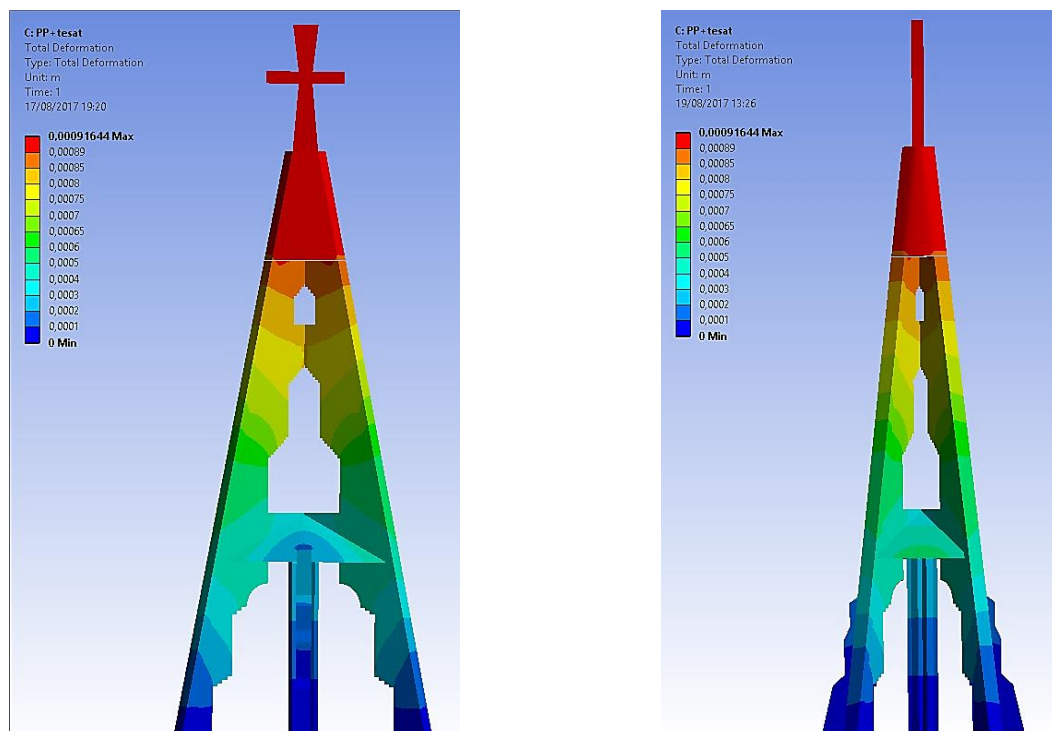


Figura 121: A l'esquerra, diagrama de deformació total a la cara A. A la dreta, a la cara B.

A1.2.2.3.2 Eix X

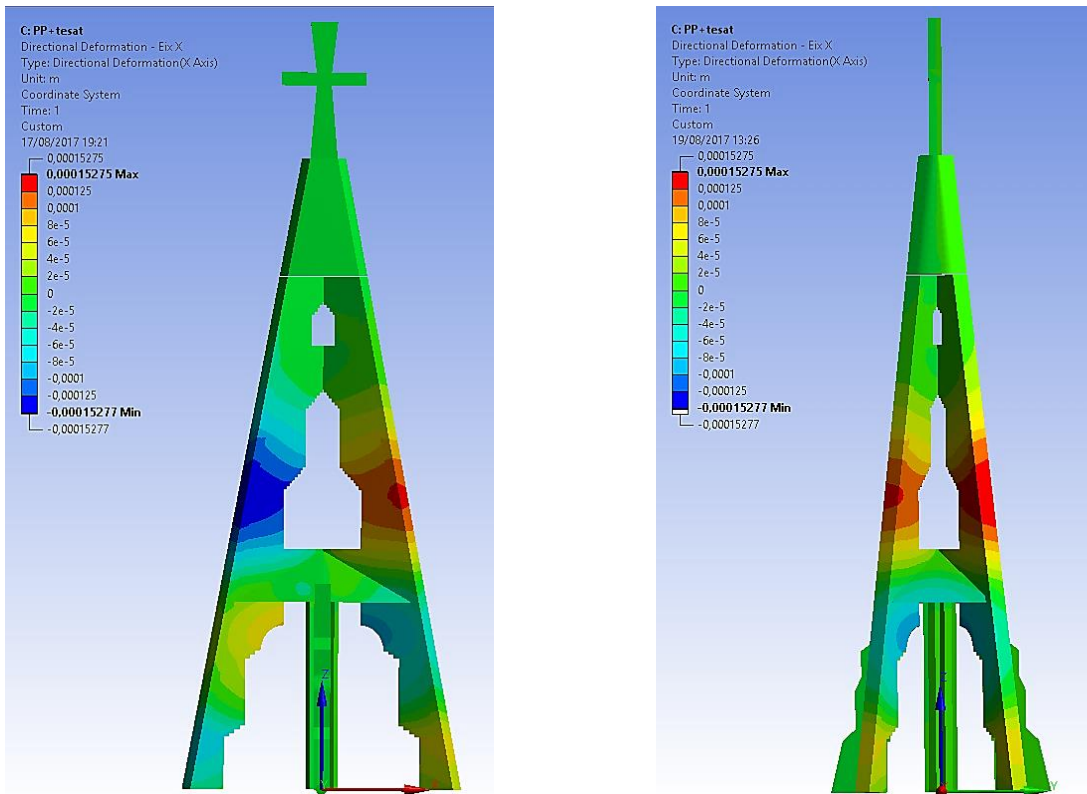


Figura 122: A l'esquerra, diagrama de deformació a l'eix X a la cara A. A la dreta, a la cara B.

A1.2.2.3.3 Eix Y

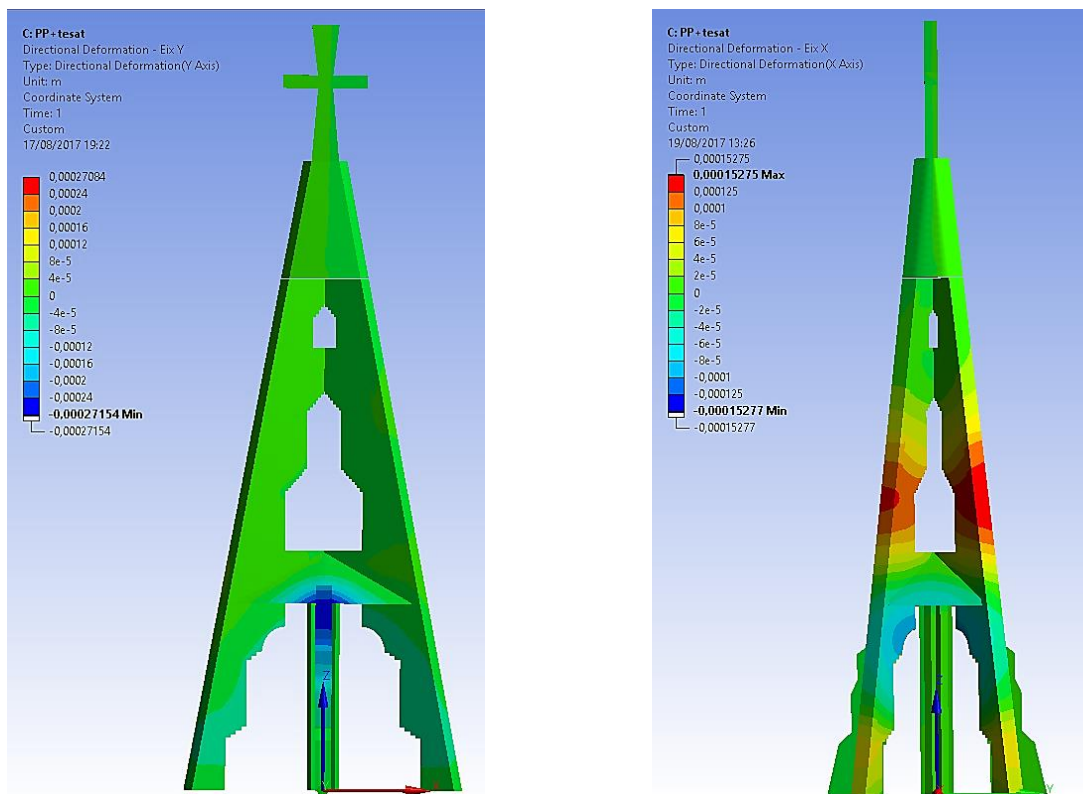


Figura 123: A l'esquerra, diagrama de deformació l'eix Y a la cara A. A la dreta, a la cara B.

A1.2.2.3.4 Eix Z

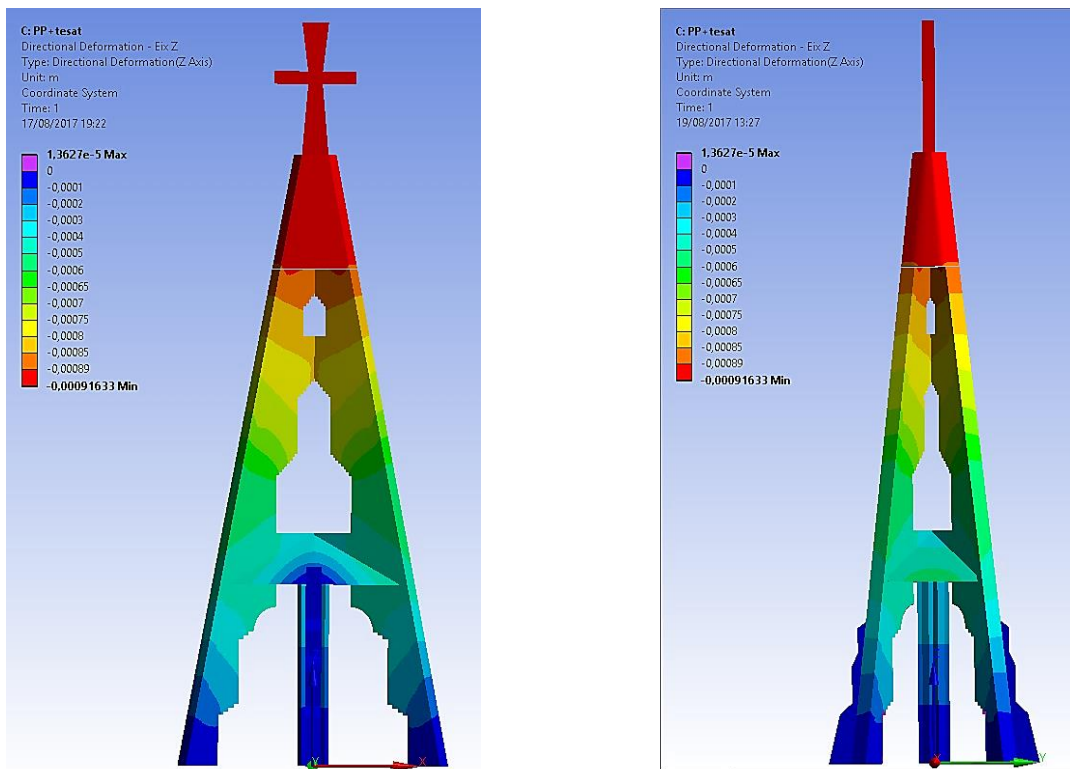


Figura 124: A l'esquerra, diagrama de deformació l'eix Z a la cara A. A la dreta, a la cara B.

A1.2.2.4 Coeficient de seguretat

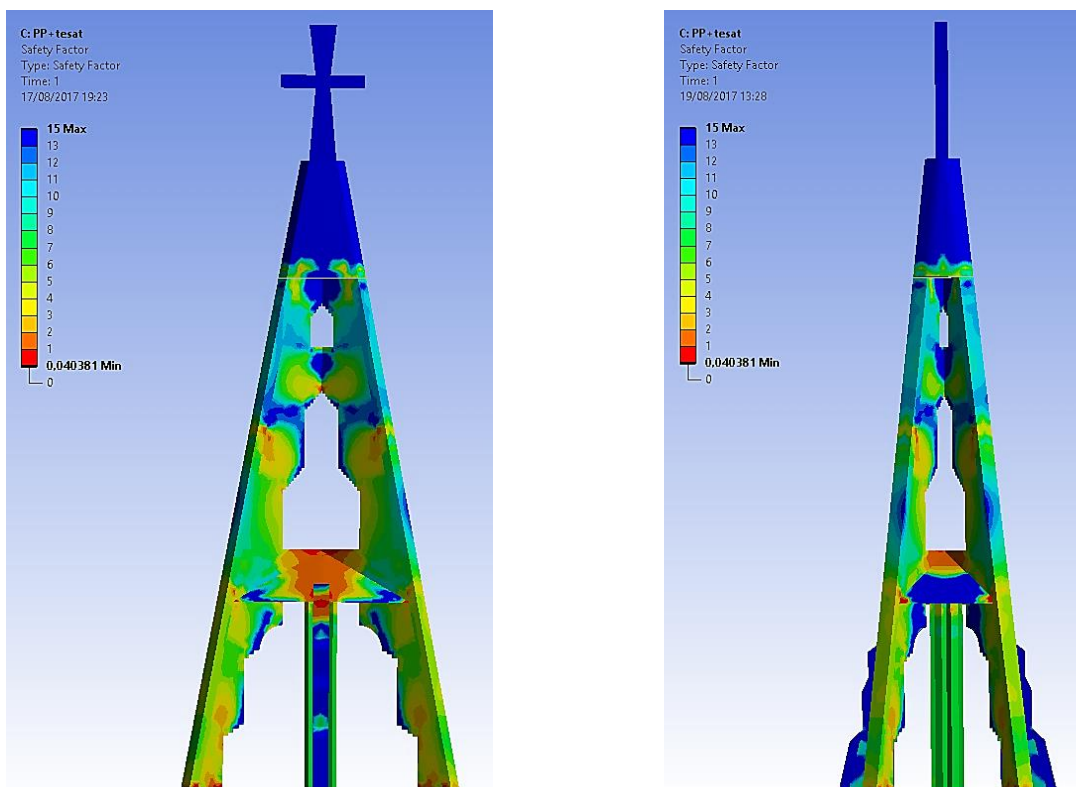


Figura 125: A l'esquerra, diagrama del coeficient de seguretat a la cara A. A l'esquerra, a la cara B.

A1.2.3 Pes propi + tesat + vent O/E

A1.2.3.1 Compressions màximes

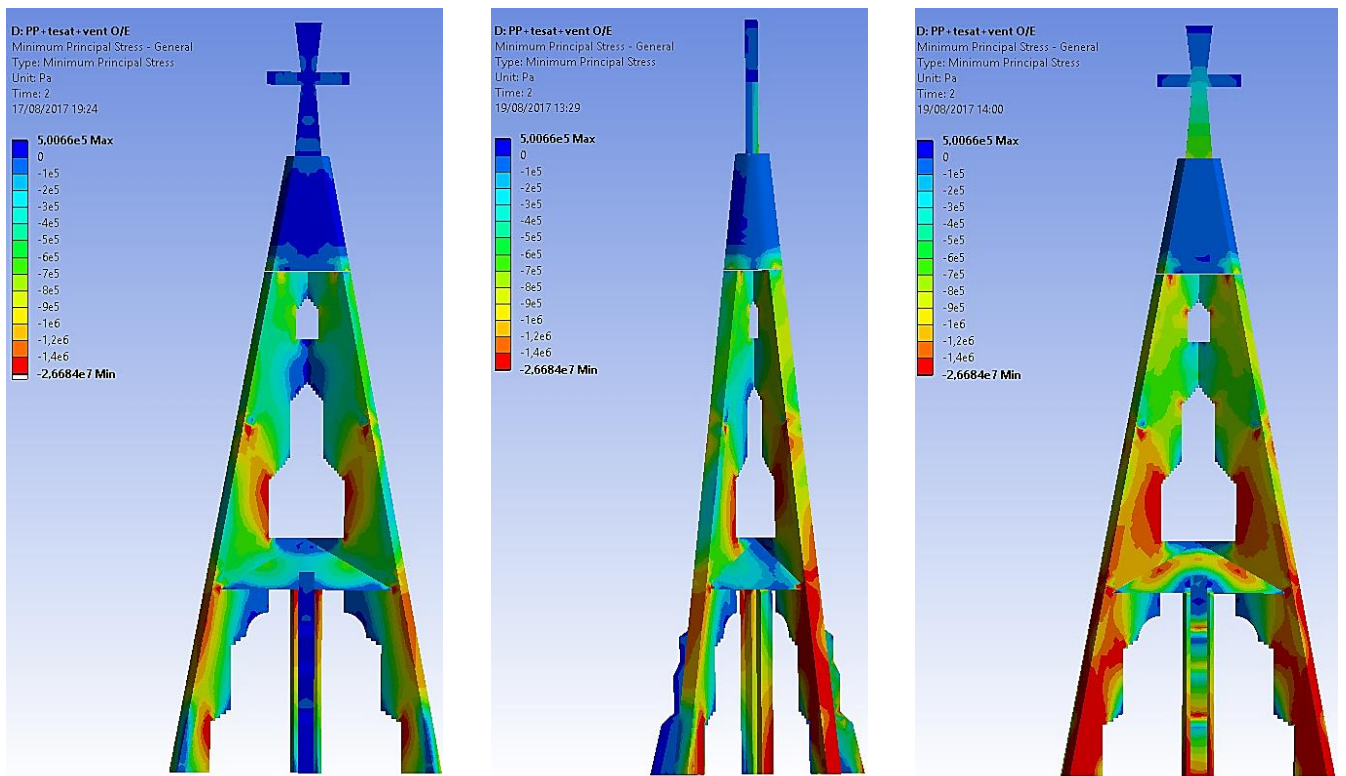


Figura 126: A l'esquerra, diagrama de compressions màximes a la cara A. Al centre, a la cara B. A la dreta, a la cara C.

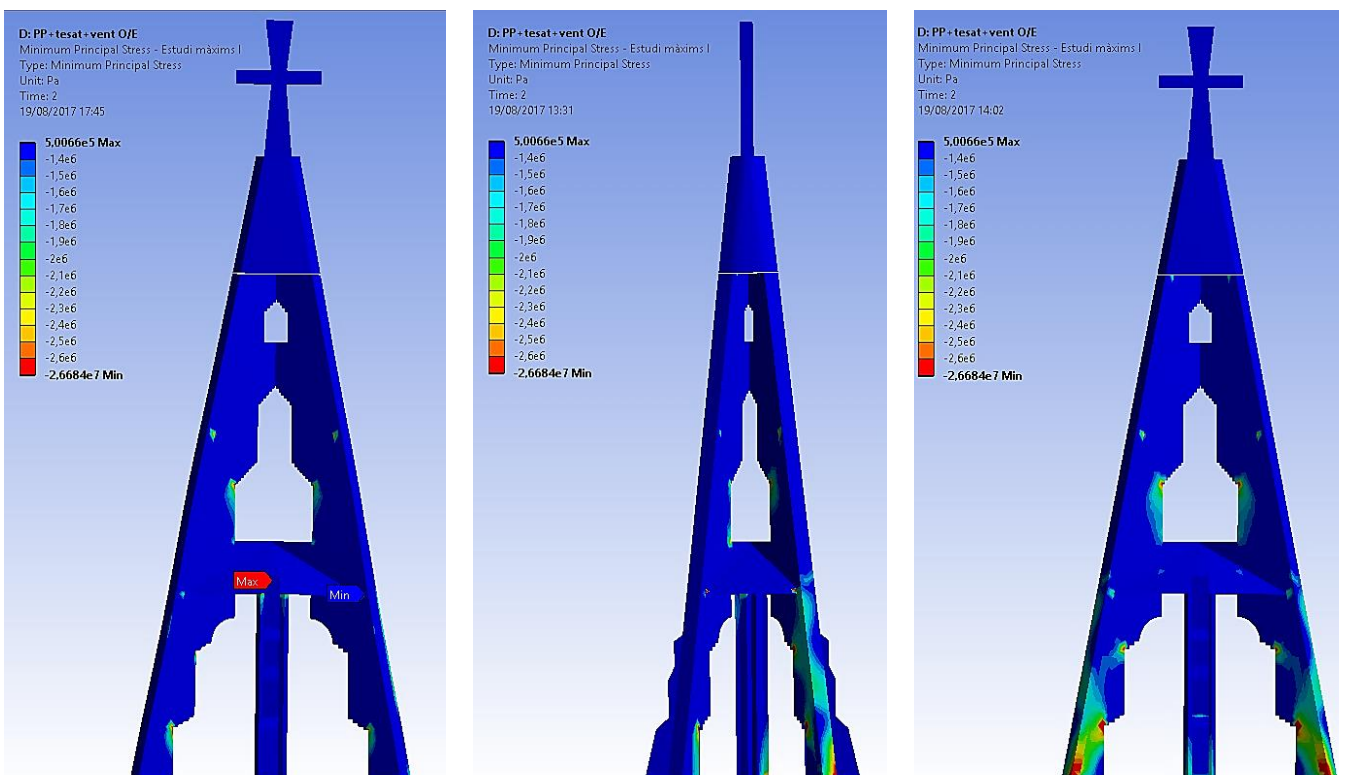


Figura 127: A l'esquerra, estudi de màxims de les compressions a la cara A. Al centre, a la cara B. A la dreta, a la cara C.

A1.2.3.2 Traccions màximes

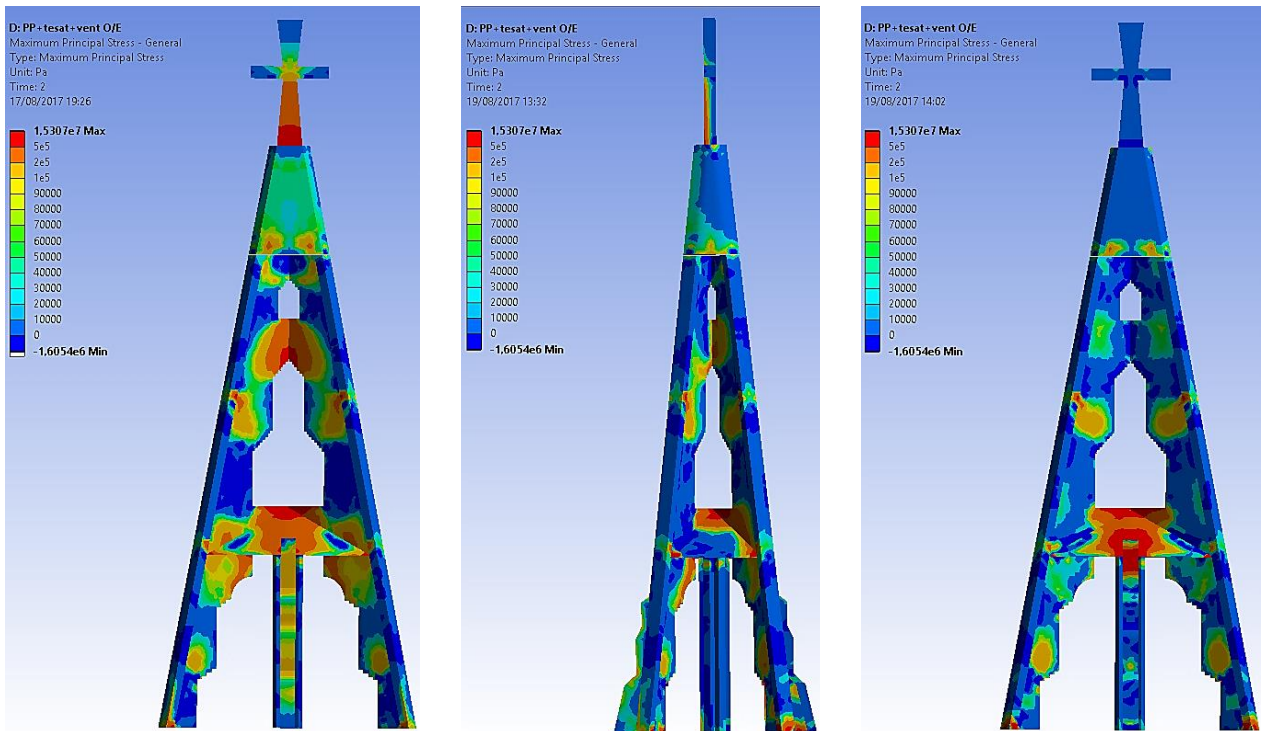


Figura 128: A l'esquerra, diagrama de traccions màximes a la cara A. Al centre, a la cara B. A la dreta, a la cara C.

A1.2.3.3 Deformacions

A1.2.3.3.1 Total

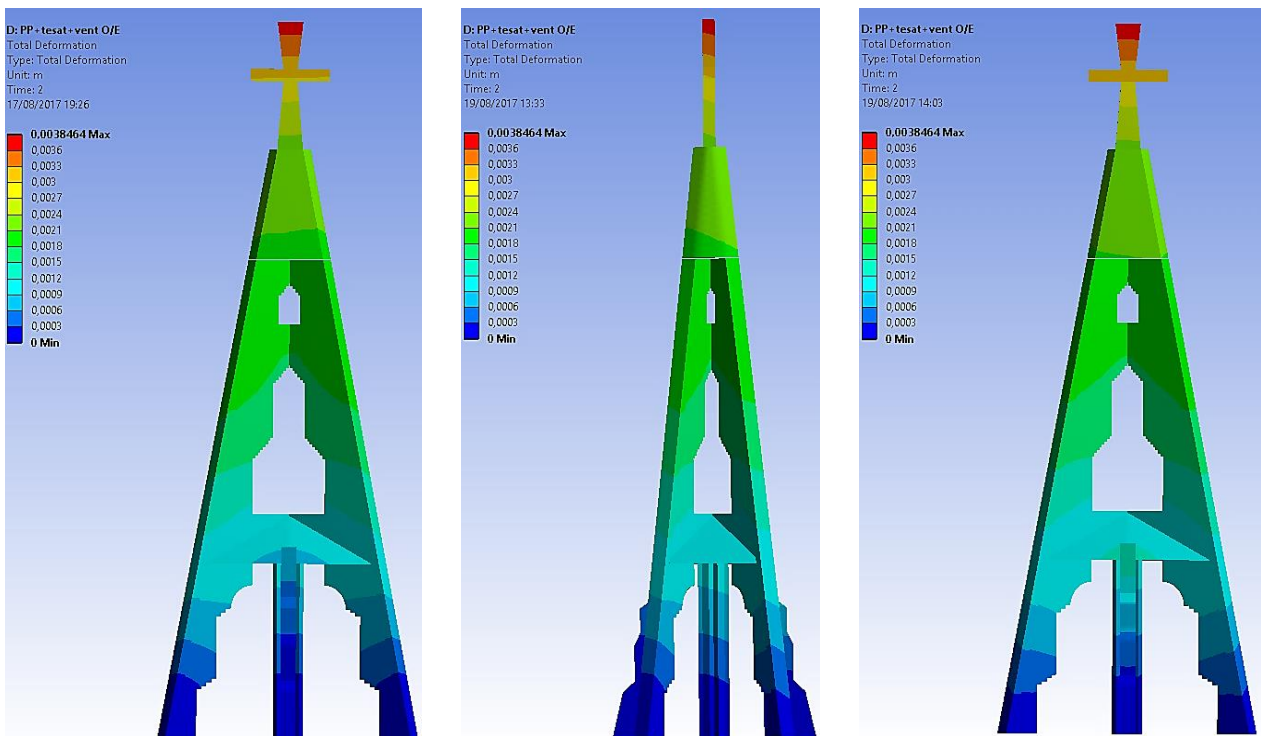


Figura 129: A l'esquerra, diagrama de deformació total a la cara A. Al centre, a la cara B. A la dreta, a la cara C.

A1.2.3.3.2 Eix X

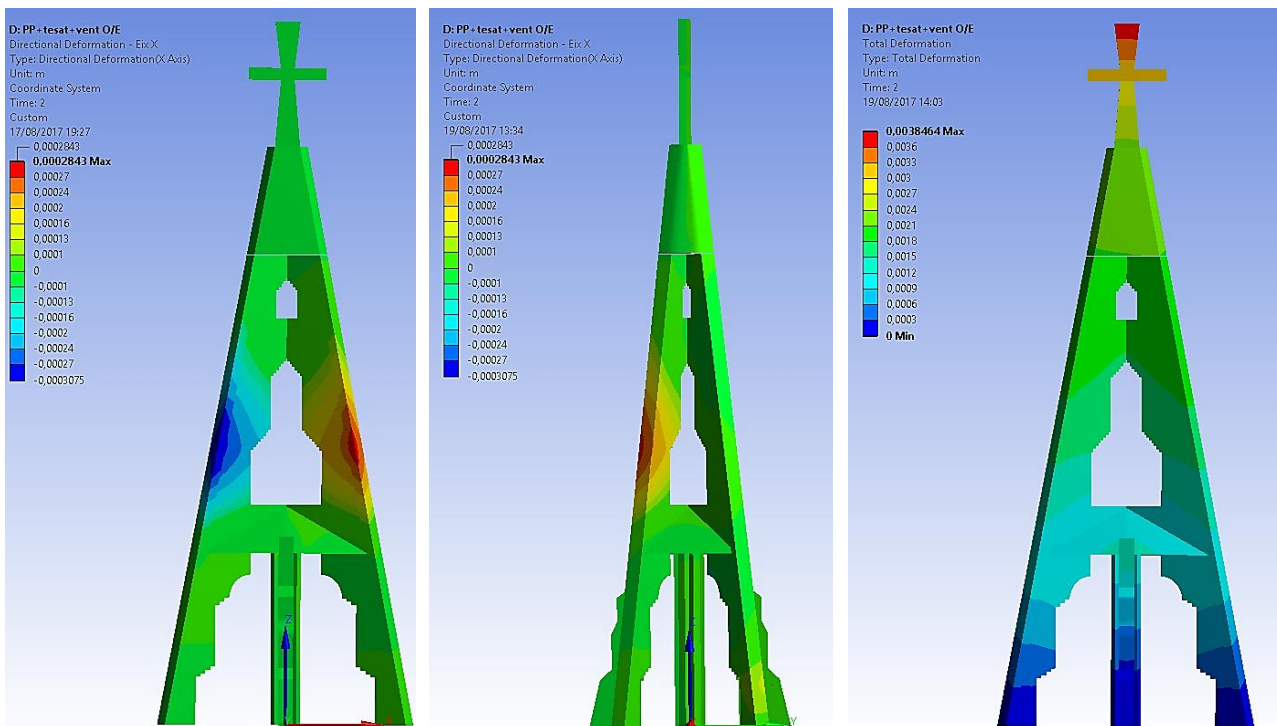


Figura 130: A l'esquerra, diagrama de deformació a l'eix X a la cara A. Al centre, a la cara B. A la dreta, a la cara C.

A1.2.3.3.3 Eix Y

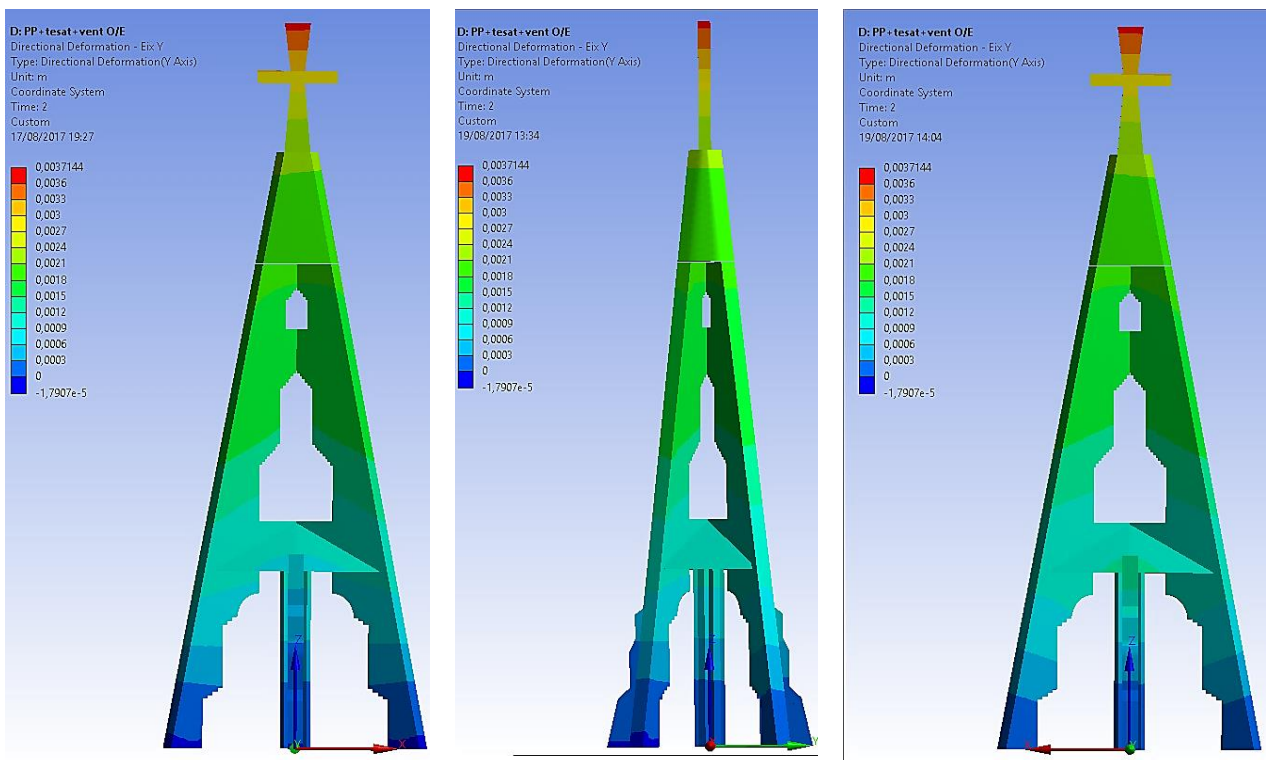


Figura 131: A l'esquerra, diagrama de deformació a l'eix Y a la cara A. Al centre, a la cara B. A la dreta, a la cara C.

A1.2.3.3.4 Eix Z

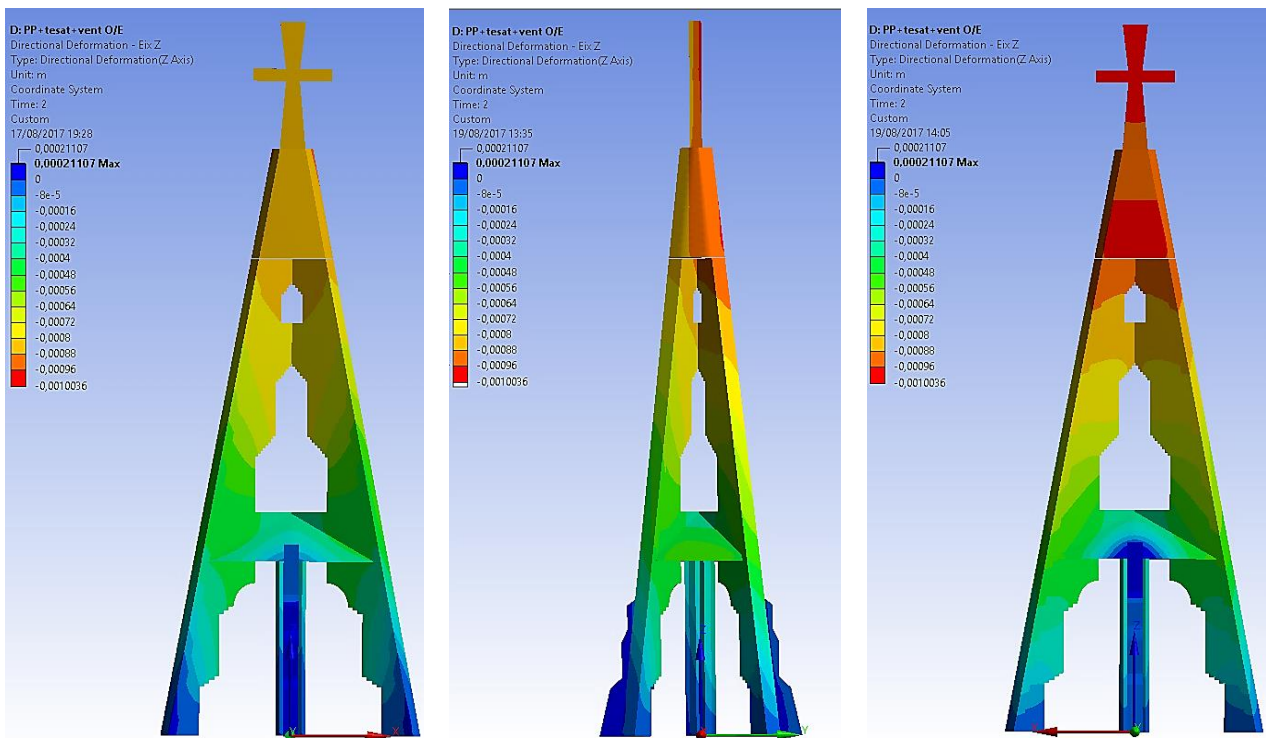


Figura 132: A l'esquerra, diagrama de deformació a l'eix Z a la cara A. Al centre, a la cara B. A la dreta, a la cara C.

A1.2.3.4 Coeficient de seguretat

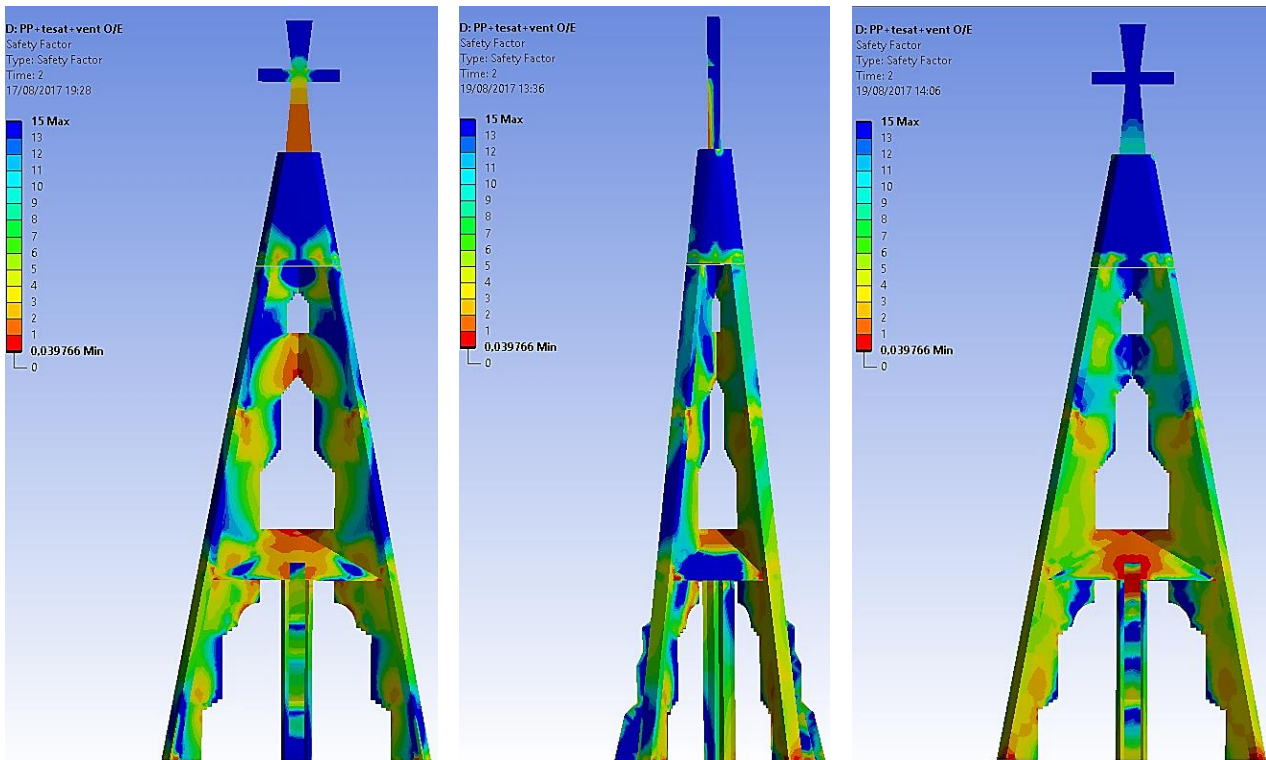


Figura 133: A l'esquerra, diagrama del coeficient de seguretat a la cara A. Al centre, a la cara B. A la dreta, a la cara C.

A1.2.4 Pes propi + tesat + vent N/S

A1.2.4.1 Compressions màximes

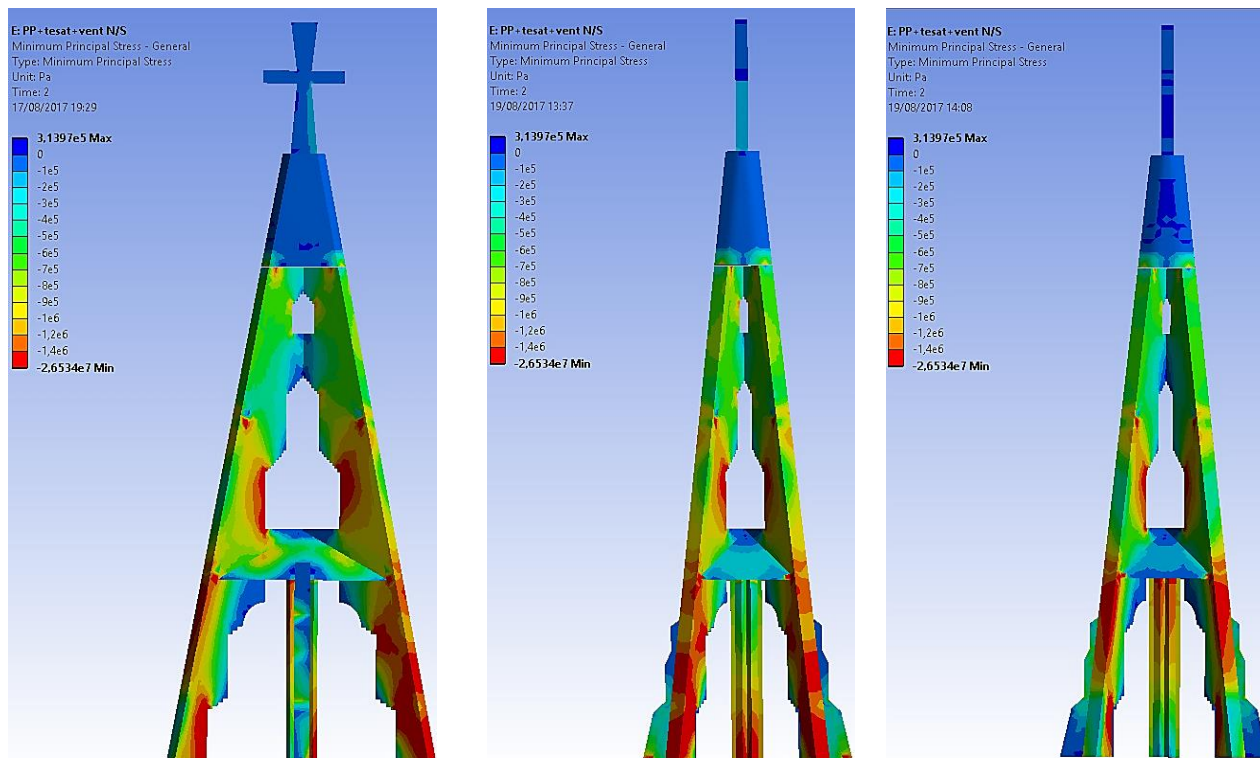


Figura 134:A l'esquerra, diagrama de compressions màximes a la cara A. Al centre, a la cara B. A la dreta, a la cara D

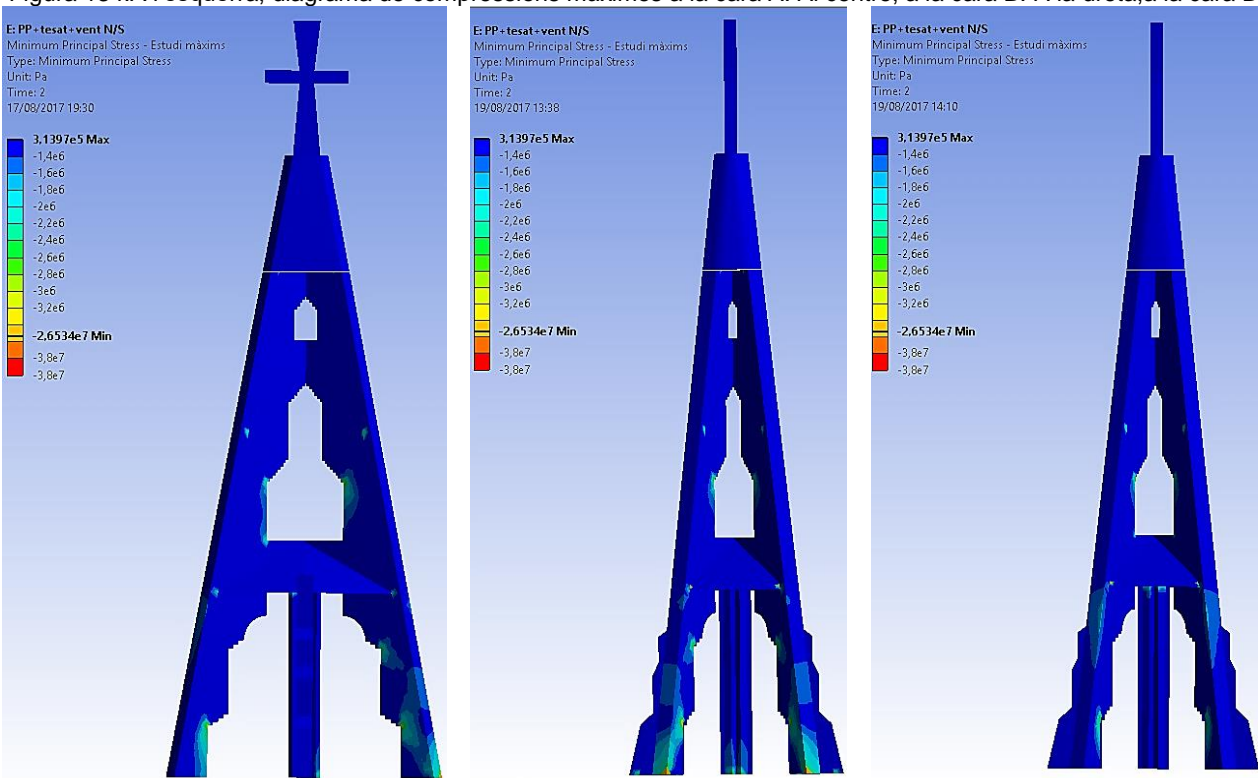


Figura 135:A l'esquerra, estudi de màxims de les compressions a la cara A. Al centre, a la cara B. A la dreta, a la cara D

A1.2.4.2 Traccions màximes

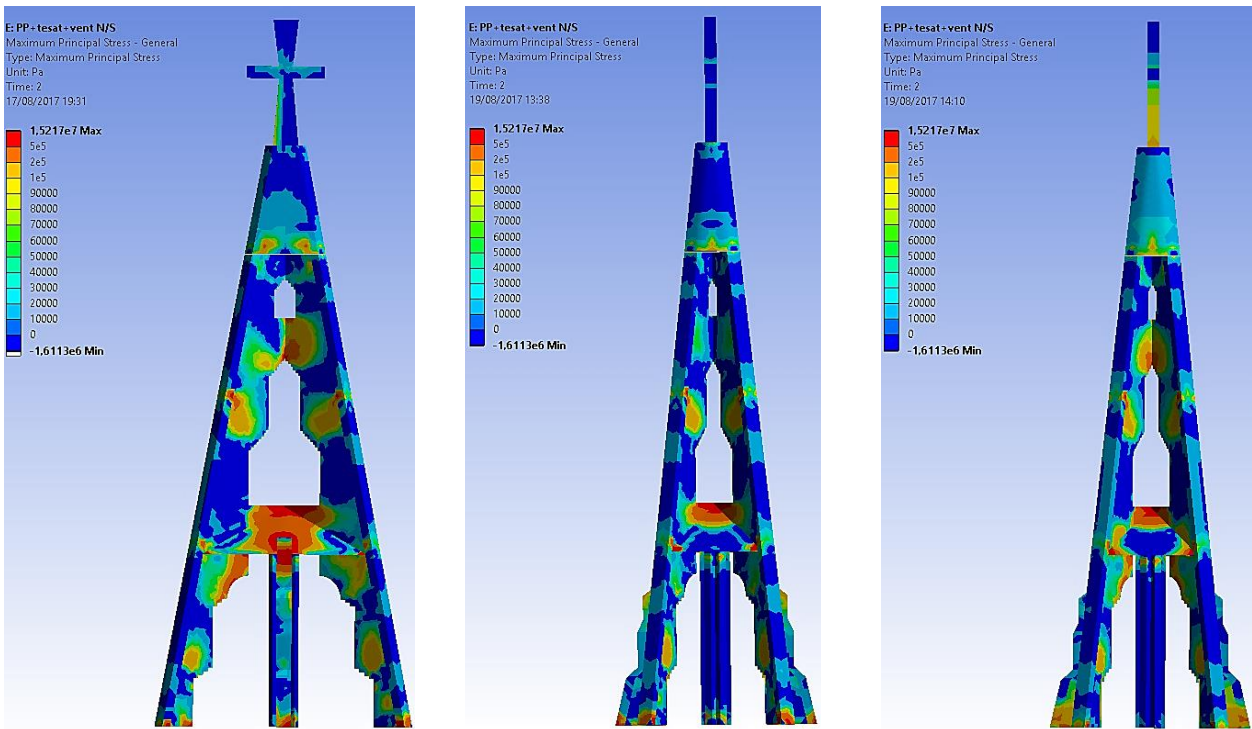


Figura 136: A l'esquerra, diagrama de traccions màximes a la cara A. Al centre, a la cara B. A la dreta, a la cara D.

A1.2.4.3 Deformacions

A1.2.4.3.1 Total

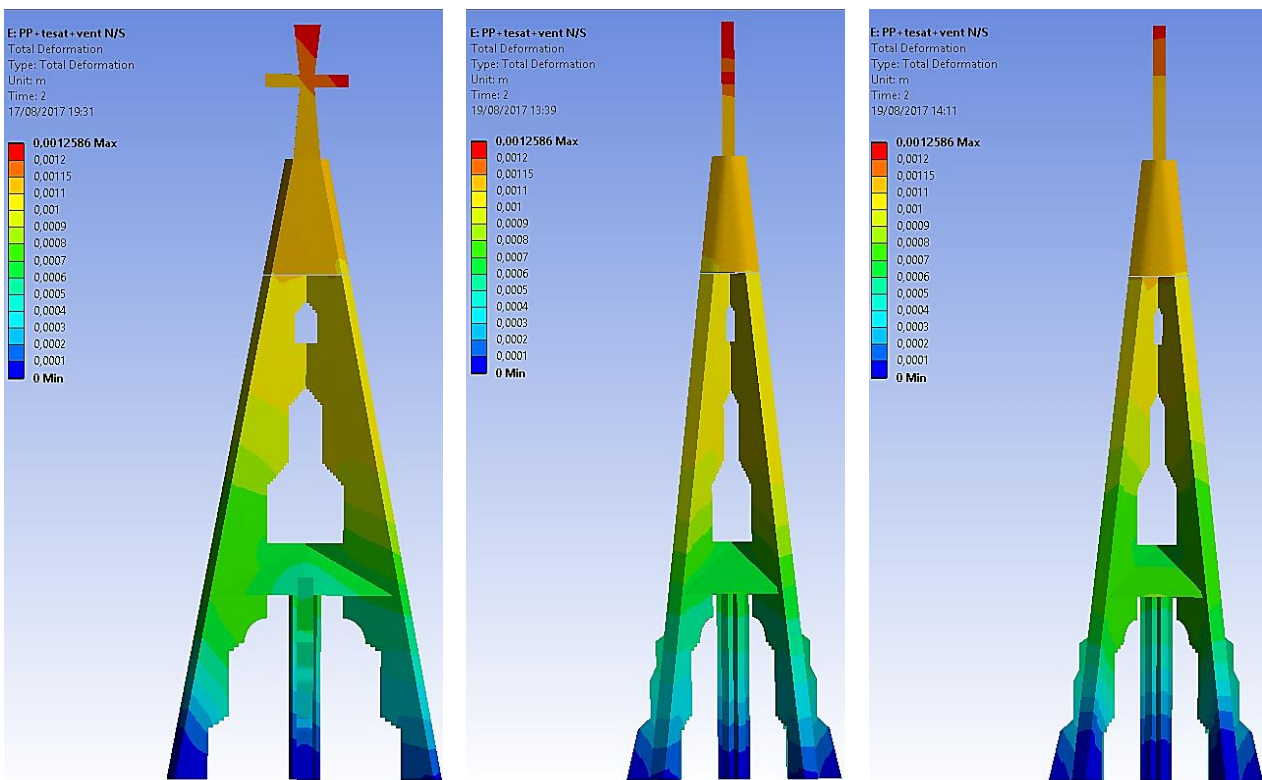


Figura 137: A l'esquerra, diagrama de deformació total a la cara A. Al centre, a la cara B. A la dreta, a la cara D.

A1.2.4.3.2 Eix X

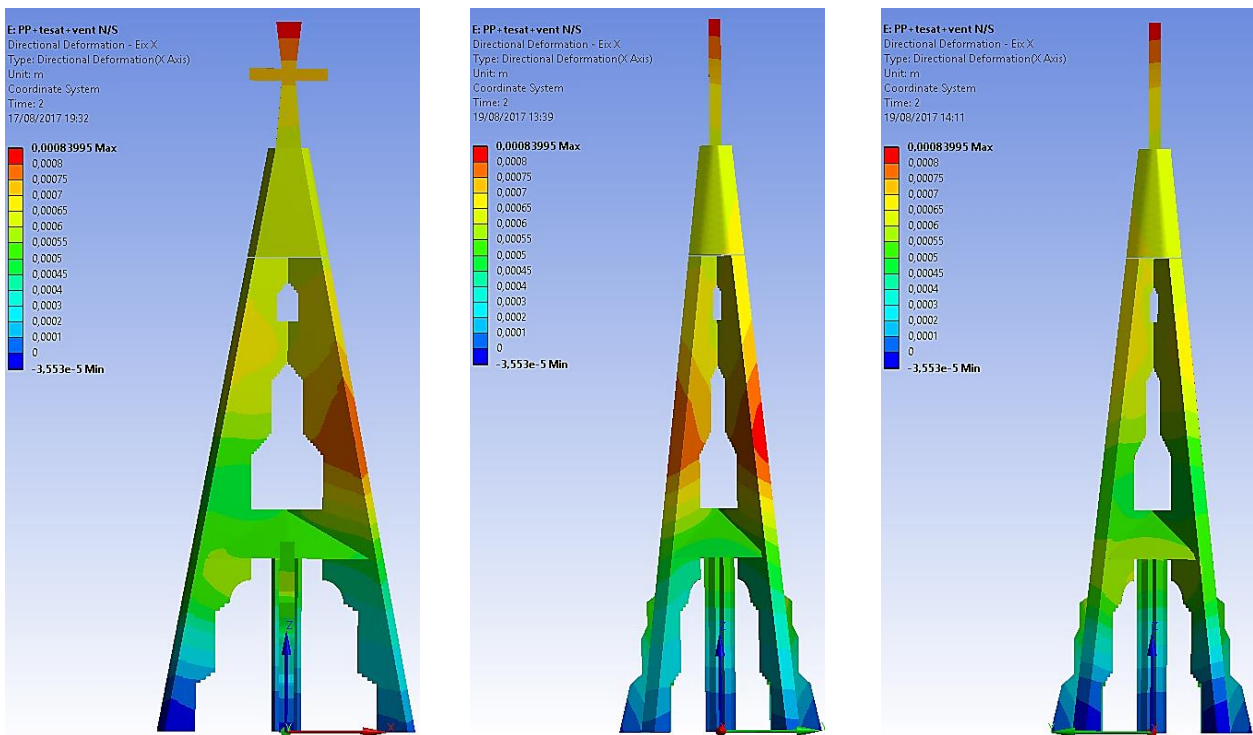


Figura 138: A l'esquerra, diagrama de deformació a l'eix X a la cara A. Al centre, a la cara B. A la dreta, a la cara D.

A1.2.4.3.3 Eix Y

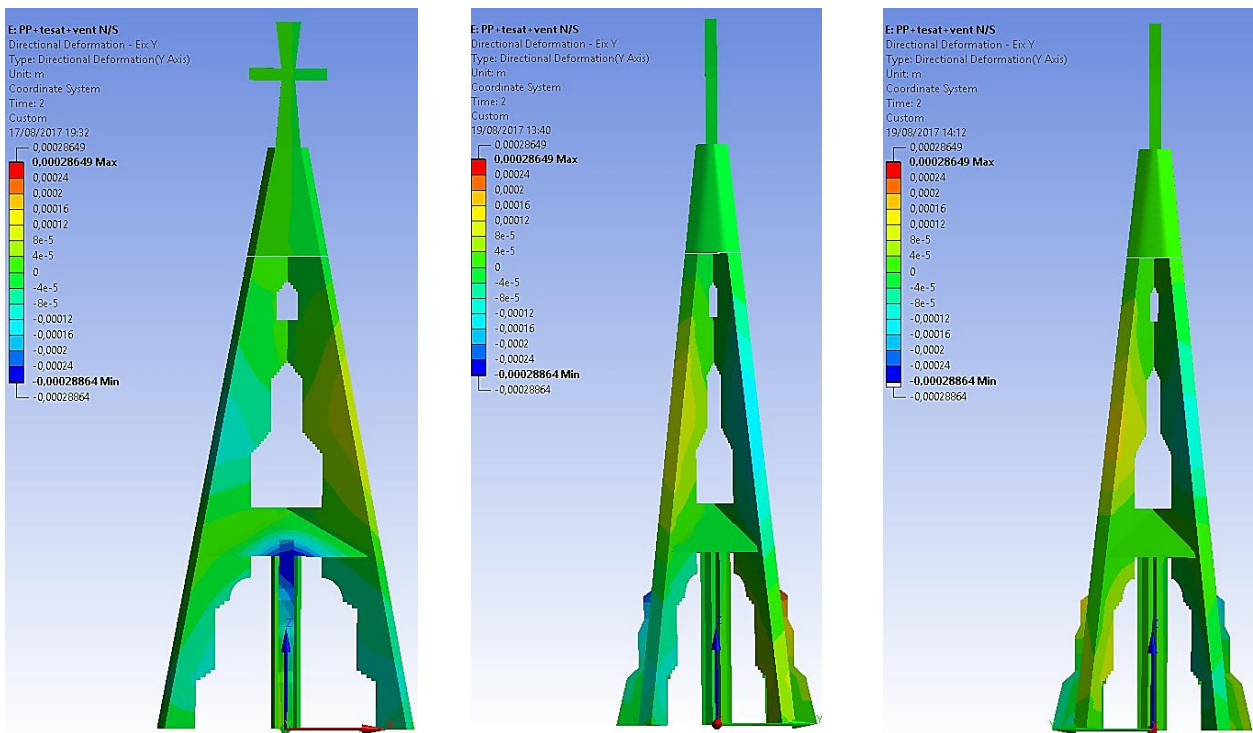


Figura 139: A l'esquerra, diagrama de deformació a l'eix Y a la cara A. Al centre, a la cara B. A la dreta, a la cara D.

A1.2.4.3.4 Eix Z

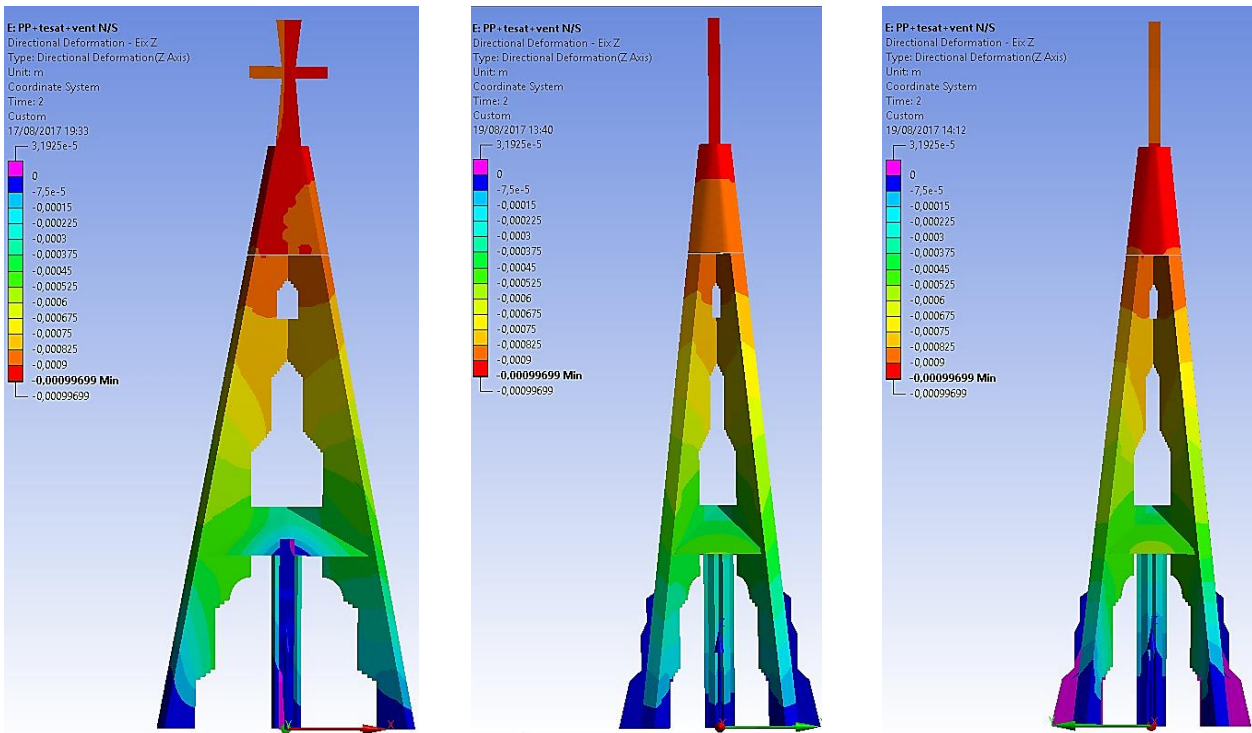


Figura 140: A l'esquerra, diagrama de deformació a l'eix Z a la cara A. Al centre, a la cara B. A la dreta, a la cara D.

A1.2.4.4 Coeficient de seguretat

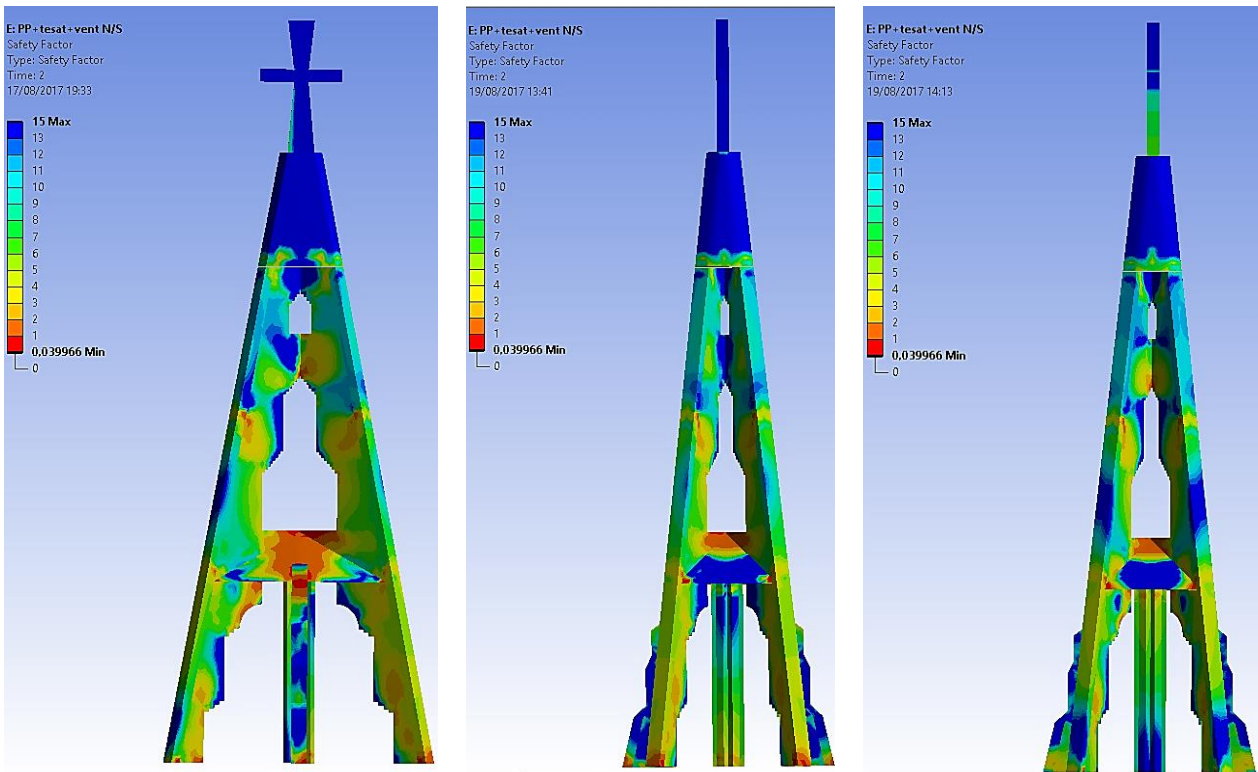


Figura 141: A l'esquerra, diagrama del coeficient de seguretat a la cara A. Al centre, a la cara B. A la dreta, a la cara D.

Annex 2. Documentació gràfica utilitzada⁽¹⁾

⁽¹⁾ La informació d'aquest annex està íntegrament extreta del projecte tècnic *Projecte de restauració de l'Església del Sagrat Cor de Vistabella*, amb l'autorització explícita de l'arquitecte redactor Santi Prats i Rocavert.

PLANTA BAIXA (superfície útil)

Nau Central:	104,60 m ²
Presbiteri:	21,23 m ²
Capella de la Mare de Déu:	4,61 m ²
Capella del Sant Crist:	7,29 m ²
Confessionari:	10,53 m ²
Escala:	2,66 m ²
Baptisteri:	3,37 m ²
Pòrtic d'Entrada:	16,53 m ²
Sagristia:	18,11 m ²
Pati de Ventilació:	1,75 m ²
Magatzem:	20,04 m ²
Cambra Higienica:	1,08 m ²

Total Planta Baixa: 211,80 m²

PLANTA COR (superfície útil)

Cor Oest:	14,51 m ²
Escala:	2,10 m ²
Cor Sud-Oest:	11,39 m ²

Total Planta Cor: 28,00 m²

TOTAL SUPERFÍCIE ÚTIL: 239,80 m²

PLANTA COBERTA (projecció en planta)

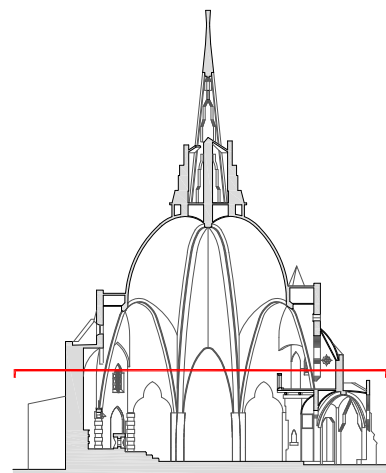
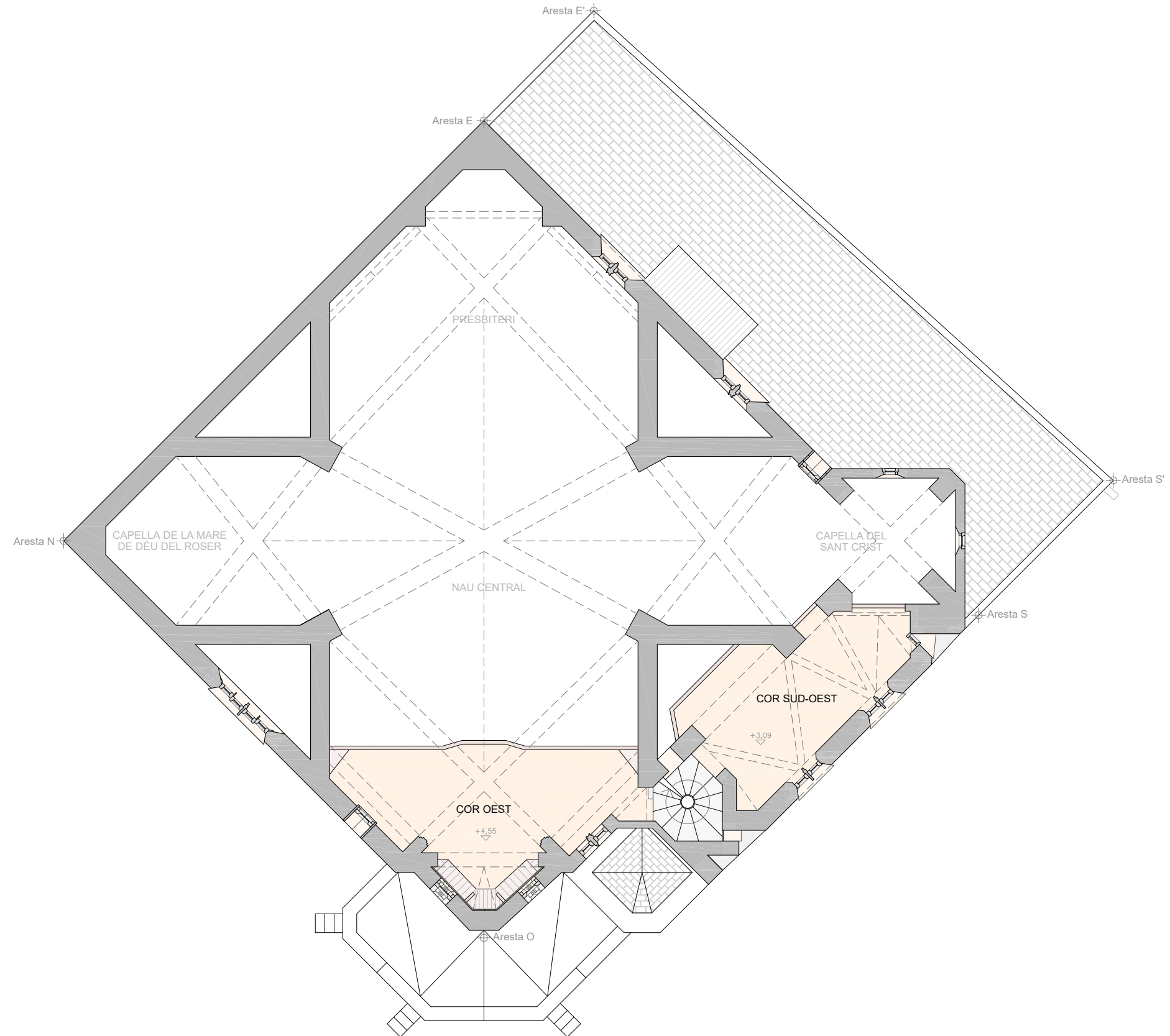
Cos principal (església):	198,43 m ²
Cos secundari (sagristia i magat.):	50,95 m ²

Total projecció en planta: 249,38 m²

Superfície construïda planta baixa: 249,38 m²

Superfície construïda planta cor: 63,26 m²

TOTAL SUPERF. CONSTRUÏDA: 312,64 m²



Projecte Bàsic i D'Execució
 Restauració de l'Església del Sagrat Cor de Vistabella
 Església del Sagrat Cor de Vistabella
 Municipi: La Secuita - 43765
 Arquitectes: PRATS I ROCAVERT, SANTIAGO

Clients: ARQUEBISBAT DE TARRAGONA

Hash: WMIIMBI40Jsk5y/0BBaWZB2TA=
 Hash COAC: z9r0g6UQZIKhVnNZAus70eewLg=
 Ref. COAC: 2015601421-23391-01

Col·legi d'Arquitectes de Catalunya

Visat: 2015601421

Data: 29-12-2015

DGA 03

PLANTA COR
 ESTAT ACTUAL

0 1 2

DIN A3 E: 1/100
 DIN A1 E: 1/50

PROJECTE

BÀSIC I EXECUTIU
 RESTAURACIÓ DE
 L'ESGLÉSIA DEL SAGRAT COR
 DE VISTABELLA

LA SECUITA, TARRAGONA
 DESEMBRE 2015

CLIENT

ARQUEBISBAT DE
 TARRAGONA
 ESGLÉSIA DE VISTABELLA

Pl. del Dr. GASPÀ BLANCH
 VISTABELLA
 LA SECUITA, TARRAGONA

ARQUITECTE

SANTI PRATS I ROCAVERT

PLANTA BAIXA (superfície útil)

- Nau Central: 104,60 m²
- Presbiteri: 21,23 m²
- Capella de la Mare de Déu: 4,61 m²
- Capella del Sant Crist: 7,29 m²
- Confessionari: 10,53 m²
- Escala: 2,66 m²
- Baptisteri: 3,37 m²
- Pòrtic d'Entrada: 16,53 m²
- Sagristia: 18,11 m²
- Pati de Ventilació: 1,75 m²
- Magatzem: 20,04 m²
- Cambra Higienica: 1,08 m²

Total Planta Baixa: 211,80 m²

PLANTA COR (superfície útil)

- Cor Oest: 14,51 m²
- Escala: 2,10 m²
- Cor Sud-Oest: 11,39 m²

Total Planta Cor: 28,00 m²

TOTAL SUPERFÍCIE ÚTIL: 239,80 m²

PLANTA COBERTA (projecció en planta)

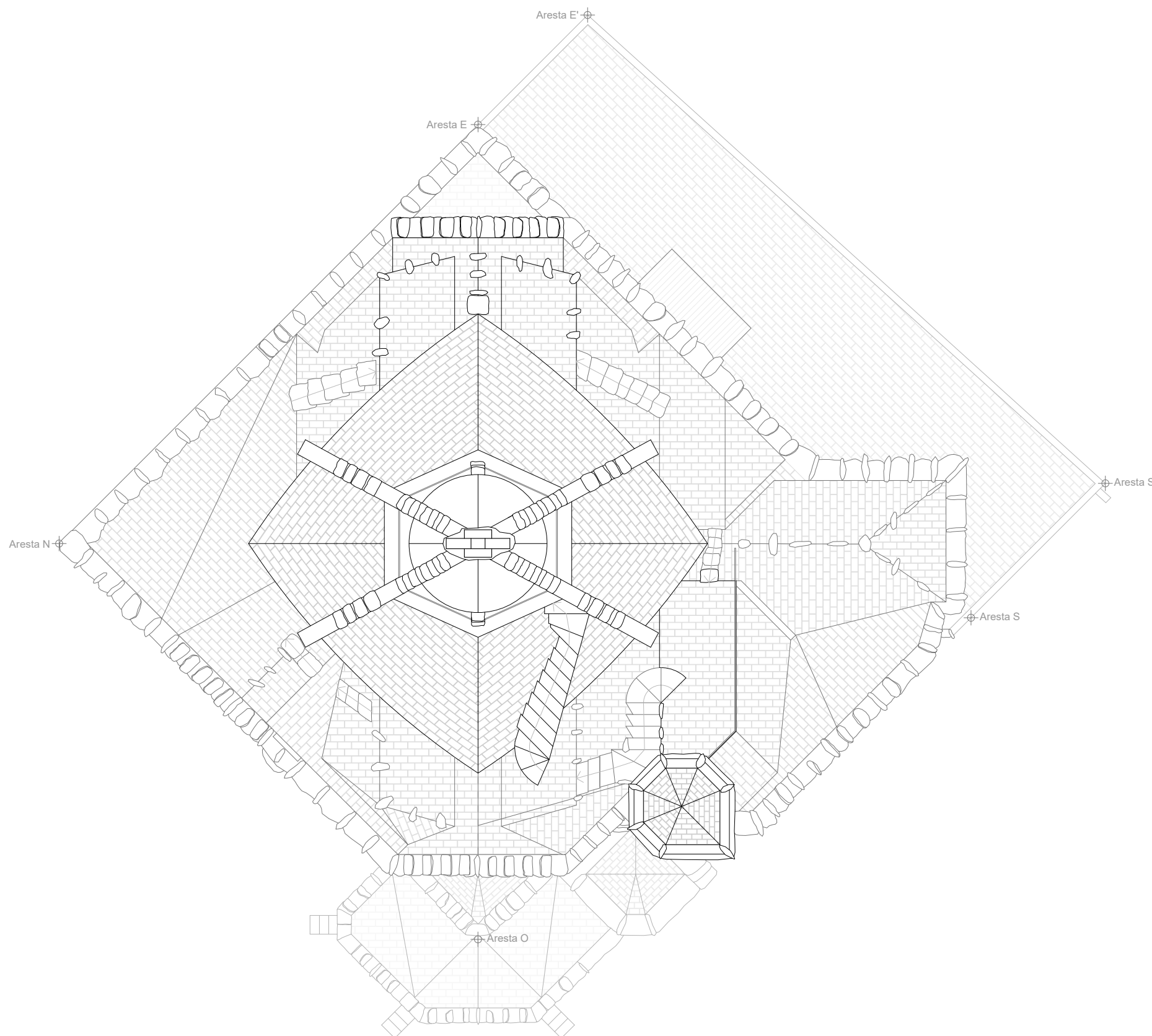
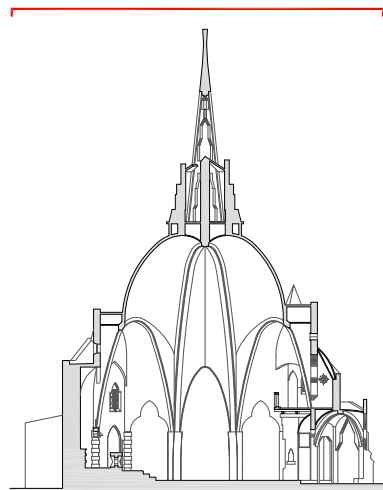
- Cos principal (església): 198,43 m²
- Cos secundari (sagristia i magat.): 50,95 m²

Total projecció en planta: 249,38 m²

Superfície construïda planta baixa: 249,38 m²

Superfície construïda planta cor: 63,26 m²

TOTAL SUPERF. CONSTRUÏDA: 312,64 m²



Projecte Bàsic i D'Execució
 de l'Església del Sagrat Cor de Vistabella
 Església del Sagrat Cor de Vistabella
 Municipi: La Secuita - 43765
 Arquitectes: PRATS I ROCAVERT, SANTIAGO

Clients: ARQUEBISBAT DE TARRAGONA

Visat: 2015601421

Data: 29-12-2015



Hash: WU1M1B64Dj3k5y/0BBaWZB27A=
 Hash COAC: z9r0G6UOZLKHvMnZaUs7oEewLg=
 Ref. COAC: 2015601421-23391-01



DGA 05

PLANTA COBERTA
 ESTAT ACTUAL



DIN A3 E: 1/100
 DIN A1 E: 1/50

PROJECTE
 BÀSIC I EXECUTIU
 RESTAURACIÓ DE
 L'ESGLÉSIA DEL SAGRAT COR
 DE VISTABELLA

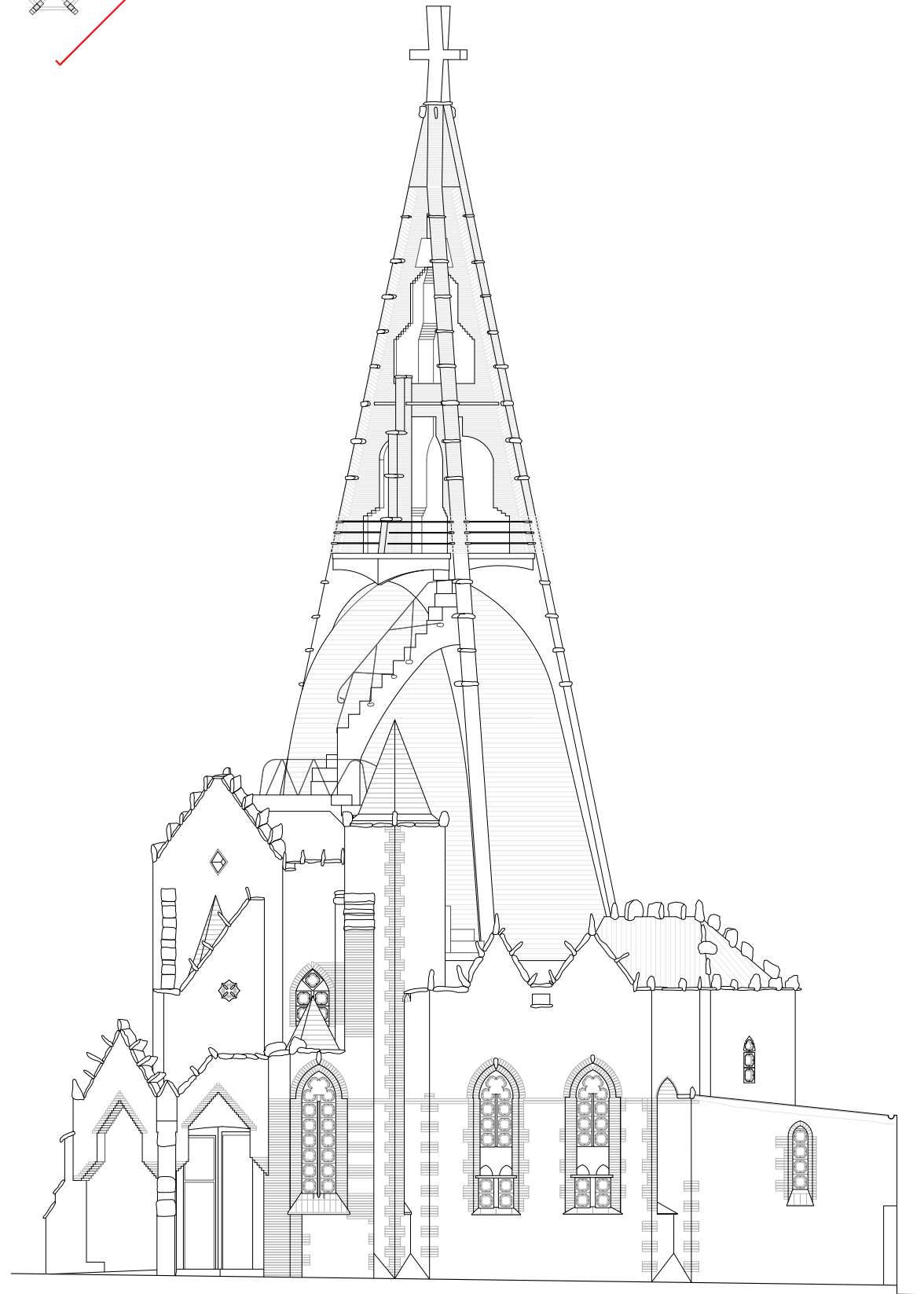
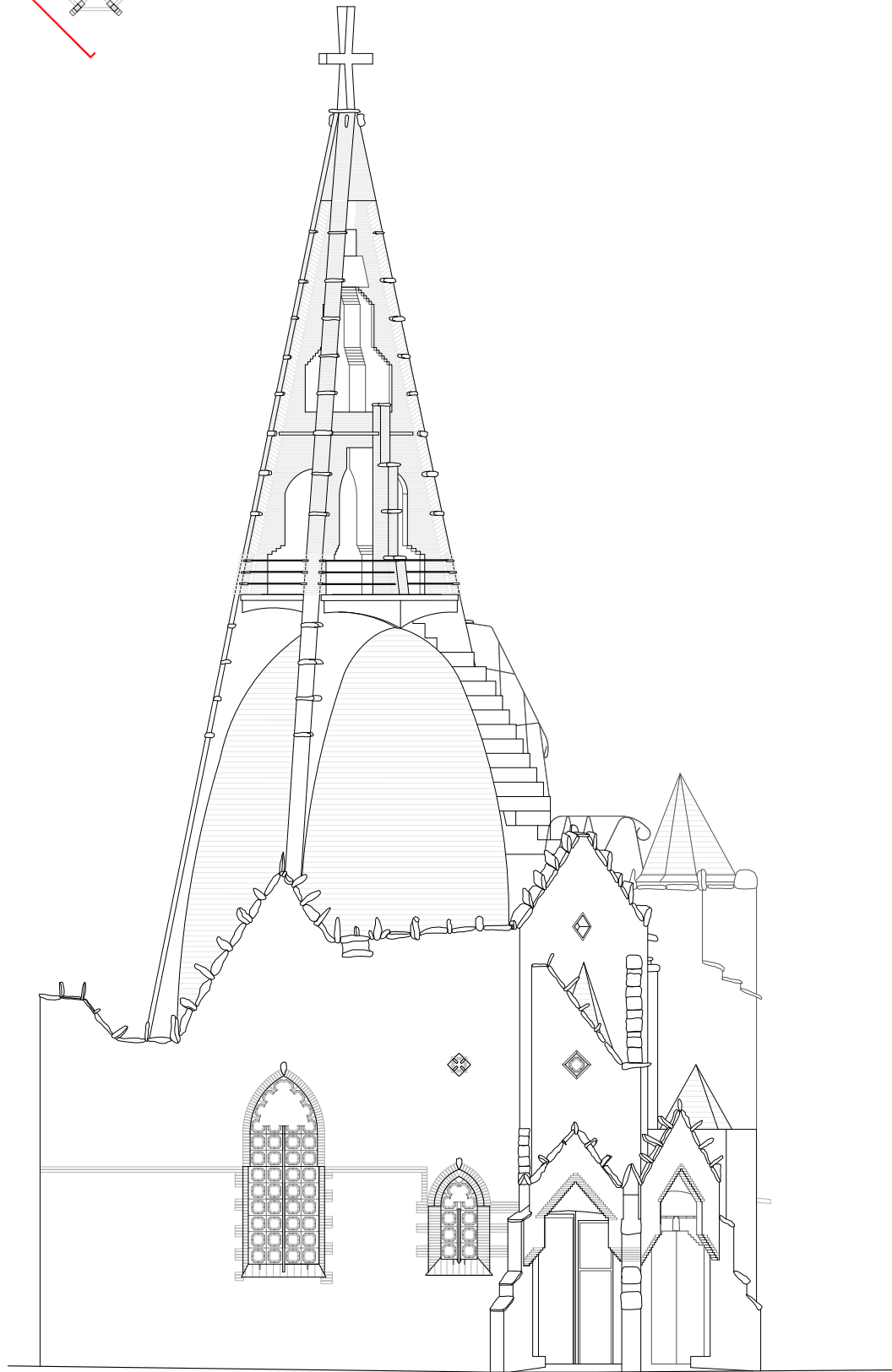
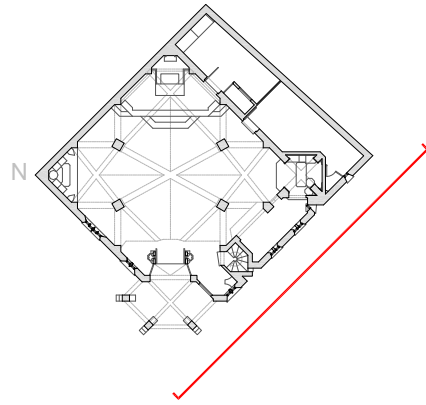
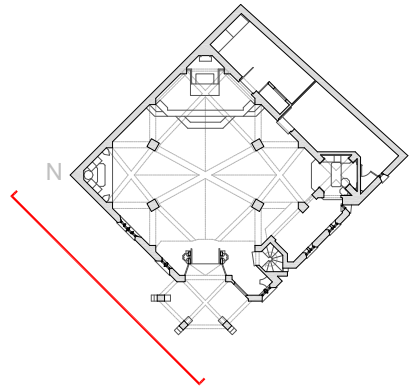
LA SECUITA, TARRAGONA
 DESEMBRE 2015

CLIENT
 ARQUEBISBAT DE
 TARRAGONA
 ESGLÉSIA DE VISTABELLA

Pl. del Dr. GASPÀ BLANCH
 VISTABELLA
 LA SECUITA, TARRAGONA

ARQUITECTE

SANTI PRATS I ROCAVERT



Projecte Bàsic i D'Execució
 per a la restauració de l'Església del Sagrat Cor de Vistabella
 Església del Sagrat Cor de Vistabella
 Municipi: La Secuita - 43765
 Arquitectes: PRATS I ROCAVERT, SANTIAGO

Clients: ARQUEBISBAT DE TARRAGONA
Visat: 2015601421

Data: 29-12-2015



Hash: WML1M6k4DjSk5y/0BBaWkZB2TA=
 Hash COAC: z9r0G6UQZIKhVnNZAus7oEewLg=
 Ref. COAC: 2015601421-233991-01

Col·legi d'Arquitectes
 de Catalunya

DG A 06

ALÇATS
 ALÇAT NORD - OEST
 ALÇAT SUD - OEST
 ESTAT ACTUAL

0 1 4
 DIN A3 E: 1/150
 DIN A1 E: 1/75

PROJECTE
 BÀSIC I EXECUTIU
 RESTAURACIÓ DE
 L'ESGLÉSIA DEL SAGRAT COR
 DE VISTABELLA

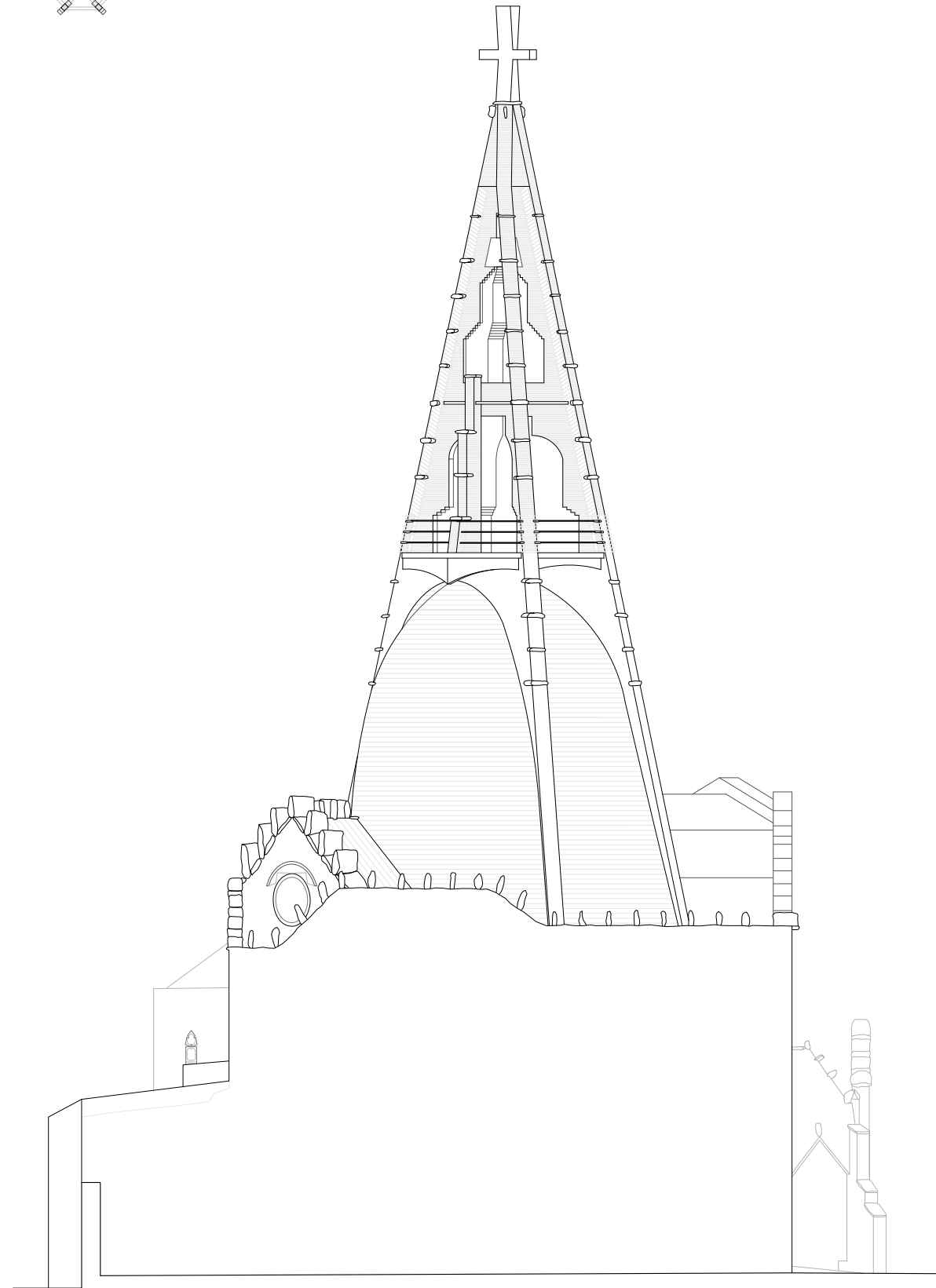
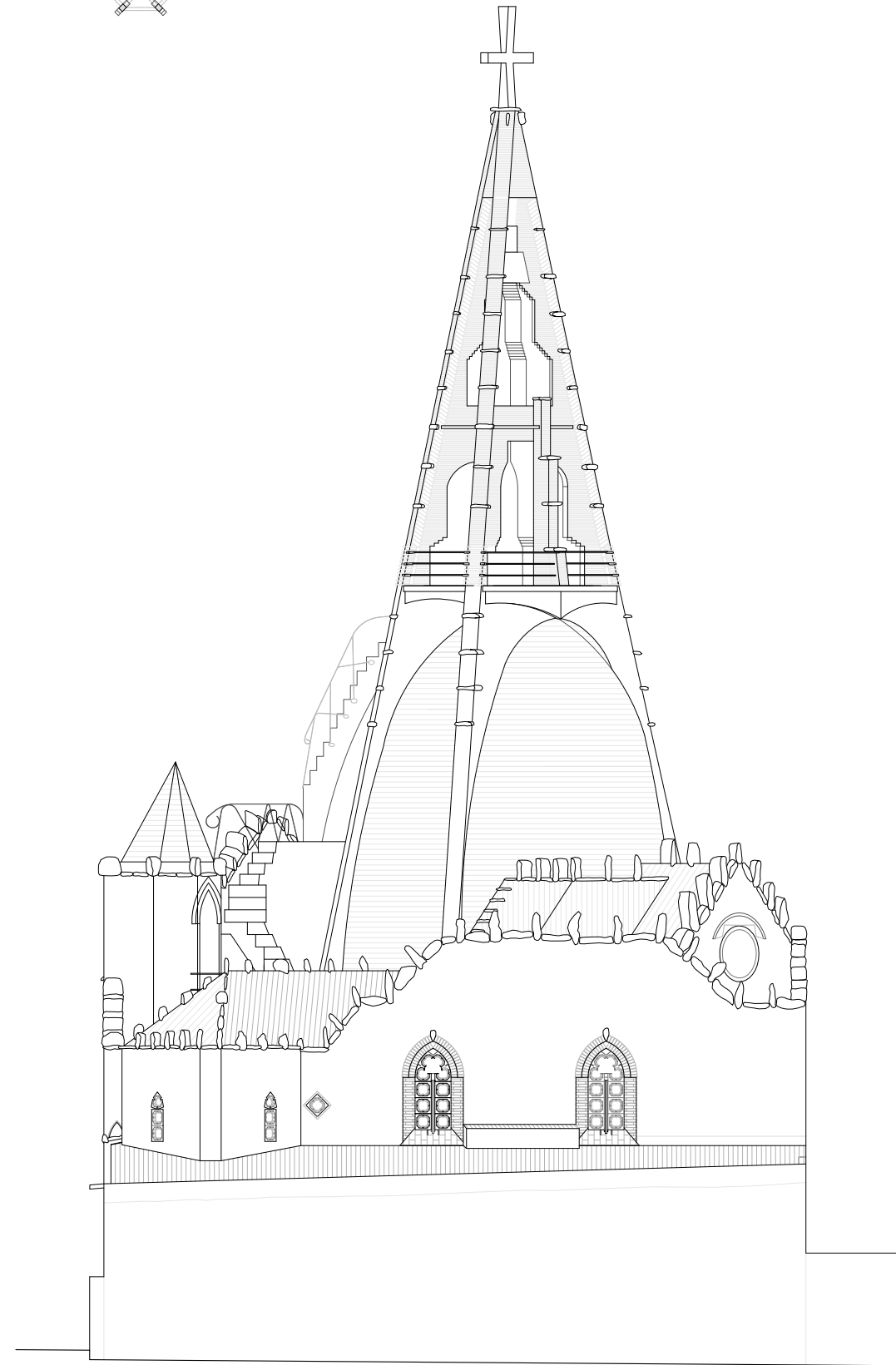
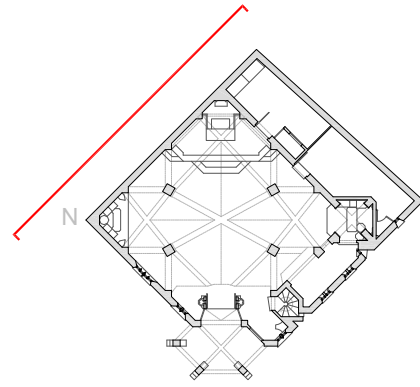
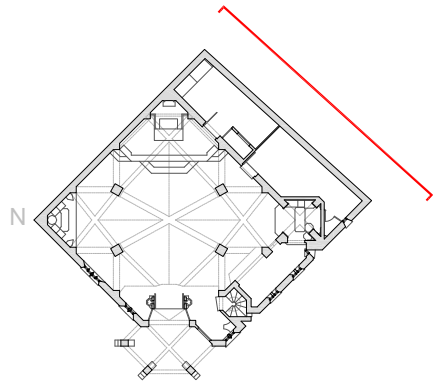
LA SECUITA, TARRAGONA
 DESEMBRE 2015

CLIENT
 ARQUEBISBAT DE
 TARRAGONA
 ESGLÉSIA DE VISTABELLA

Pl. del Dr. GASPÀ BLANCH
 VISTABELLA
 LA SECUITA, TARRAGONA

ARQUITECTE

SANTI PRATS I ROCAVERT



Projecte Bàsic i D'Execució
 per a la restauració de l'Església del Sagrat Cor de Vistabella
 Església del Sagrat Cor de Vistabella
 Municipi: La Secuita - 43765
 Arquitectes: PRATS I ROCAVERT, SANTIAGO

Clients: ARQUEBISBAT DE TARRAGONA

Visat: 2015601421

Hash: WML1M6k4DjSk5y/0BBaWkLZ8B2TA=
 Hash COAC: z9r0G6UQZIKhVnNZAus7oEewLg=
 Ref. COAC: 2015601421-233991-01



Data: 29-12-2015

DG A 07

ALÇATS
 ALÇAT SUD - EST
 ALÇAT NORD - EST
 ESTAT ACTUAL

0 1 4
 DIN A3 E: 1/150
 DIN A1 E: 1/75

PROJECTE
 BÀSIC I EXECUTIU
 RESTAURACIÓ DE
 L'ESGLÉSIA DEL SAGRAT COR
 DE VISTABELLA

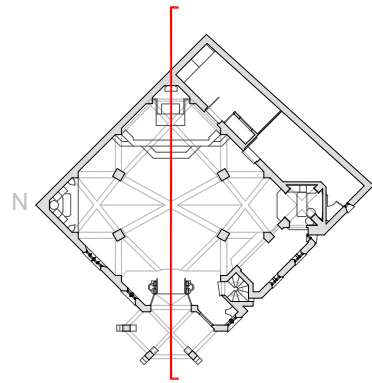
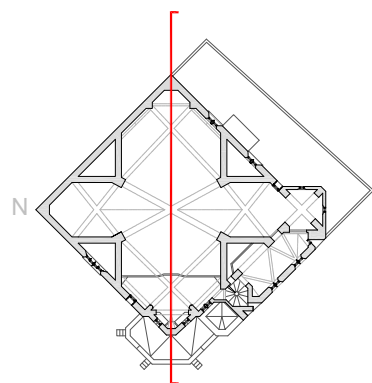
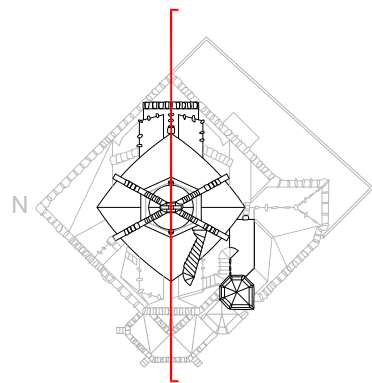
LA SECUITA, TARRAGONA
 DESEMBRE 2015

CLIENT
 ARQUEBISBAT DE
 TARRAGONA
 ESGLÉSIA DE VISTABELLA

Pl. del Dr. GASPÀ BLANCH
 VISTABELLA
 LA SECUITA, TARRAGONA

ARQUITECTE

SANTI PRATS I ROCAVERT



+28.34
+26.34
+24.19
+23.31
+22.72

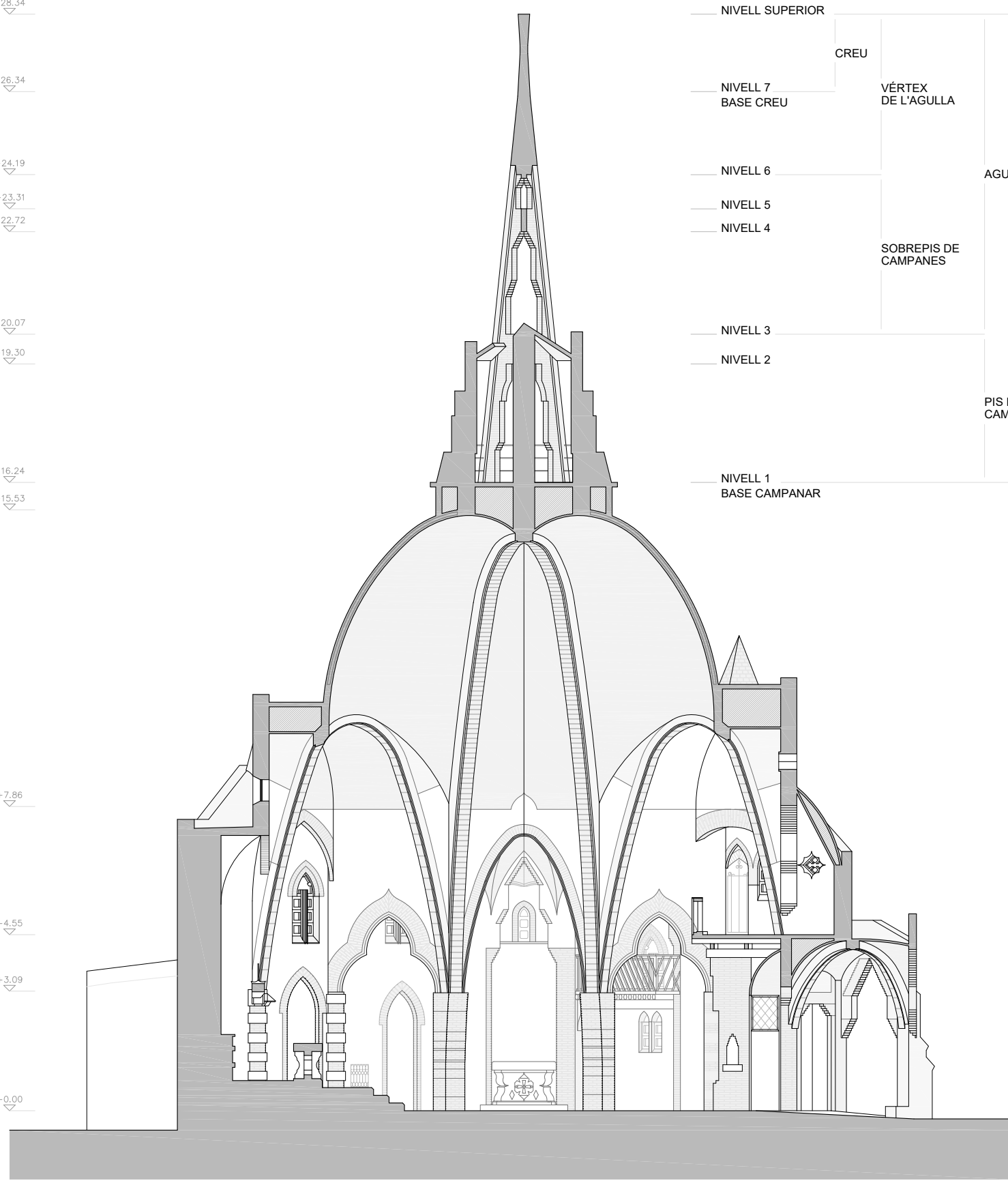
+20.07
+19.30

+16.24
+15.53

+7.86

+4.55
+3.09

+0.00



NIVELL SUPERIOR

CREU

NIVELL 7
BASE CREU

VÉRTEX DE L'AGULLA

NIVELL 6

AGULLA

NIVELL 5

NIVELL 4

SOBREPIS DE CAMPANES

CAMPANAR

NIVELL 3

NIVELL 2

PIS DE CAMPANES

NIVELL 1
BASE CAMPANAR

NIVELL COBERTA VOLTA CENTRAL

NIVELL COBERTA VOLTES LATERALS

NIVELL COR OEST

NIVELL COR SUD-OEST

NIVELL ACCÉS

Projecte Bàsic i D'Execució
per l'edifici de l'Església del Sagrat Cor de Vistabella
Església del Sagrat Cor de Vistabella
Municipi: La Secuita - 43765
Arquitectes: PRATS I ROCAVERT, SANTIAGO

Clients: ARQUEBISBAT DE TARRAGONA



DGA 08

SECCIÓ LONGITUDINAL
ESTAT ACTUAL

0 1 4

DIN A3 E: 1/150
DIN A1 E: 1/75

PROJECTE

BÀSIC I EXECUTIU
RESTAURACIÓ DE
L'ESGLÉSIA DEL SAGRAT COR
DE VISTABELLA

LA SECUITA, TARRAGONA
DESEMBRE 2015

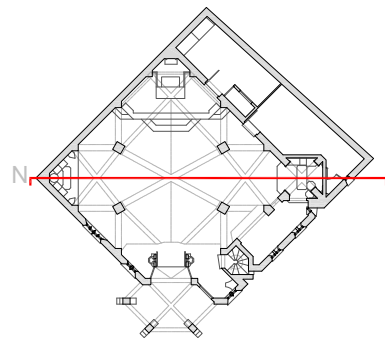
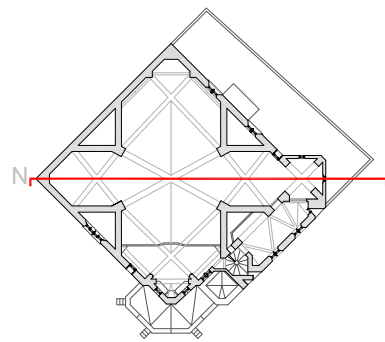
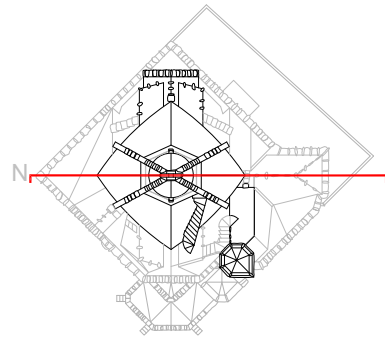
CLIENT

ARQUEBISBAT DE
TARRAGONA
ESGLÉSIA DE VISTABELLA

Pl. del Dr. GASPÀ BLANCH
VISTABELLA
LA SECUITA, TARRAGONA

ARQUITECTE

SANTI PRATS I ROCAVERT



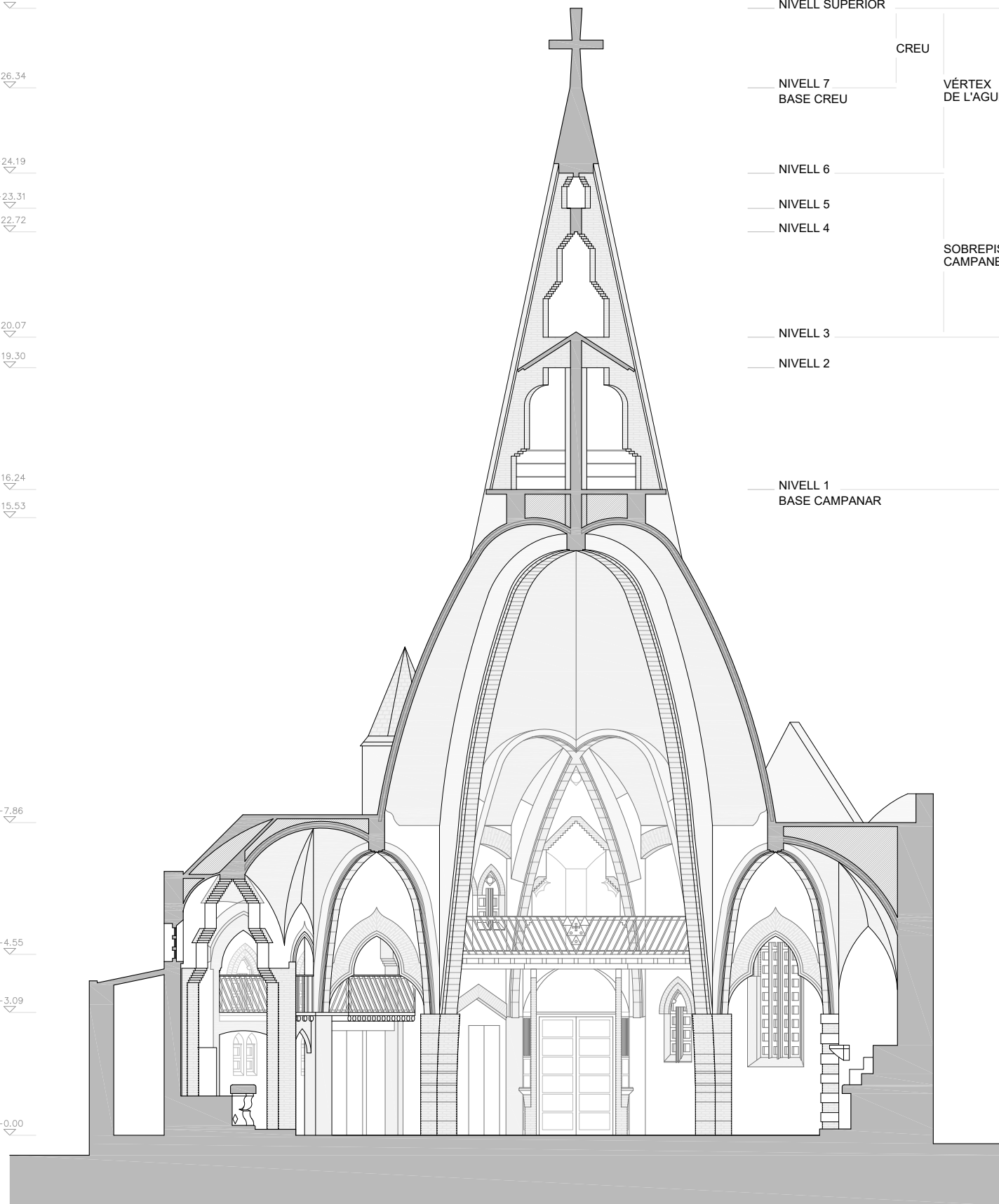
+28.34
+26.34
+24.19
+23.31
+22.72

+20.07
+19.30

+16.24
+15.53

+7.86

+4.55
+3.09
+0.00



NIVELL SUPERIOR

CREU

NIVELL 7
BASE CREU

VÉRTEX DE L'AGULLA

NIVELL 6

AGULLA

NIVELL 5

NIVELL 4

SOBREPIS DE CAMPANES

CAMPANAR

NIVELL 3

NIVELL 2

PIS DE CAMPANES

NIVELL 1
BASE CAMPANAR

NIVELL COBERTA VOLTA CENTRAL

NIVELL COBERTA VOLTES LATERALS

NIVELL COR OEST

NIVELL COR SUD-OEST

NIVELL ACCÉS

Projecte Bàsic i D'Execució
 Restauració de l'Església del Sagrat Cor de Vistabella
 Església del Sagrat Cor de Vistabella
 Municipi: La Secuita - 43765
 Arquitectes: PRATS I ROCAVERT, SANTIAGO

Clients: ARQUEBISBAT DE TARRAGONA

Hash: WU11M6k4Dj3k5y/0B6wLZB82TA=
 Hash COAC: z9r0G6UQZIKhVnNZAus70eewLg=
 Ref. COAC: 2015601421-233991-01

Col·legi d'Arquitectes de Catalunya

Visat: 2015601421

Data: 29-12-2015

DG A 09

SECCIÓ TRANSVERSAL 1
 ESTAT ACTUAL

0 1 4

DIN A3 E: 1/150
 DIN A1 E: 1/75

PROJECTE

BÀSIC I EXECUTIU
 RESTAURACIÓ DE
 L'ESGLÉSIA DEL SAGRAT COR
 DE VISTABELLA

LA SECUITA, TARRAGONA
 DESEMBRE 2015

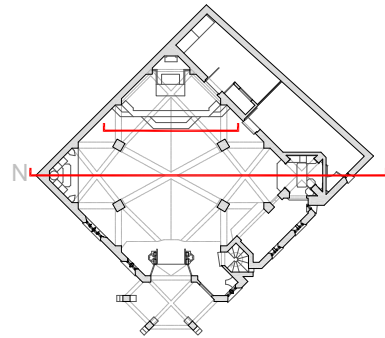
CLIENT

ARQUEBISBAT DE
 TARRAGONA
 ESGLÉSIA DE VISTABELLA

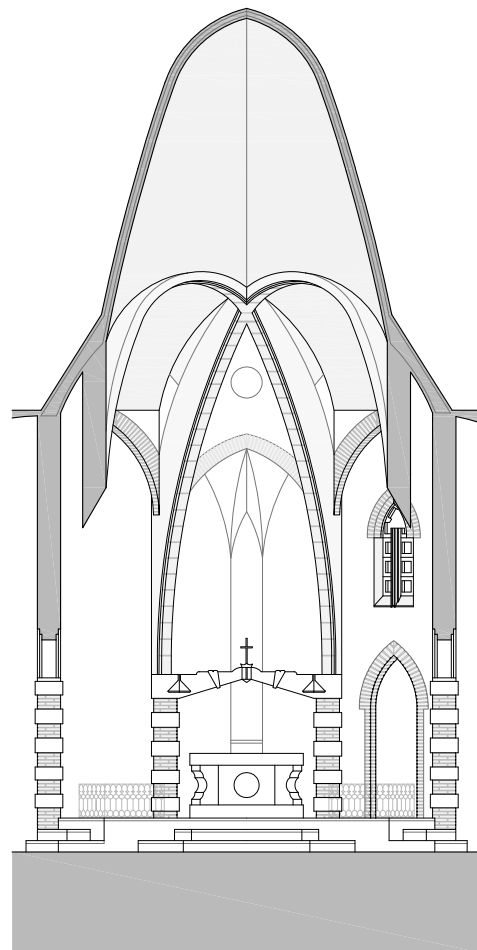
Pl. del Dr. GASPÀ BLANCH
 VISTABELLA
 LA SECUITA, TARRAGONA

ARQUITECTE

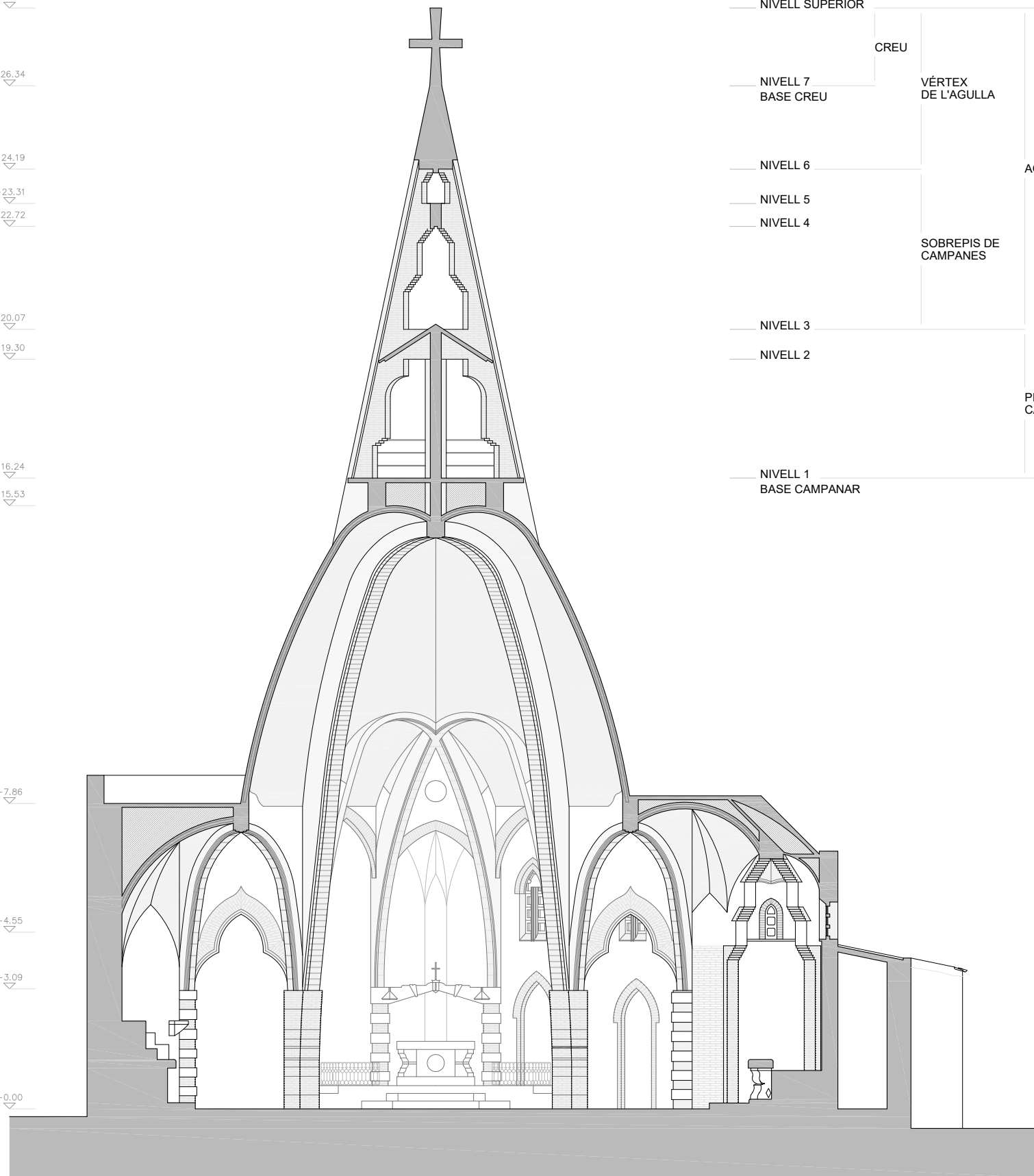
SANTI PRATS I ROCAVERT



+28.34
+26.34
+24.19
+23.31
+22.72
+20.07
+19.30
+16.24
+15.53



+7.86
+4.55
+3.09
+0.00



NIVELL SUPERIOR
CREU
NIVELL 7
BASE CREU
VÉRTEX DE L'AGULLA
NIVELL 6
AGULLA
NIVELL 5
NIVELL 4
SOBREPIS DE CAMPANES
CAMPANAR
NIVELL 3
NIVELL 2
PIS DE CAMPANES
NIVELL 1
BASE CAMPANAR
NIVELL COBERTA
VOLTA CENTRAL

NIVELL COBERTA
VOLTES LATERALS
NIVELL COR OEST
NIVELL COR SUD-OEST
NIVELL ACCÉS

Projecte Bàsic i D'Execució
per a la restauració de l'Església del Sagrat Cor de Vistabella
Església del Sagrat Cor de Vistabella
Municipi: La Secuita - 43765
Arquitectes: PRATS I ROCAVERT, SANTIAGO

Clients: ARQUEBISBAT DE TARRAGONA

Hash: WU1M1B140Jk5y70BBaWUZB2TA=
Hash COAC: z9r0G6UQZIKhVnNZAus70eewLg=
Ref. COAC: 2015601421-233991-01

Col·legi d'Arquitectes
de Catalunya



Visat: 2015601421

Data: 29-12-2015

DGA 10

SECCIÓ TRANSVERSAL 2
ESTAT ACTUAL

0 1 4

DIN A3 E: 1/150
DIN A1 E: 1/75

PROJECTE

BÀSIC I EXECUTIU
RESTAURACIÓ DE
L'ESGLÉSIA DEL SAGRAT COR
DE VISTABELLA

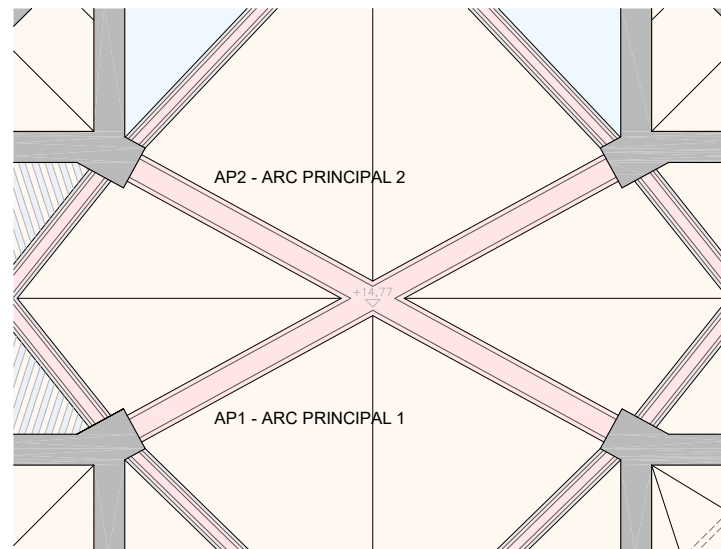
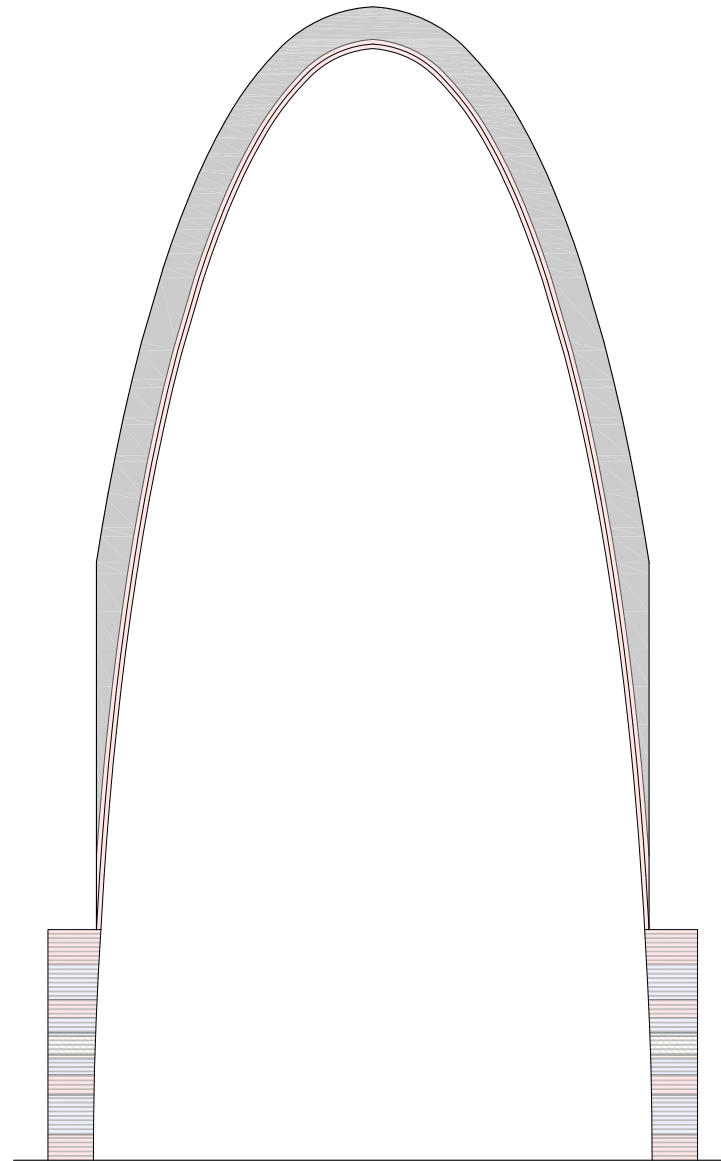
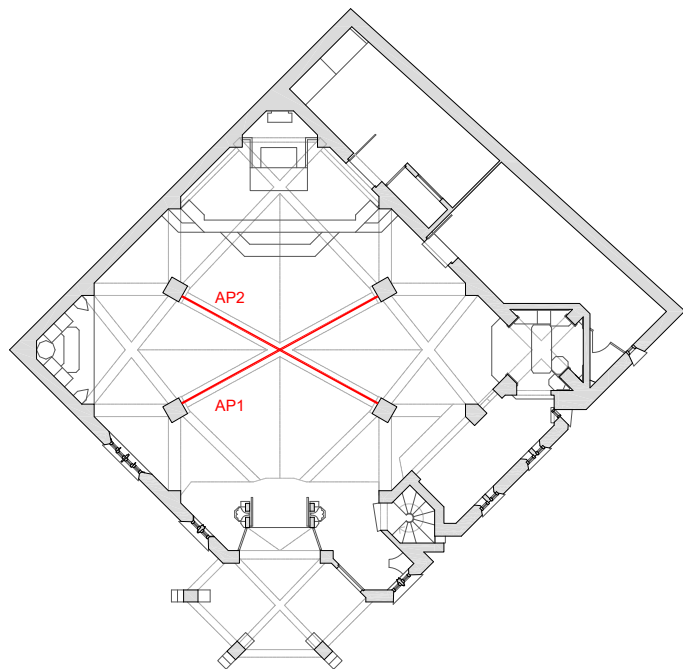
LA SECUITA, TARRAGONA
DESEMBRE 2015

CLIENT
ARQUEBISBAT DE
TARRAGONA
ESGLÉSIA DE VISTABELLA

Pl. del Dr. GASPÀ BLANCH
VISTABELLA
LA SECUITA, TARRAGONA

ARQUITECTE

SANTI PRATS I ROCAVERT



Projecte Bàsic i D'Execució
 Restauració de l'Església del Sagrat Cor de Vistabella
 Església del Sagrat Cor de Vistabella
 Municipi: La Secuita - 43765
 Arquitectes: PRATS I ROCAVERT, SANTIAGO

Clients: ARQUEBISBAT DE TARRAGONA

Visat: 2015601421

Data: 29-12-2015



Hash: WMLM6k4DjSk5y/0BBaWLBZ82TA=
 Hash COAC: z9r0G6UQZIKhVnNZAus7oEewLg=
 Ref. COAC: 2015601421-233991-01

Col·legi d'Arquitectes
 de Catalunya

DG A 19

ARC PRINCIPAL
 ESTAT ACTUAL

0 1 2
 DIN A3 E: 1/100
 DIN A1 E: 1/50

PROJECTE
 BÀSIC I EXECUTIU
 RESTAURACIÓ DE
 L'ESGLÉSIA DEL SAGRAT COR
 DE VISTABELLA

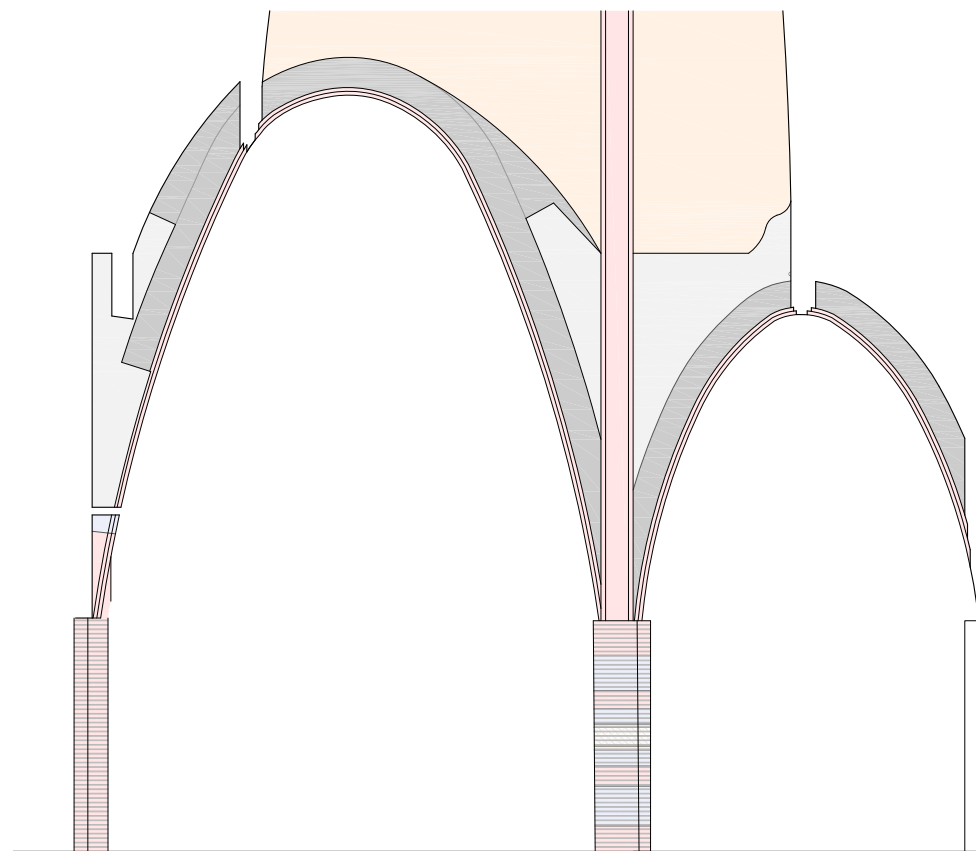
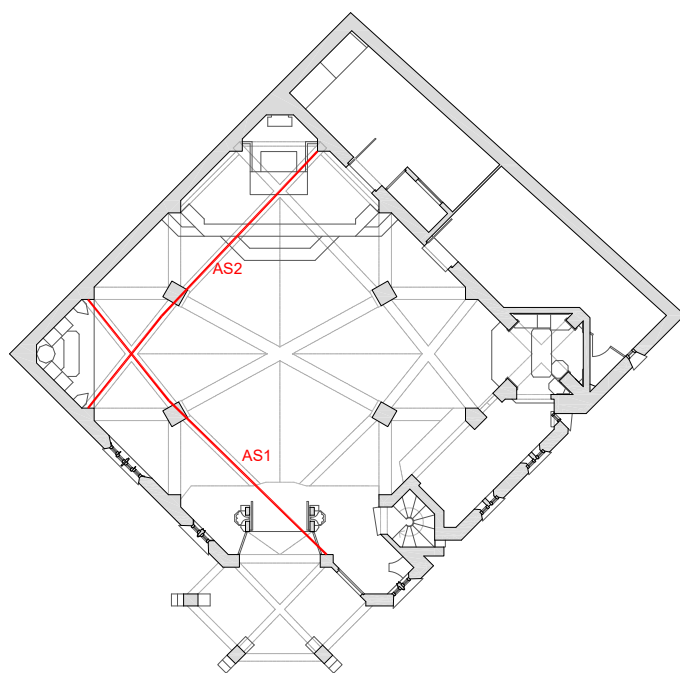
LA SECUITA, TARRAGONA
 DESEMBRE 2015

CLIENT
 ARQUEBISBAT DE
 TARRAGONA
 ESGLÉSIA DE VISTABELLA

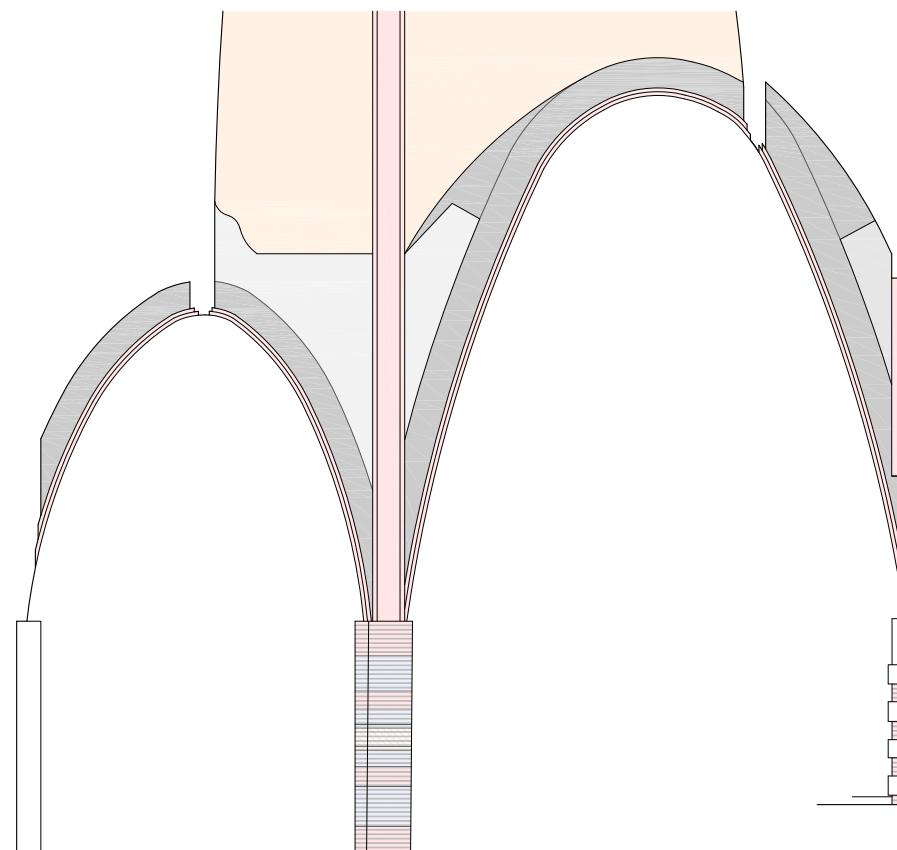
Pl. del Dr. GASPÀ BLANCH
 VISTABELLA
 LA SECUITA, TARRAGONA

ARQUITECTE

SANTI PRATS I ROCAVERT



AS1 - ARC SECUNDARI 1



AS2 - ARC SECUNDARI 2

Projecte Bàsic i D'Execució
 Restauració de l'Església del Sagrat Cor de Vistabella
 Església del Sagrat Cor de Vistabella
 Municipi: La Secuita - 43765
 Arquitectes: PRATS I ROCAVERT, SANTIAGO

Clients: ARQUEBISBAT DE TARRAGONA

Visat: 2015601421

Data: 29-12-2015



Hash: WUIMW64DjK5y/0BBaWUZB27A=
 Hash COAC: z9r0G6UQZIKhVnNZaus7oEewLg=
 Ref. COAC: 2015601421-233991-01

Col·legi d'Arquitectes
 de Catalunya

DG A 20

ARCS SECUNDARIS
 ESTAT ACTUAL

0 1 2
 DIN A3 E: 1/100
 DIN A1 E: 1/50

PROJECTE
 BÀSIC I EXECUTIU
 RESTAURACIÓ DE
 L'ESGLÉSIA DEL SAGRAT COR
 DE VISTABELLA

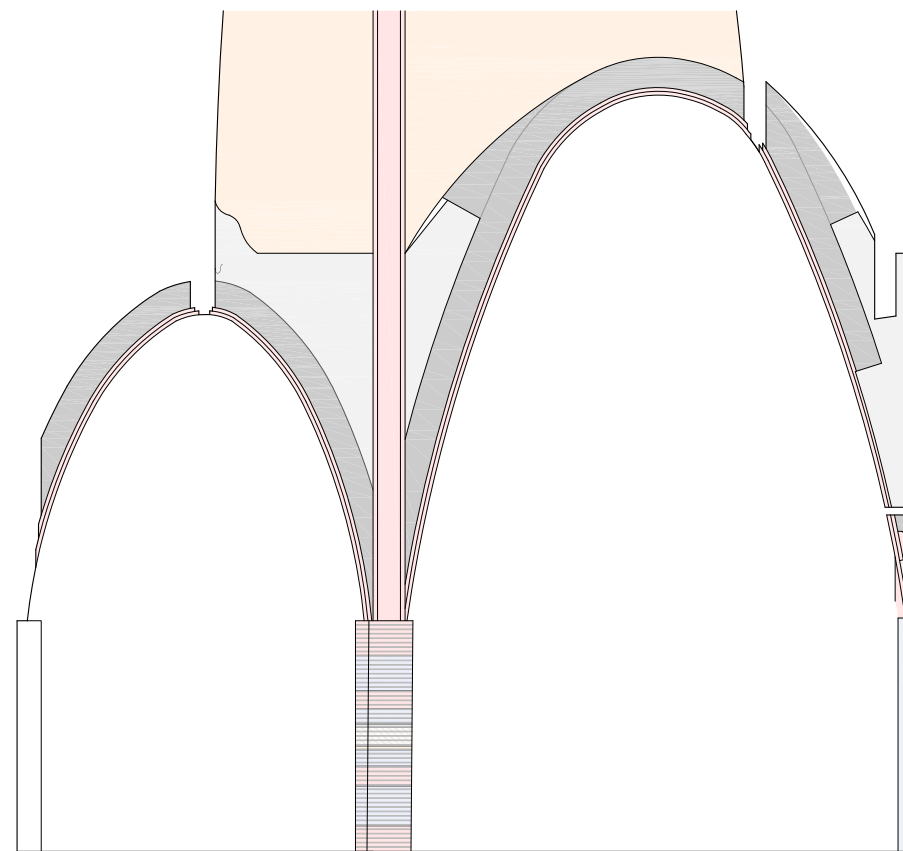
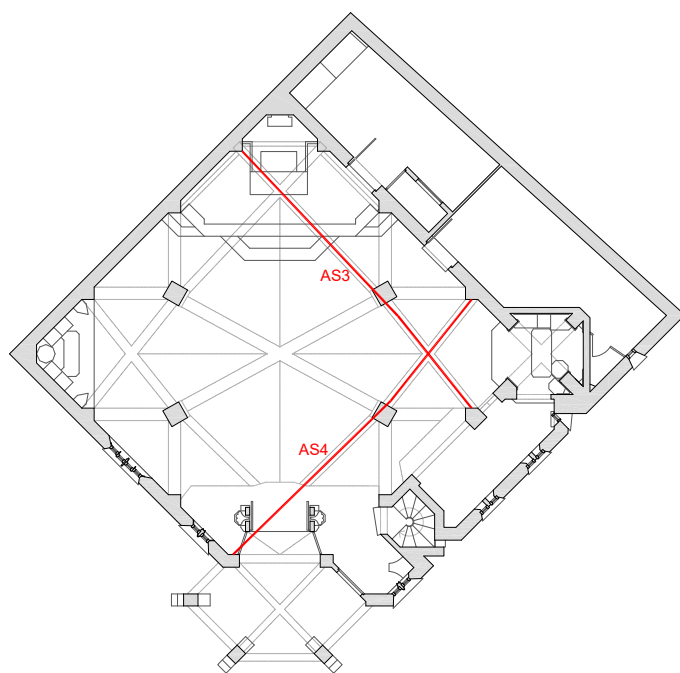
LA SECUITA, TARRAGONA
 DESEMBRE 2015

CLIENT
 ARQUEBISBAT DE
 TARRAGONA
 ESGLÉSIA DE VISTABELLA

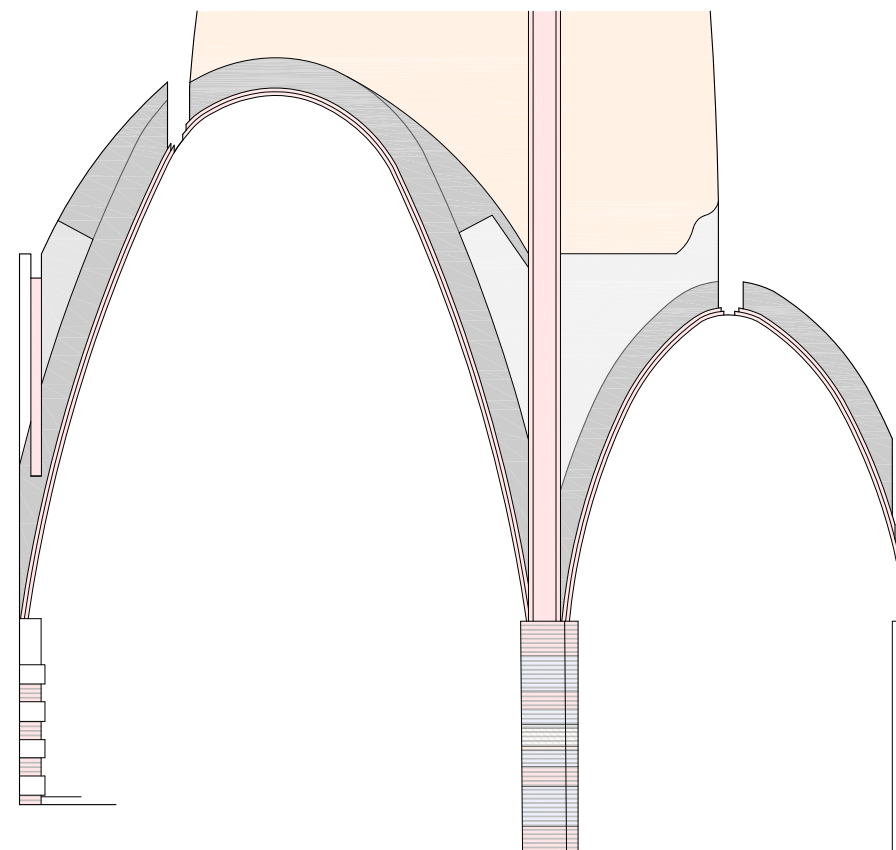
Pl. del Dr. GASPÀ BLANCH
 VISTABELLA
 LA SECUITA, TARRAGONA

ARQUITECTE

SANTI PRATS I ROCAVERT



AS3 - ARC SECUNDARI 3



AS4 - ARC SECUNDARI 4

Projecte Bàsic i D'Execució
 Restauració de l'Església del Sagrat Cor de Vistabella
 Església del Sagrat Cor de Vistabella
 Municipi: La Secuita - 43765
 Arquitectes: PRATS I ROCAVERT, SANTIAGO

Clients: ARQUEBISBAT DE TARRAGONA

Visat: 2015601421

Data: 29-12-2015



Hash: WU1W1Bk4DjSk5y/0BBaWLBZ827A=
 Hash COAC: z9r0G6UQZIKhVnNZAus7oEewLg=
 Ref. COAC: 2015601421-233991-01

Col·legi d'Arquitectes
 de Catalunya

DG A 21

ARCS SECUNDARIS
 ESTAT ACTUAL

0 1 2
 DIN A3 E: 1/100
 DIN A1 E: 1/50

PROJECTE
 BÀSIC I EXECUTIU
 RESTAURACIÓ DE
 L'ESGLÉSIA DEL SAGRAT COR
 DE VISTABELLA

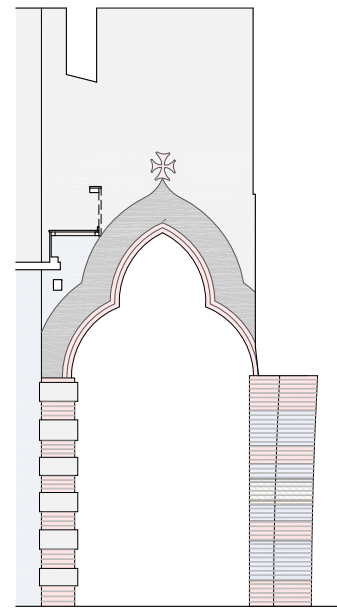
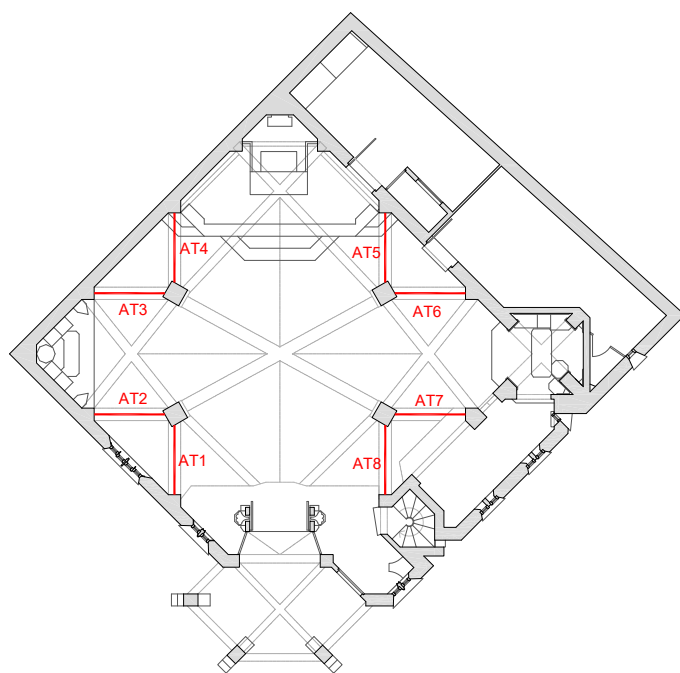
LA SECUITA, TARRAGONA
 DESEMBRE 2015

CLIENT
 ARQUEBISBAT DE
 TARRAGONA
 ESGLÉSIA DE VISTABELLA

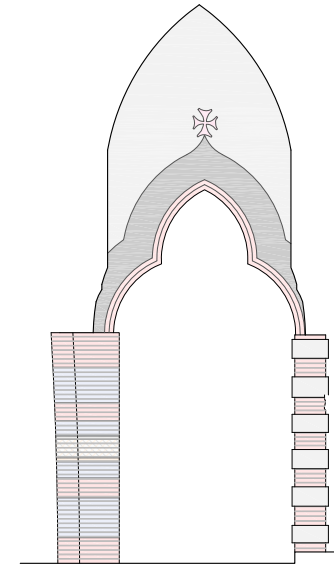
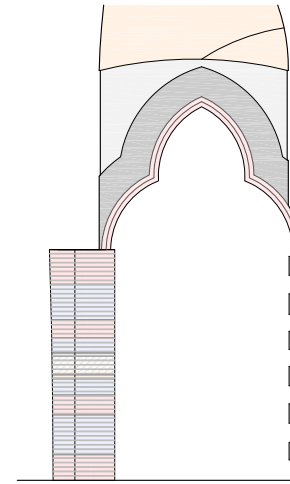
Pl. del Dr. GASPÀ BLANCH
 VISTABELLA
 LA SECUITA, TARRAGONA

ARQUITECTE

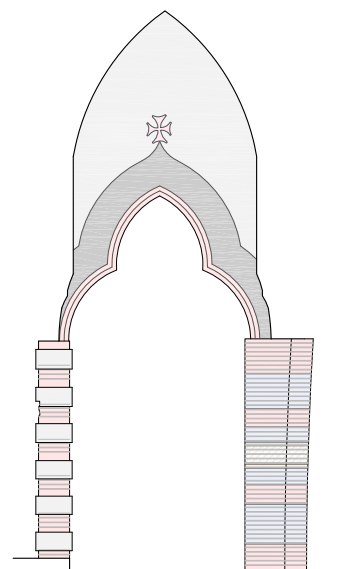
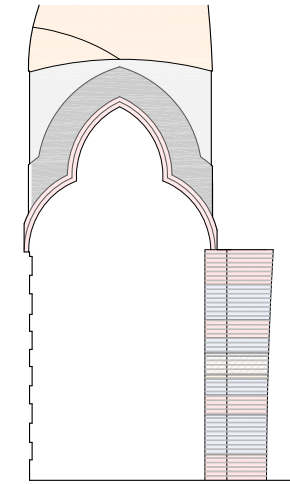
SANTI PRATS I ROCAVERT



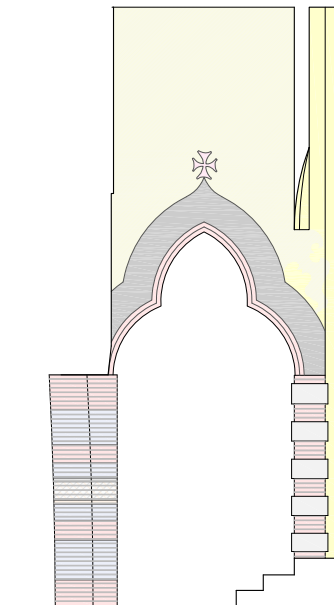
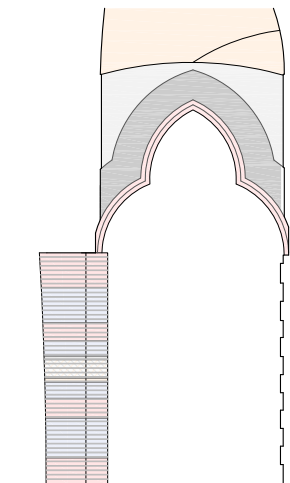
AT1 - ARC TERCIARI 1



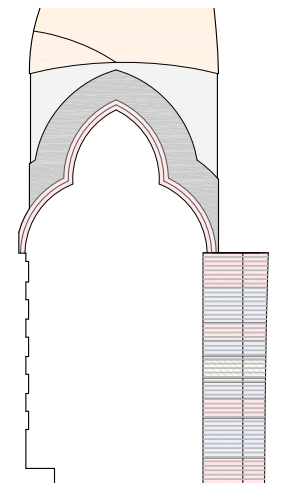
AT2 - ARC TERCIARI 2



AT3 - ARC TERCIARI 3



AT4 - ARC TERCIARI 4



Projecte Bàsic i D'Execució
 per a la restauració de l'Església del Sagrat Cor de Vistabella
 Església del Sagrat Cor de Vistabella
 Municipi: La Secuita - 43765
 Arquitectes: PRATS I ROCAVERT, SANTIAGO

Clients: ARQUEBISBAT DE TARRAGONA

Visat: 2015601421

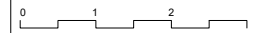
Data: 29-12-2015



Hash: WU1W6V4DjK5y/0BBaWUZB2TA=
 Hash COAC: z9r0G6UQZIKhVnNZAus70eewLg=
 Ref. COAC: 2015601421-233991-01

DG A 22

ARCS TERCIARIS
 ESTAT ACTUAL



DIN A3 E: 1/100
 DIN A1 E: 1/50

PROJECTE
 BÀSIC I EXECUTIU
 RESTAURACIÓ DE
 L'ESGLÉSIA DEL SAGRAT COR
 DE VISTABELLA

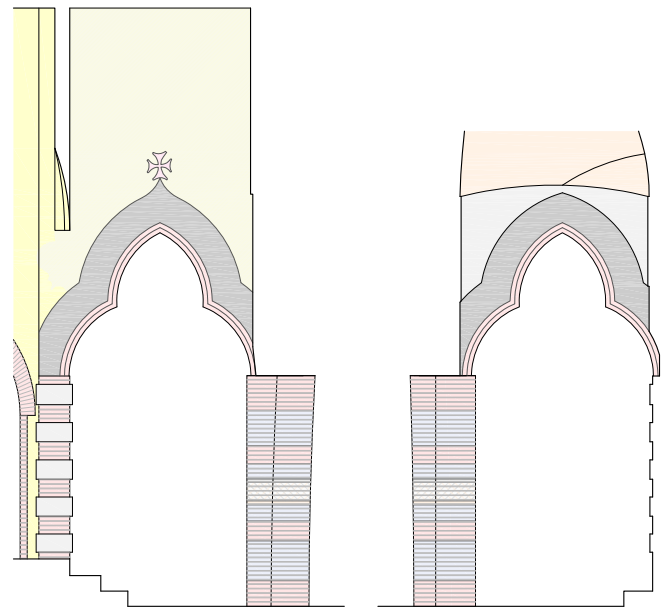
LA SECUITA, TARRAGONA
 DESEMBRE 2015

CLIENT
 ARQUEBISBAT DE
 TARRAGONA
 ESGLÉSIA DE VISTABELLA

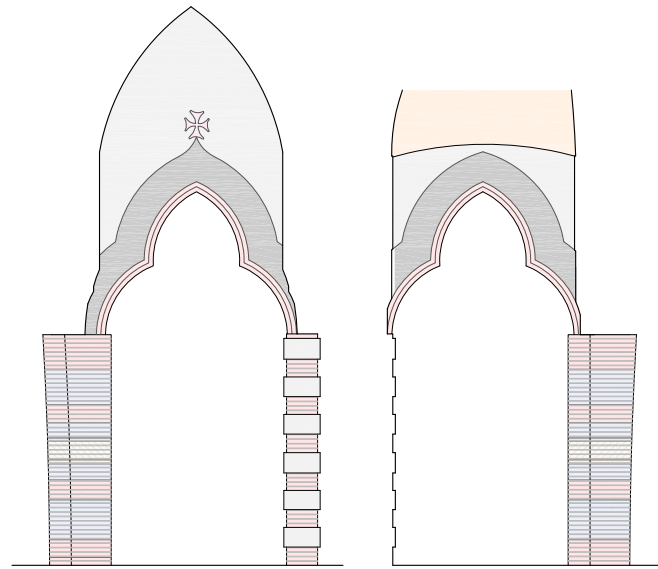
Pl. del Dr. GASPÀ BLANCH
 VISTABELLA
 LA SECUITA, TARRAGONA

ARQUITECTE

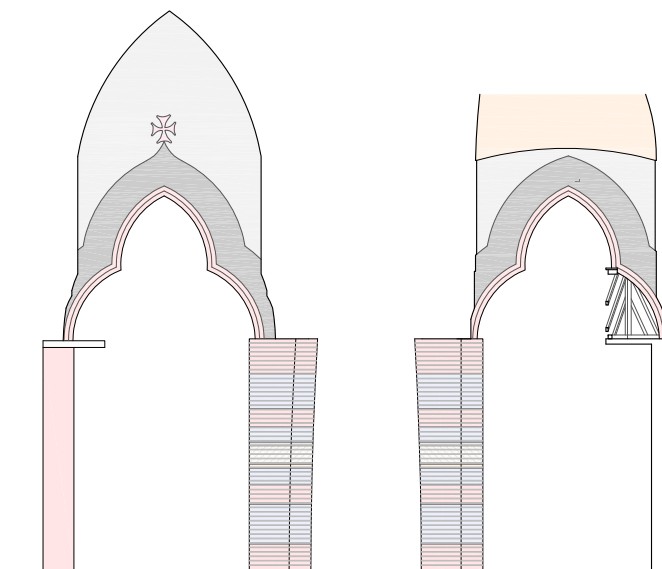
SANTI PRATS I ROCAVERT



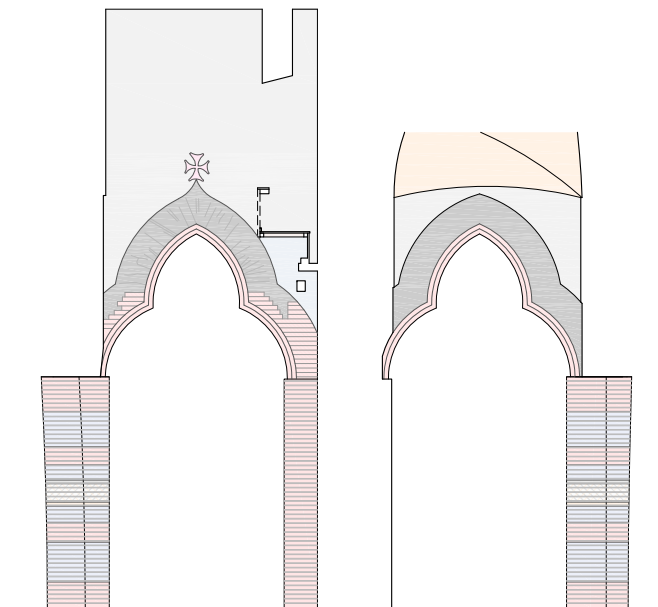
AT5 - ARC TERCIARI 5



AT6 - ARC TERCIARI 6

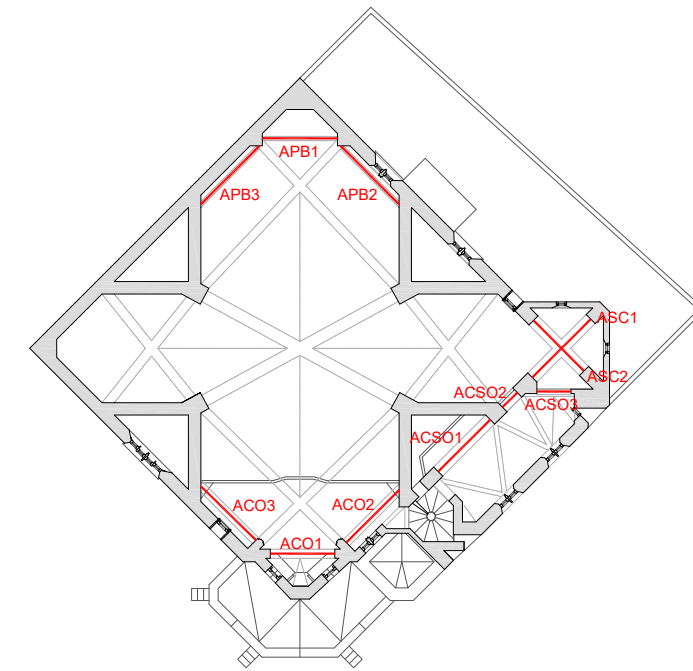


AT7 - ARC TERCIARI 7

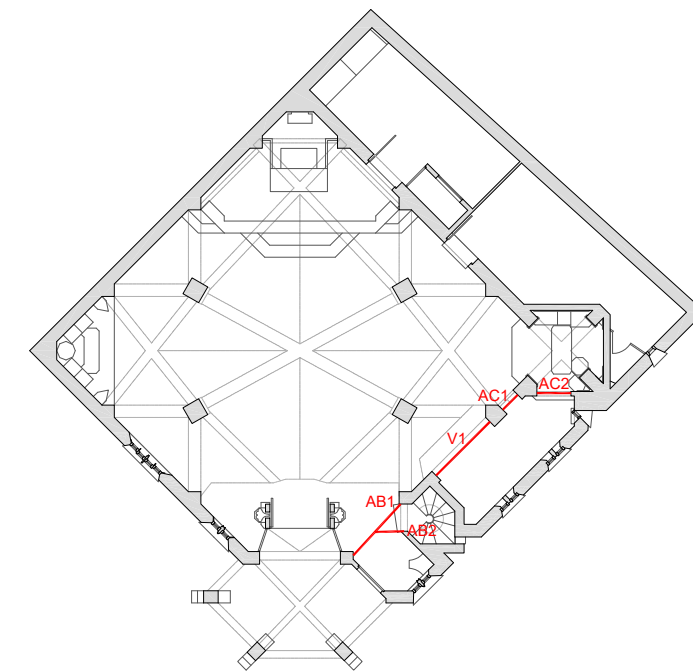


AT8 - ARC TERCIARI 8

SOSTRE PLANTA COR



SOSTRE PLANTA BAIXA



ALTRES ARCS:

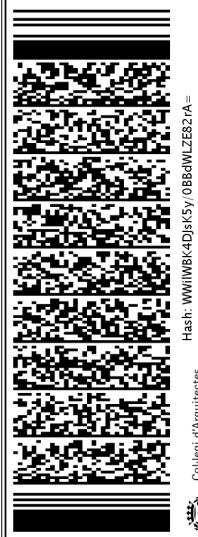
- APB - Arcs Presbiteri
- AC - Arcs Confesionari
- AB - Arcs Baptisteri
- ASC - Arcs Capella Sant Crist
- ACO - Arcs Cor Oest
- ACSO - Arcs Cor Sud-Oest
- V - Viga fusta

Projecte Bàsic i D'Execució
 Restauració i millora del Sagrat Cor de Vistabella
 Església de Vistabella
 Municipi: La Secuita - 43765
 Arquitectes: PRATS I ROCAVERT, SANTIAGO

Clients: ARQUEBISBAT DE TARRAGONA

Visat: 2015601421

Data: 29-12-2015



Hash: WMIIMBI4DjSk5y/0BBaWZLzBzTA=
 Hash COAC: z9r0G6UQZIKhVnNZAus70eewLg=
 Ref. COAC: 2015601421-23391-01

Col·legi d'Arquitectes
 de Catalunya



DG A 23

ARCS TERCIARIS I ALTRES
 ESTAT ACTUAL

0 1 2
 DIN A3 E: 1/100
 DIN A1 E: 1/50

PROJECTE
 BÀSIC I EXECUTIU
 RESTAURACIÓ DE
 L'ESGLÉSIA DEL SAGRAT COR
 DE VISTABELLA

LA SECUITA, TARRAGONA
 DESEMBRE 2015

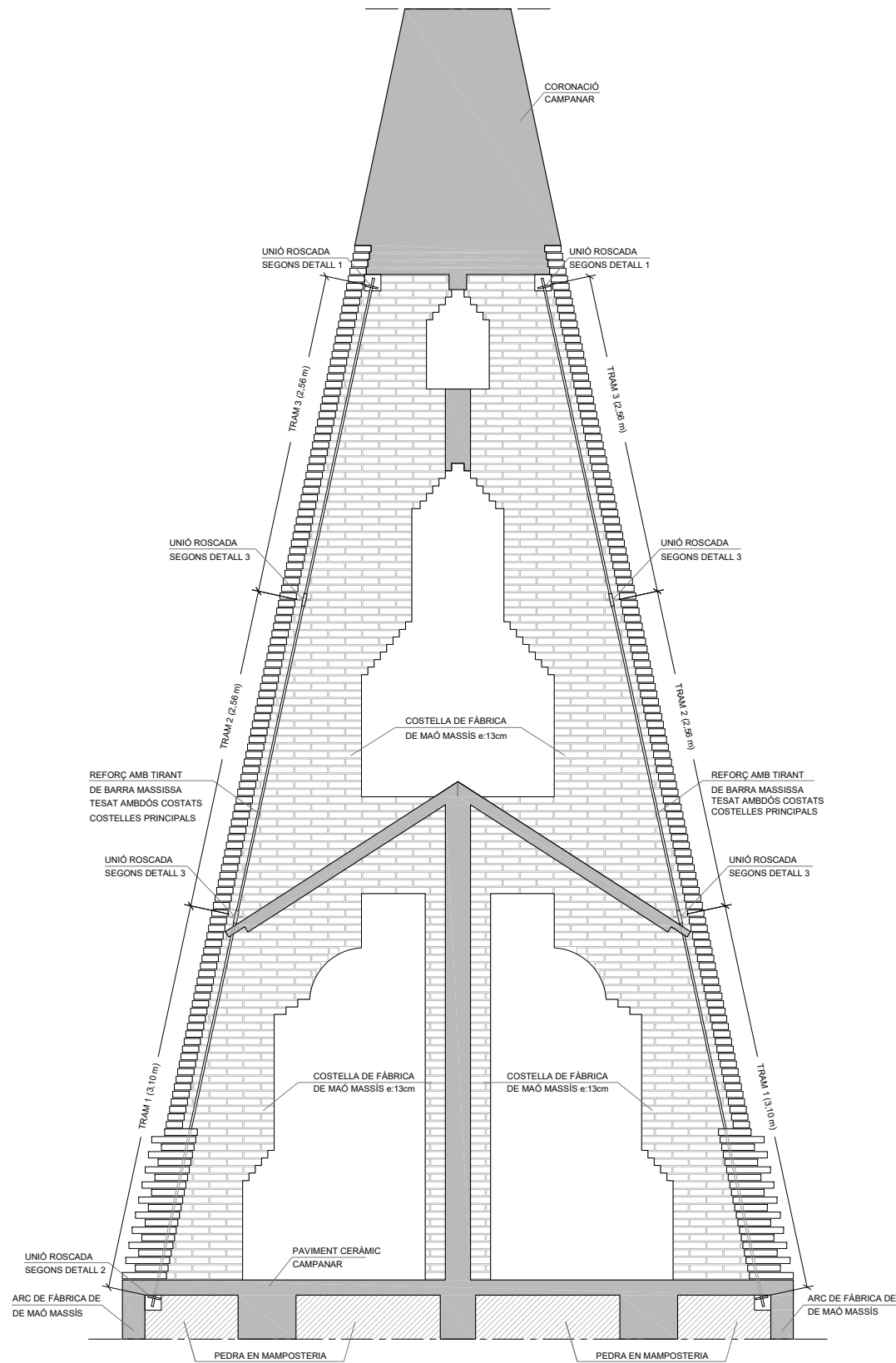
CLIENT
 ARQUEBISBAT DE
 TARRAGONA
 ESGLÉSIA DE VISTABELLA

Pl. del Dr. GASPÀ BLANCH
 VISTABELLA
 LA SECUITA, TARRAGONA

ARQUITECTE

SANTI PRATS I ROCAVERT

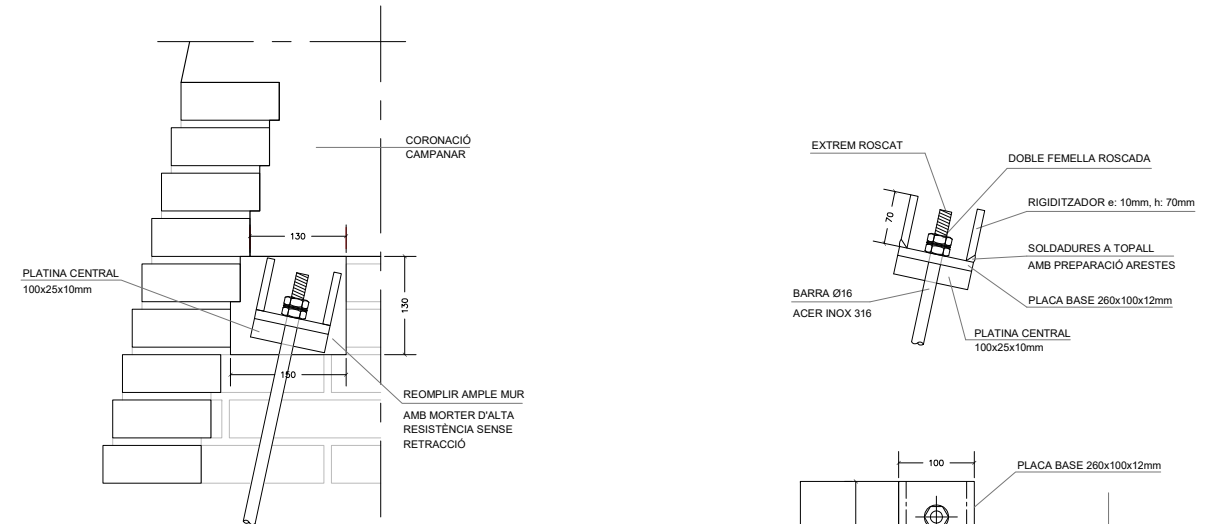
ALÇAT COSTELLES PRINCIPALS REFORÇADES (E: 1/50)



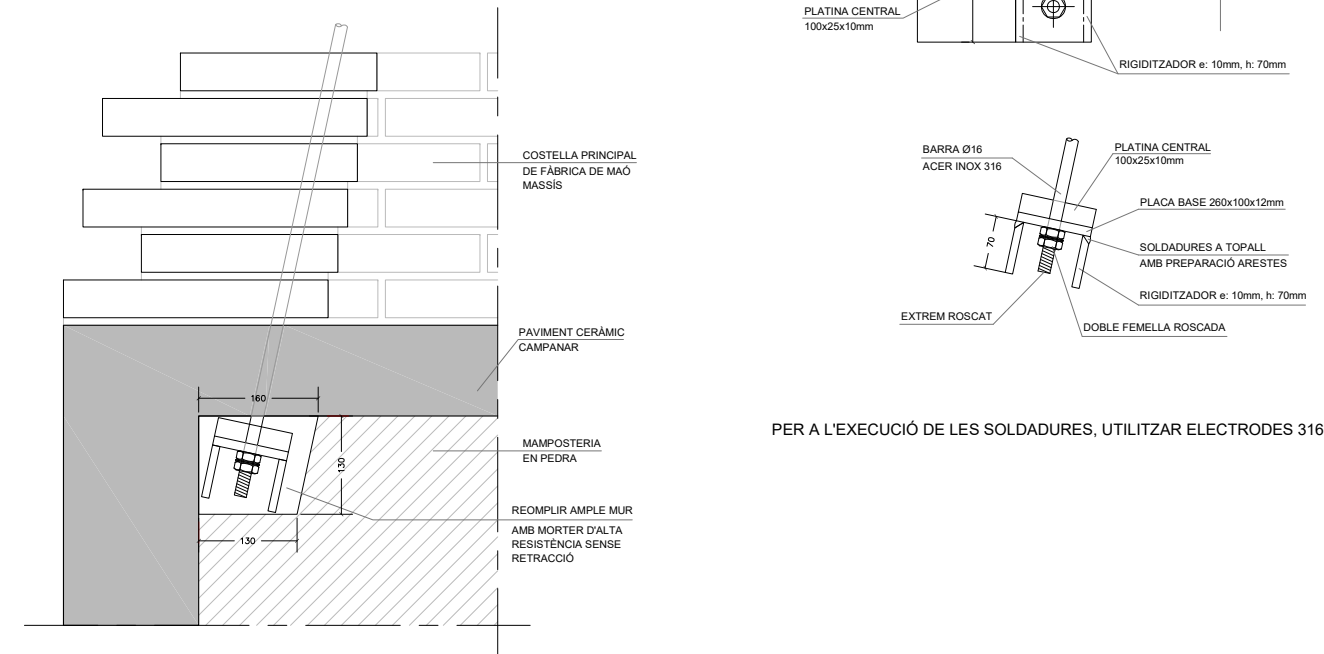
DEFINICIÓ PROCÉS CONSTRUCTIU:

1. Desmuntar la part superior del campanar (agulla, des del nivell 6 fins la coronació).
2. Extreure l'aplatat de rajola, així com els tirants de reforç existents i el morter de resines de protecció dels tirants.
3. Realitzat els forats per als ancoratges. deixar la superfície rugosa per a millorar l'adherència.
4. Col·locar les platines en els diferents nivells.
5. Col·locar els tirants per trams.
6. Tesar el tirants dos a dos (mateixa costella) seqüencialment, amb alternança de costelles. control del tesat mitjançant assaig amb galgues extensomètriques i tensòmetres.

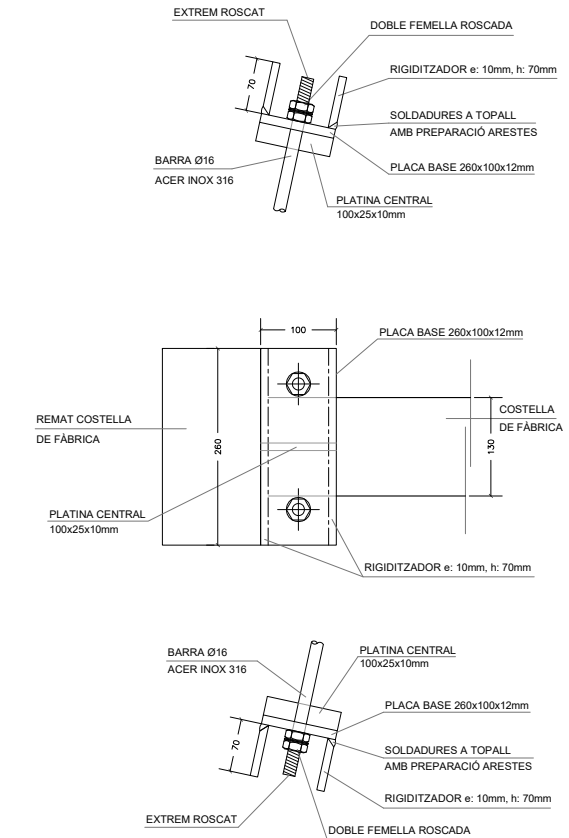
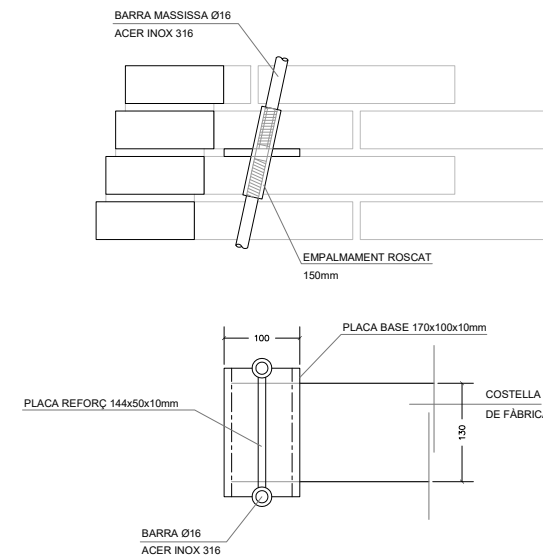
DETALL 1 ANCLATGE SUPERIOR ROSCAT (E: 1/10)



DETALL 2 ANCLATGE INFERIOR ROSCAT (E: 1/10)



DETALL 3 EMPALMAMENTS CENTRALS (E: 1/10)



PER A L'EXECUCIÓ DE LES SOLDADURES, UTILITZAR ELECTRODES B316

ACER REFORÇ ACTIU (TIRANTS)

Barres massisses: AISI 316

Límit elàstic	$f_{yk} \geq$	460	MPa
Resistència última	$f_{pu} \geq$	860	MPa
Mòdul elàstic	$E_s \geq$	193.000	MPa
Diàmetre barres	$d =$	16	mm

L'allargament per tram de tirant serà:

Tram 1:	6 mm
Tram 2:	4 mm
Tram 3:	2 mm

Nota: els allargaments s'han considerat per als mesos d'hivern o principis de primavera. En cas d'executar el sistema de reforç en els mesos d'estiu, consultar a D.F. les noves forces de tesat i allargaments dels tirants per tram.

Projecte Bàsic i D'Execució
Restauració de l'Església del Sagrat Cor de Vistabella
Església del Sagrat Cor de Vistabella
Municipi: La Secuita - 43765
Arquitectes: PRATS I ROCAVERT, SANTIAGO

Clients: ARQUEBISBAT DE TARRAGONA

Visat: 2015601421

Hash: WMIIMBI40j3k5y/0BB6WZLZB3TA=

Ref: COAC-2015601421-233991-01

Col·legi d'Arquitectes de Catalunya

Ref: COAC-2015601421-233991-01

DG I 06

INTERVENCIÓ
REFORÇ ESTRUCTURA

0 0.5 1

DIN A3 E: 1/50
DIN A1 E: 1/25

PROJECTE

BÀSIC I EXECUTIU
RESTAURACIÓ DE
L'ESGLÉSIA DEL SAGRAT COR
DE VISTABELLA

LA SECUITA, TARRAGONA
DESEMBRE 2015

CLIENT

ARQUEBISBAT DE
TARRAGONA
ESGLÉSIA DE VISTABELLA

Pl. del Dr. GASPÀ BLANCH
VISTABELLA
LA SECUITA, TARRAGONA

ARQUITECTE

SANTI PRATS I ROCAVERT