

**EPS**Escola Politècnica
Superior

Projecte/Treball Fi de Carrera

Estudi: Enginyeria Industrial. Pla 1994

Títol: MODELITZACIÓ NUMÈRICA D'UN SISTEMA DE DESCÀRREGA D'UNA COLUMNA DE LA CATEDRAL DE GIRONA MITJANÇANT EL MÈTODE DELS ELEMENTS FINITS (ANÀLISI NO LINEAL).

Document: MEMORIA I ANNEXOS

Alumne: Narcís Serra Font

Director/Tutor: Miquel Llorens Sulivera

Departament: Arquitectura i Enginyeria de la Construcció

Àrea: Enginyeria de la Construcció

Convocatòria (mes/any): Setembre 2009

1. INTRODUCCIÓ.....	3
1.1. Antecedents	3
1.2. Objecte.....	13
1.3. Abast del projecte.....	14
2. PLANTEJAMENT DEL PROBLEMA.....	16
2.1. Situació	16
2.2. Introducció	18
2.3. Sistema constructiu	19
3. MATERIAL EMPRAT EN LA CONSTRUCCIÓ DEL CLAUSTRE.....	21
3.1. Descripció de la pedra.	21
3.2. Característiques físico-mecàniques	22
4. ELEMENTS FINITS	23
4.1 Introducció al mètode dels elements finits	23
4.2. Característiques de l'element SOLID65	24
4.3. Tipus de no linealitat	25
4.3. Tipus de contactes	27
5. DADES DEL PROJECTE I DEL SEU AUTOR	29
6. MODELITZACIÓ DEL CLAUSTRE DE LA CATEDRAL DE GIRONA.....	30
6.1. Especificacions del tipus d'element i de les constants	30
7. MODELITZACIÓ DEL SISTEMA DE DESCÀRREGA.....	32
7.1 Model de càrrega d'un pilar amb contactes	34
7.1.1. Càrregues de la columna centrtal-exterior.....	35
7.1.2. Procés de creació del model	38
7.1.3. Condicions de contorn.....	38
7.1.4. Anàlisi dels resultats de la càrrega.....	39
7.2. Descàrrega de la columna	41
7.2.1. Anàlisi dels resultats de la càrrega.....	42

8. MODELITZACIÓ DEL LA GALERIA NORD DEL CLAUSTRE DE LA CATEDRAL DE GIRONA	43
8.1. Dades de partida	43
8.2. Dades conegudes	44
8.3. Modelització del cos de la galeria nord del clastre	46
8.4. Model amb capitells i columnes (tot una peça)	51
8.5. Model amb capitells i columnes (contactes)	53
8.6. Model amb capitells i columnes (contactes)	53
8.6.1. Determinació del mòdul de Young del Clastre	58
8.6.2. Anàlisi dels resultats	60
8.7. Canvi d'ús de la primera planta	67
8.8. Descàrrega del claustre	69
9. RESUM ECONÒMIC	72
10. CONCLUSIONS	73
11. RELACIÓ DE DOCUMENTS EN EL PROJECTE.....	75
12. BIBLIOGRAFIA.....	76

1. INTRODUCCIÓ

1.1 Antecedents

L'anàlisi pràctica habitual de les estructures es basa en mètodes que suposen un comportament lineal i elàstic. Quan es tracta d'anàlisi de continus la metodologia habitual es basa en el mètode dels elements finits, mentre que en el cas d'elements lineals (pòrtics, arcs) els programes de càlcul utilitzen els anomenats mètodes matricials.

Si bé en la majoria de casos l'anàlisi lineal és suficient i adequada, en determinades situacions es pot requerir una anàlisi més detallada que tingui en compte un comportament més ajustat a les lleis constitutives del material (no linealitats pel material) o que contempli la influència de les deformacions de l'estructura (no linealitats geomètriques). Aquests casos es poden donar quan es vol reproduir el comportament en servei d'un determinat element, explicar una patologia o fer una modelització.

1.1.1. Anàlisi de l'estructura de la façana nord del claustre de la Catedral de Girona:

En l'entorn del grup de recerca CIMEP de la Universitat de Girona s'han fet molts estudis i simulacions d'estructures, un primer estudi realitzat l'any 1999 pel Sr. Puig F. "Anàlisis estructural de la façana nord del claustre de la Catedral de Girona" [Ref.5], va concloure amb que les càrregues de l'estructura i de la possible nova planta a construir es distribueixen per l'estructura formant un arc de descàrrega. És a dir, que els pilars no suporten la part proporcional de l'estructura, solament aguanten una part del tancament. L'hipotètic arc de descàrrega finalitza en les pilastres laterals. En la *fig.1* queda representat aquest hipotètic arc i es veu com el seu començament i el seu acabament és en les pilastres.

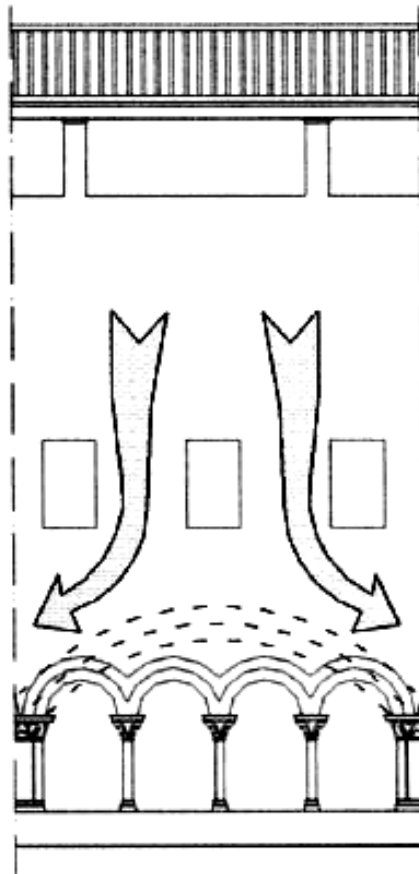


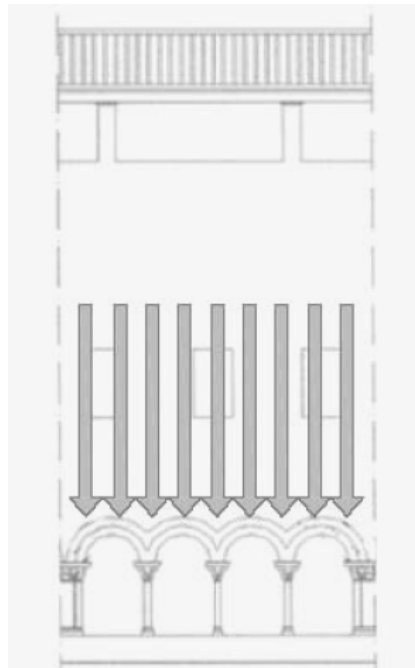
Fig. 1. Esquema de distribució de càrregues
per arc de descàrrega.

1.1.2. Anàlisi estructural aplicat a una construcció històrica:

L'any 2002 el Sr. Van Peteghem va elaborar un estudi analític de la façana nord de l'edifici "Techniques of structural analysis applied to historical constructions: Study of the cloister of the cathedral of Gerona" [Ref.7] i es va obtenir dades sobre les càrregues a que poden estar sol·licitats els pilars.

En aquest estudi es va elaborar un model d'elements finits d'una reproducció del claustre amb el programa SAP 2000. Un cop realitzat el model, es van fixar les condicions de contorn de l'estructura: punts de recolzament, pes propi, i forces exteriors entre d'altres.

Els resultats d'estats tensionals són els que es veuen en la *fig.3* de sota. L'estudi va concloure que no es formava un arc de descàrrega, com l'esquema de la *fig. 2*, tal i com s'havia suposat en un primer moment.



*Fig. 2.*Esquema de distribució de càrregues per àrees tributaries.

Però el que si es va corroborar és que les càrregues que arriben en els pilars eren molt més petites que les que hi arriben en les pilastres. Les càrregues que arriben en els pilars són de l'ordre de 7 Tn, i les que arriben a les pilastres són de gairebé 15 Tn. Cal dir però que totes aquestes conclusions estant basades en anàlisis numèrics que tenen com a condicions inicials hipòtesis aproximades a la realitat.

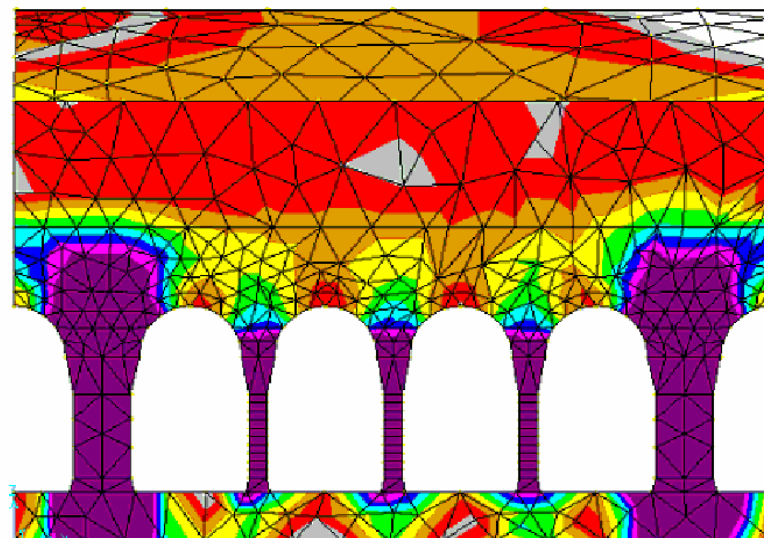


Fig. 3. Distribució tensions a l'estructura

Paral·lelament a aquests estudis se'n va elaborar un altre, "Proposta d'un sistema d'instrumentació complert per a la prova de càrrega del Claustre de la Catedral de Girona" [Ref.2], i una de les finalitats d'aquest treball era la d'estudiar les propietats mecàniques de la pedra de Girona.

En aquest treball es va crea models de l'estructura de pedra, del Claustre de la Catedral de Girona, a escala reduïda i es van sotmetre a un assaig a compressió al laboratori per tal d'obtenir una estimació molt aproximada del Mòdul de Young (E).

Es van realitzar tres assaigs amb tres provetes similars de la pedra de Girona, i es va arribar a estimar un valor del Mòdul de Young $E = 747.474,33 \text{ kg/cm}^2$.

1.1.3. Sistema de descàrrega del claustre:

El projecte realitzat al 2003 pel Sr. Xavier Aparició, va realitzar un primer disseny que proposava la idea per a descarregar les columnes dobles a través de dos puntals hidràulics inclinats fig. 4 , units per un cable d'acer. La proposta però no s'ajustava a la realitat i plantejava una sèrie d'inconvenients.

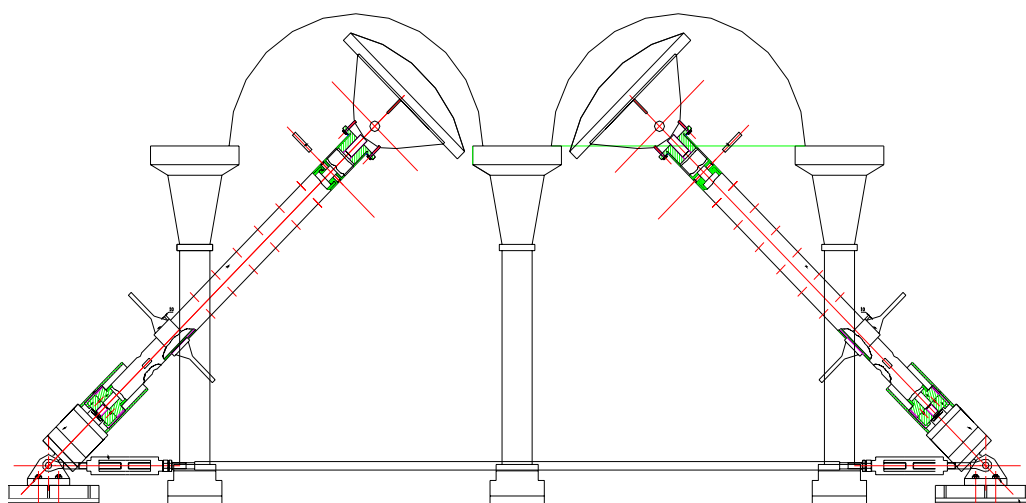


Fig.4. Sistema de descàrrega puntals inclinats.

1.1.4. Sistema de descàrrega del claustre:

Al 2005 es va proposar un muntatge que s'adequés a les noves condicions (Fig.5):

- Augmentar la carrega nominal que transmet els arcs de 15.000 kg a 55.000 kg.
- El perill de que el sistema es desestabilitzes , ja que la carrega no es reparteix uniformement
- Dissenyar un muntatge còmode, pràctic i econòmicament viable.

Així es va proposar un sistema compost per tres components bàsics: Una estructura metàl·lica acabada amb fusta que encofrarà l'arc i repartirà les carregues sense que hagi un canvi brusc de tensions i per tant no li creï patologies, Un puntal hidràulic encarregat de transmetre la força necessària per tal descarregar les columnes i Un sistema hidràulic que pugui subministrar la força necessària al puntal de forma controlada i segura, fig.5.

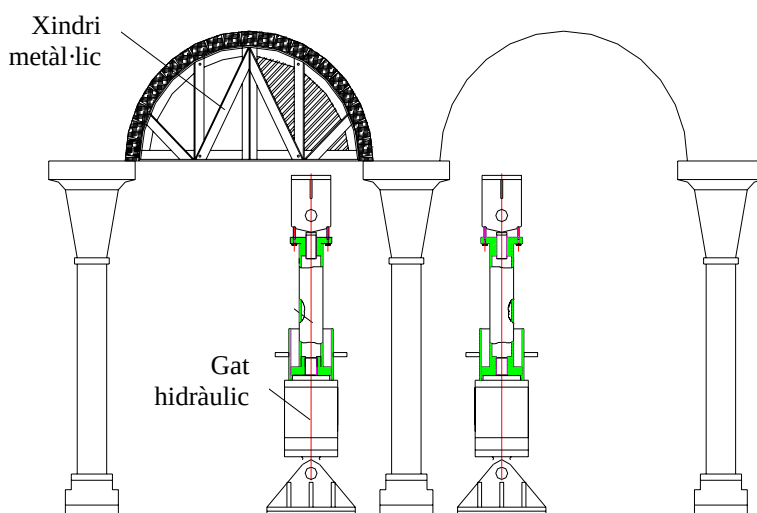


Fig.5. Sistema de descàrrega amb puntals vertical.

1.1.5. Proves de càrrega en el claustre:

Al febrer del 2006 es van els professors de la UPS Sr. Miquel Llorens i Sr. Xavier Velázquez van portar a la pràctica el sistema per a la descàrrega de les columnes de l'ala nord del claustre de la Catedral de Girona. En la figura 6 es pot veure el muntatge final i els esquemes dels muntatge del sistema d'adquisició de dades ne les fig.7 i 8.



Fig.6. Vista general del muntatge.

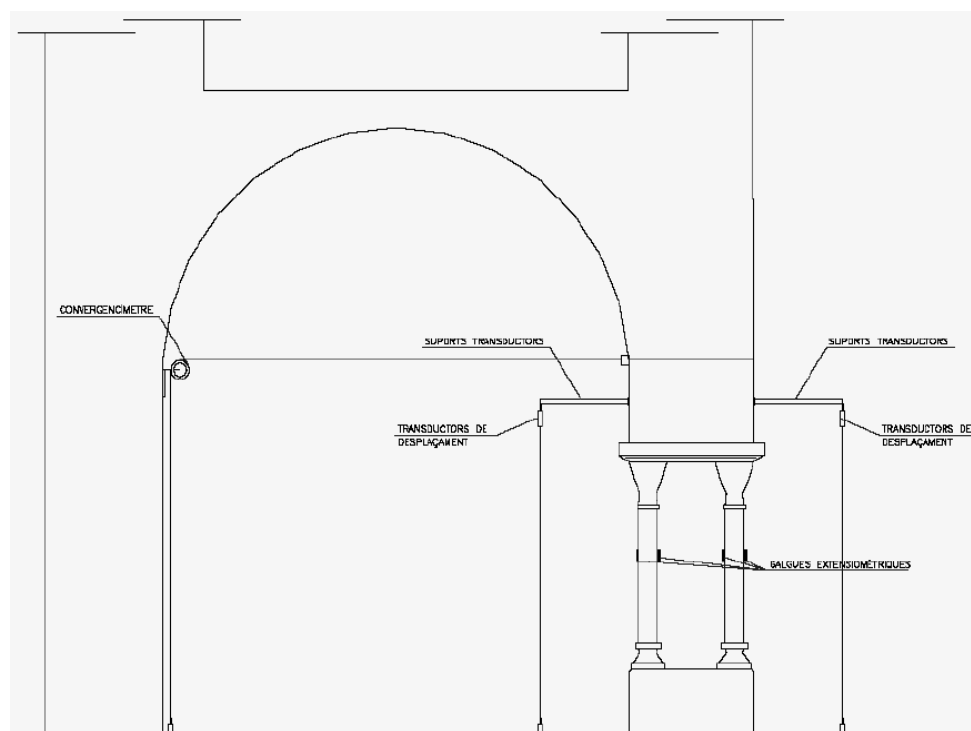


Fig.7. Esquema del muntatge general, secció.

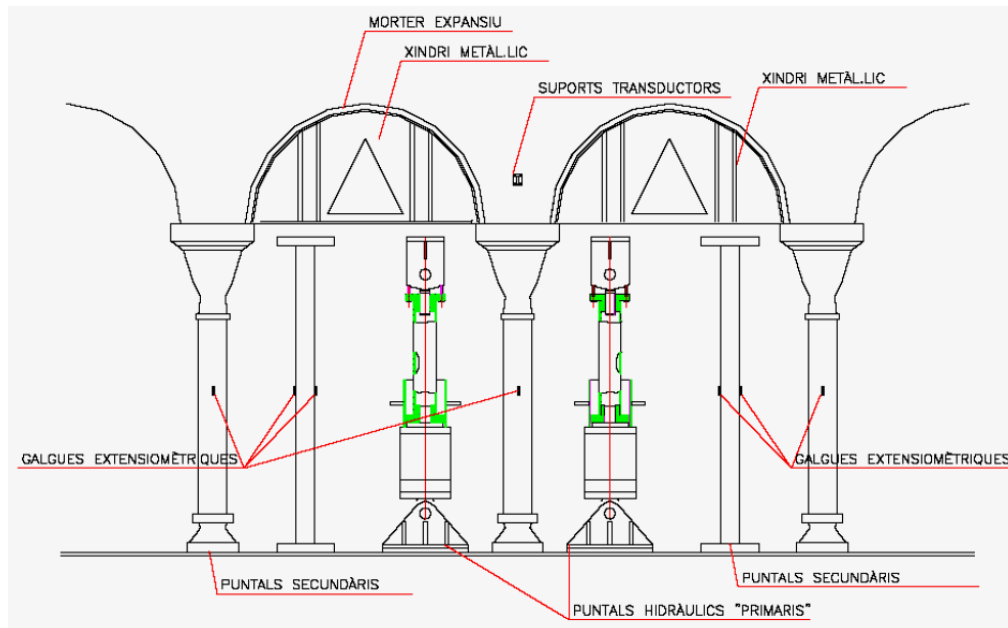


Fig.8. Esquema del muntatge general, alçat.

El procés de càrrega es va realitzar de forma progressiva, augmentant la llargada dels puntals hidràulics.

La prova finalitzava immediatament quan es donava alguna de les següents condicions:

- Quan l'allargament de les galgues tendia a zero i això implicués que l'allargament dels puntals hidràulics no comporti cap allargament a les columnes. Un cop arribats aquest punt, la càrrega totalment transmesa als puntals hidràulics.
- Quan algun dels testimonis de gruix col·locats a la pedra es trenqués. Això voldria dir que el sistema es mou i es pot posar en perill la seva estabilitat estructural.

1.1.5. Resultats de la prova de càrrega:

Al 2007 en el projecte “Proves de càrrega al claustre de la Catedral de Girona” del Sr. Àlex Salcedo Desplans [Ref. 6], es van publicar els resultats de les proves de càrrega de la galeria nord del claustre de la Catedral de Girona.

Per verificar experimentalment tots els supòsits realitzats anteriorment, i esmentats en aquest capítol, es va dissenyar un mecanisme, per a la prova de càrrega d'una de les parelles de pilars existents en el Claustre de la Catedral de Girona. Mitjançant sensors es van mesurar les deformacions dels pilars al descarregar-los i així es van poder determinar les càrregues total que arriben als pilars.

Complementant aquesta informació amb l'assaig de laboratori de les càrregues de ruptura de la pedra, és van determinar quines són les seccions mínimes que poden tenir les columnes, algunes molt malmeses, per resistir les càrregues.

En el quadre resum amb l'assignació dels canals dels diferents sistemes d'adquisició de dades fig. 9, ens podem fer una idea de la situació d'aquests:

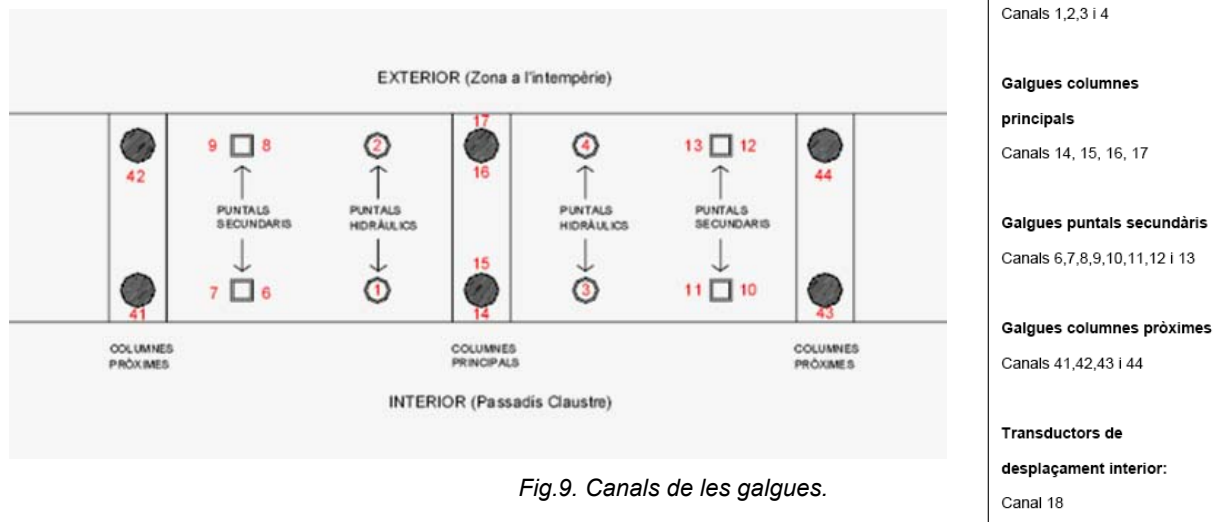


Fig.9. Canals de les galgues.

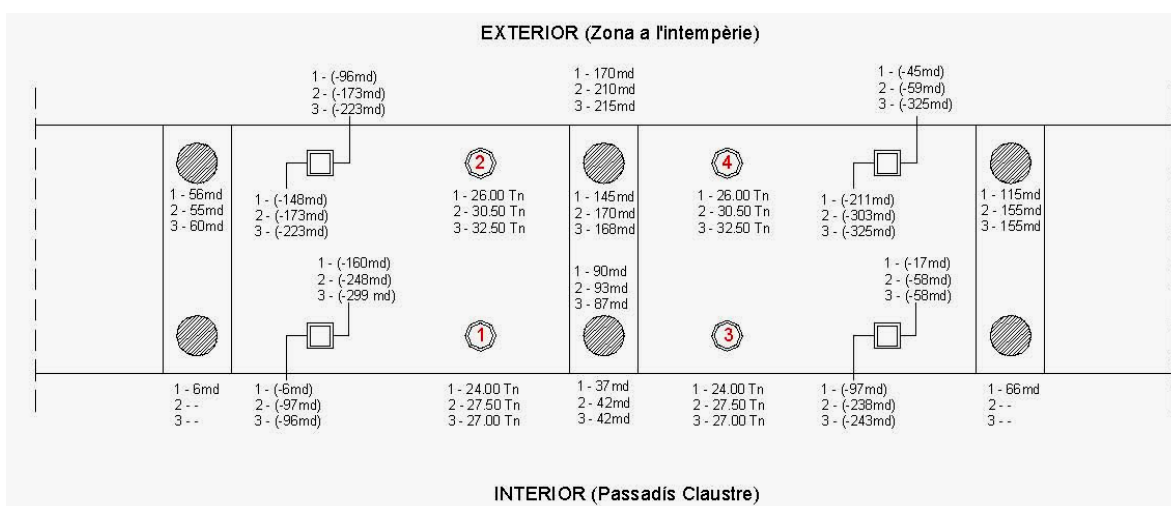
Els resultats obtinguts Fig.10 després de realitzar 3 proves de càrrega demostrava que les columnes exteriors suporten més càrrega que les columnes exteriors. Les microdeformacions aparegudes a les columnes exteriors, són superiors a les microdeformacions interior. Això explicava que les columnes exteriors es van allargar

molt més per estar totalment descarregades mentre que les columnes interiors es van allargar menys i per tant es van descarregar abans.

També es va veure que la part dreta del sistema (des de l'interior a l'exterior) suporta moltes més càrrega que la part esquerra. La conclusió que es va extreure d'aquest fet és que podria ser degut a un assentament diferencial dels fonaments entre les dues bandes, encara que no es va poder demostrar.

Així es parlava d'una doble asimetria dels sistema: asimetria de les columnes interiors i exteriors i asimetria del sistema de la part dreta a la part esquerra.

En el següent figura 10, en planta a on es pot veure un resum dels resultats obtinguts:



Prova	1	2	3
Càrrega puntal hidràulica exterior (Tn)	30	30,5	32,5
Càrrega puntal hidràulica interior (Tn)	24	28	26,5
Durada de la prova (min)	192	45	34
Intervals de càrrega (Tn)	2	2	2

Fig.10. Resum dels resultats. [Ref.6]

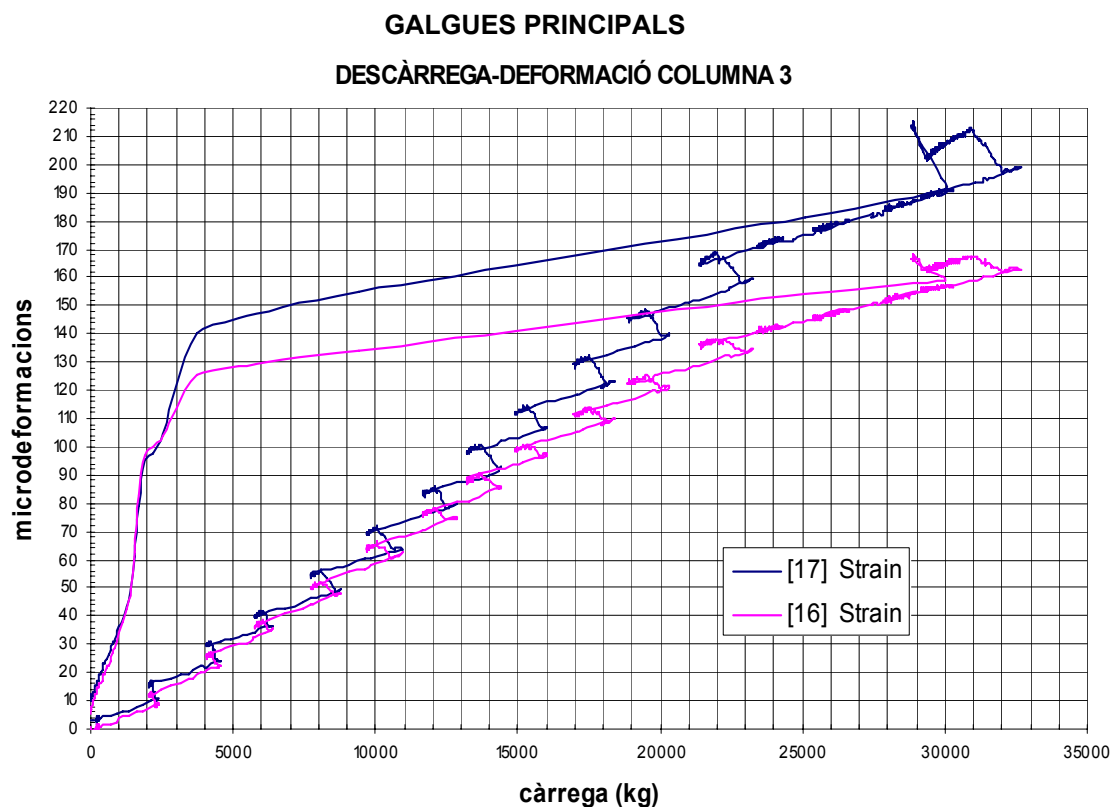


Fig. 11. Prova de càrrega. Deformació columna 3 en funció de la força de la carrega.

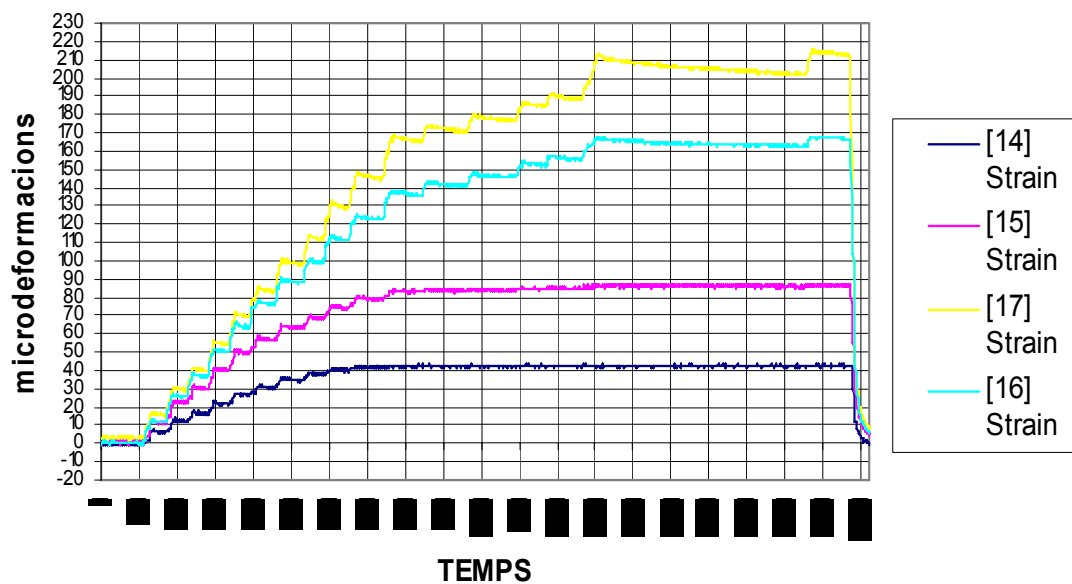


Fig. 12. Prova de càrrega. Deformacions (μd) de les galgues principals de les columnes 3 i 4 en funció del temps (s).

1.2 Objecte del projecte

L'objecte d'aquest projecte és l'estudi del comportament del conjunt columna, voltes i arcs del Claustre de la Catedral de Girona i del comportament del conjunt en una situació de descàrrega d'un pilar mitjançant el mètode dels elements finits tenint en compte característiques de no linealitat en els materials i les no linealitats creades pels contactes entre cossos.

Aquest treball s'ha realitzat amb la versió docent del programa ANSYS disponible al Departament D'EMCI de la Universitat de Girona emprant l'element SOLID65, en principi adequat per a l'anàlisi no lineal d'elements com la pedra de Girona. Es consideraran les no linealitats degudes al material.

- I en una primera part del treball es simularà el sistema de descàrrega d'un pilar del claustre que s'haurà fet amb anterioritat amb la possibilitat de comparar les dades reals obtingudes in situ amb les dades del model proposat.
- En la segona part del treball, en els edificis de gran importància històrica com en el cas de la Catedral de Girona, es molt difícil aconseguir realitzar estudis experimentals com el que es va realitzar l'any 2007 amb les proves de càrrega del l'ala nord del Claustre de la Catedral de Girona i al gran perill per a la construcció. S'ha intentat assolir un model no lineal, de tot el conjunt de la galeria nord del claustre de la Catedral de Girona, utilitzant una metodologia inversa des dels resultats reals obtinguts amb l'estudi de camp per obtenir un model el més similar a aquests valors experimentals [Ref. 6].

Un cop obtingut un model que es creu que s'ajunta força a la realitat es pot analitzar la creació, o no, d'un arc de descàrrega redistribuint les càrregues cap a les piles, com es proposava en algun dels estudis realitzats amb anterioritat [Ref. 5].

En els dos casos el comportament no lineal comportarà la utilització d'estratègies iteratives adequades al cas a resoldre aplicant les eines de resolució de no linealitats que incorpora el paquet informàtic.

Parts d'aquest projecte potser que quedin documentalment sobredimensionades, degut a la descripció de procediments realitzats (Imprimir Pantalla). S'hi han incorporat per tenir constància dels objectius del projecte així com tenir documentació per posteriors revisions o recordatoris. No és la intenció del projectista donar la impressió de col·locar paperassa sense sentit.

1.3 Abast del projecte

L'abast del projecte es pot dividir en diversos camps:

- Tots els estudis realitzats fins ara s'han basat amb càlculs lineals i no tenint amb compte la modelització amb volum. Per tal de realitzar la modelització del claustre de la catedral de Girona amb el programa ANSYS, tingut amb compte les no linealitats del material per determinar la validesa del comportament del material s'han realitzat estudis anteriors dedicats específicament a verificar els models de comportament del material que incorpora el programa i la influència de la variació dels diversos paràmetres emprats en la seva caracterització (Ref.5 i Ref.7).
- Realitzar una verificació dels models de comportament del material que incorpora el programa, en especial l'element SOLID65 que és adequat per a l'anàlisi no lineal d'elements no lineals com són la pedra de Girona, i la influència de la variació dels diversos paràmetres emprats en la seva caracterització.
Aquest anàlisi s'ha fet mitjançant la modelització d'un element molt simple, aplicant-li diferents situacions de sol·licitacions.
- En una primera part del treball es simularà el sistema de descàrrega d'un pilar del claustre, el més desfavorable, utilitzant les característiques no lineals del

material i utilitzant les no linealitats produïdes degudes als contactes. Per tal de crear les contactes hem tingut d'aprendre de forma autodidacte ja que no existeix gaire informació.

Un cop generat tot el model del sistema de descàrrega aquest es pot comparar amb les dades reals obtingudes in situ.

- En una segona part del treball es realitzarà un model no lineal del claustre de la catedral de Girona, de forma inversa ja que coneixem les dades reals [Ref.5] i s'observarà si en el model es crea un arc de descàrrega, o per lo contrari no.

S'usarà aquest model per simular la prova de descàrrega que es va fer per una altre grup de recerca amb paral·lel i col·laboració amb l'elaboració d'aquest projecta. Per finalment fer una comparativa del resultats obtinguts amb la prova real i els resultats del model.

2. PLANTEJAMENT DEL PROBLEMA

2.1 Situació de l'edifici

La Catedral de Girona es troba situada a la part nord - oriental de Girona, i delimita pel Jardí de la Francesca al nord, pel carrer del Bisbe Cartenyà a l'est i pel convent del Sagrat Cor de Maria a l'oest.

Dintre de les seves pertinences, just al nord de la Catedral hi trobem el Claustre, que tal i com es veu en la *fig. 13*, té una planta amb forma trapezoïdal.

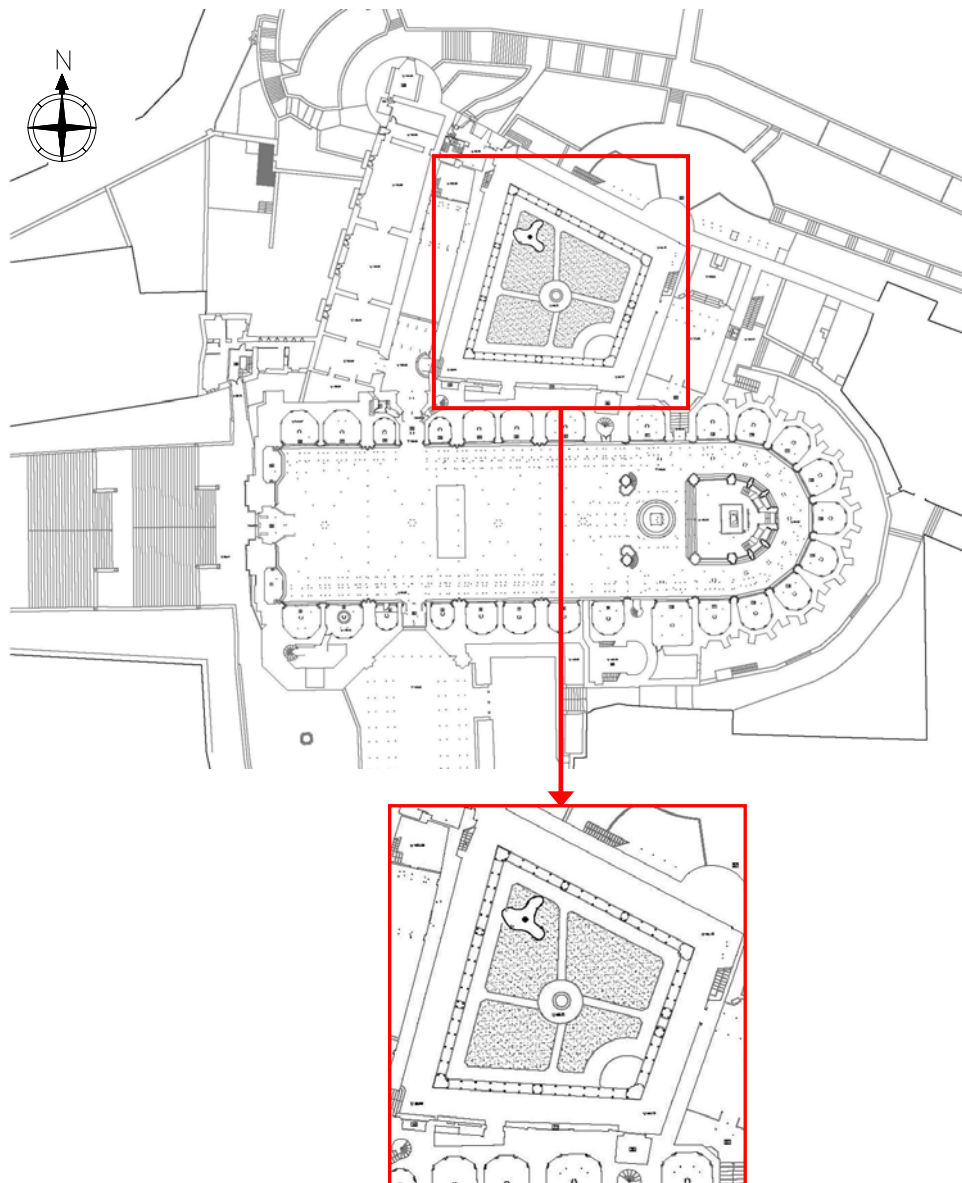


Fig.13. Planta de la Catedral i del Claustre

De les quatre façanes que formen el Claustre, només la façana nord serà objecte d'estudi.

El claustre de la Catedral de Girona, està emplaçat en el costat nord de l'església, està considerat com un dels més importants de Catalunya. És obra del segle XII, de planta trapezoïdal irregular.

Claustre

El primer recinte claustre segurament fou construït abans del 1117, any en el que es va acabar de construir la torre romànica anomenada de Carlomagno que es troba en la galeria sud. Aprofitant dues galeries edificades, any en el que un bisbe anomenat Berenguer va firmar:

"In claustrum canonicorum Sanctae Mariae"

En contra del que era habitual en els claustres romànics, es va instal·lar la sala capitular en la banda sud contiguous al mur de l'església. Banda que es va dedicar a dormitori mentre que en l'oest es va ubicar la canonge. En el projecte de 1019 estava ben definida l'estructura amb doble alçada que salvava el desnivell que encara avui dia es pot observar.

En els últims anys del segle XII es va replantejar el claustre amb el podi sobre al que descansen les arcades amb les columnes i els capitells molt treballats. Les quatre parts del claustre estaven ja ben dissenyades formant l'original pati de perfil trapezoïdal amb galeries de longituds diferents.

En el segle XIV es van modificar bastant els espais de les galeries, quan es va organitzar sobre la muralla l'arxiu capitular, al 1532 es va construir la capella de la Verge dels Claustres en el lloc de l'antiga canonge i el XVIII es va construir una nova sala capitular.

Descripció arquitectònica i artística

El claustre està construït per quatre galeries desiguals en mides i amb el número de columnes i piles. Les columnes són aparellades i els seus capitells estan treballats amb diferents temes. La galeria sud, est i oest estan cobertes amb volta de quart de canó, mentre que la galeria nord és de mig canó. Els pilars i piles foren adornats amb frisos de temes religiosos que segueixen un fil argumental i també amb temes vegetals, quotidians i zoomorfs.

Galeria Nord

Aquesta galeria fou la última a construir-se per la qual cosa amb la seva construcció es va acabar de tancar el claustre. Avança paral·lela a la muralla i condicionada per aquesta. Fa uns 21,60 m. Es va cobrir amb volta de canó i amb un teulat a dues aigües per quedar fora de la construcció anterior (les altres tres parts tenen volta de quart de cercle i coberta amb una sola pendent).

Columnnes

Són idèntiques en totes les galeries, amb una petita diferència d'ornamentació en les galeries sud. Sobre un prisma quadrat es recolzen les motlures separades. En els angles del prisma estan treballats les tradicionals urpes que en ocasions es transformen amb caps de llops, exceptuant la galeria sud en la que es veuen aus, mosteles, granotes i felins.

Frisos i capitells

Els frisos decorats envolten els pilars a una mateixa altura en cada un d'ells. En general els capitells es poden classificar com de tipus corinti clàssic, amb l'excepció de cinc capitells de la galeria sud i dos de la nord que es va realitzar en els segles XV i XVI per a substituir els antics que estaven molt malmesos.

2.2 Introducció

Aquest projecte ens ocupa l'estudi de la façana nord del Claustre de la Catedral de Girona. Primer de tot cal saber que es vol donar un nou ús al recinte de la primera planta de la façana nord del Claustre i s'ha de verificar si les noves sobrecàrregues que es produiran podran ser absorbides per l'estructura de paret de pedra existent ja que aquest tenen una importància històrica rellevant. En la fig. 14 es pot veure la planta del claustre de la Catedral de Girona.

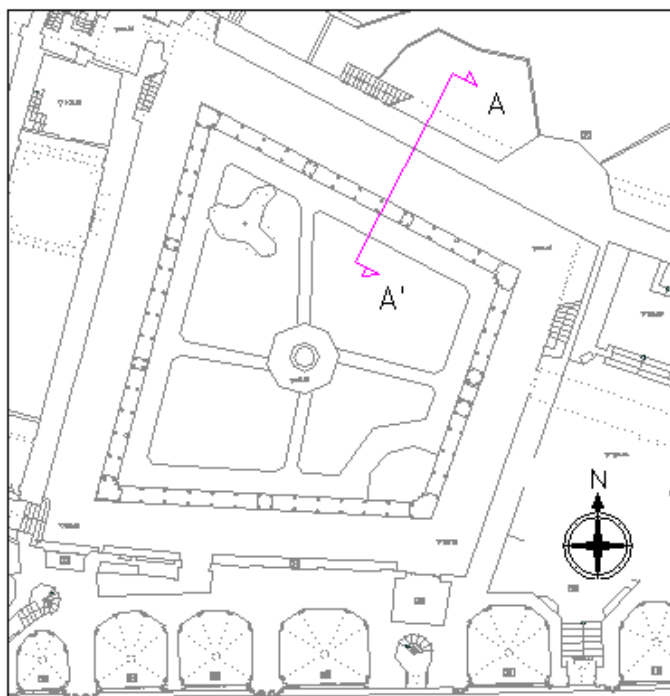


Fig. 14. Planta del Claustre

2.3 Sistema constructiu

La tipologia constructiva de la zona nord del claustre és diversa. Els porxos estan formats per arcs de mig punt, que descansen sobre parells de columnes i a les cantonades, i cada tres, quatre o cinc columnes, trobem les pilastres. A la planta baixa l'element sustentant és una volta de canó. Igualment succeeix a la planta primera, però a la segona planta hi ha una coberta formada per unes encavellades de fusta. Si observem la *fig. 15* ens farem una idea més representativa de la tipologia constructiva de la façana nord del Claustre.

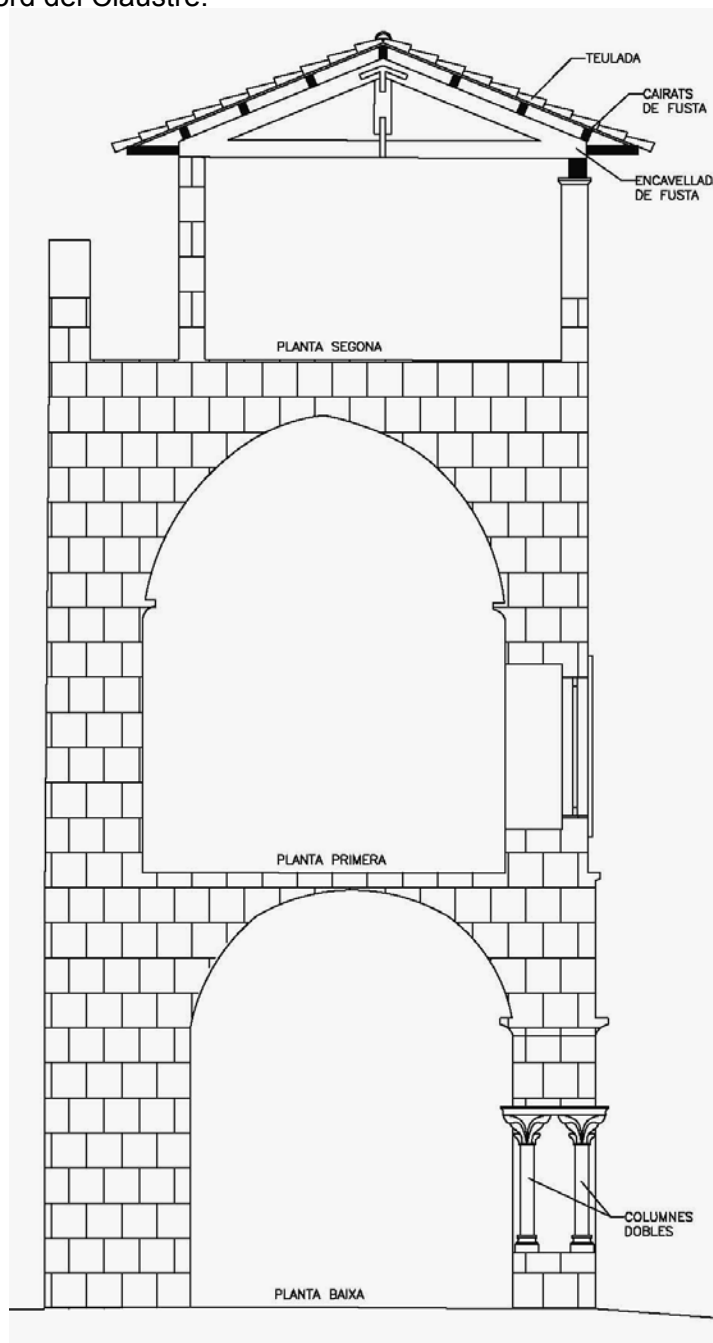


Fig. 15. Secció de la galeria nord del claustre

La volta de la planta baixa es recolza en un mur i en l'estructura de pilars i columnes dobles. A la planta primera la volta es recolza en dos murs de 0.95 m. El mur interior disposa de finestres situades de manera continua tal com s'observa a la façana del claustre representada en la *fig.16*, la tercera planta disposa d'una estructura de d'encavellades i cairats de fusta com a sostre de coberta. Aquestes bigues es recolzen en un mur per la part nord, i per la part sud, per d'altres cairats que descarreguen sobre pilars amb un intereix de 4,30 m. Sobre els cairats de fusta hi ha unes llares, i la coberta està realitzada amb teula àrab.

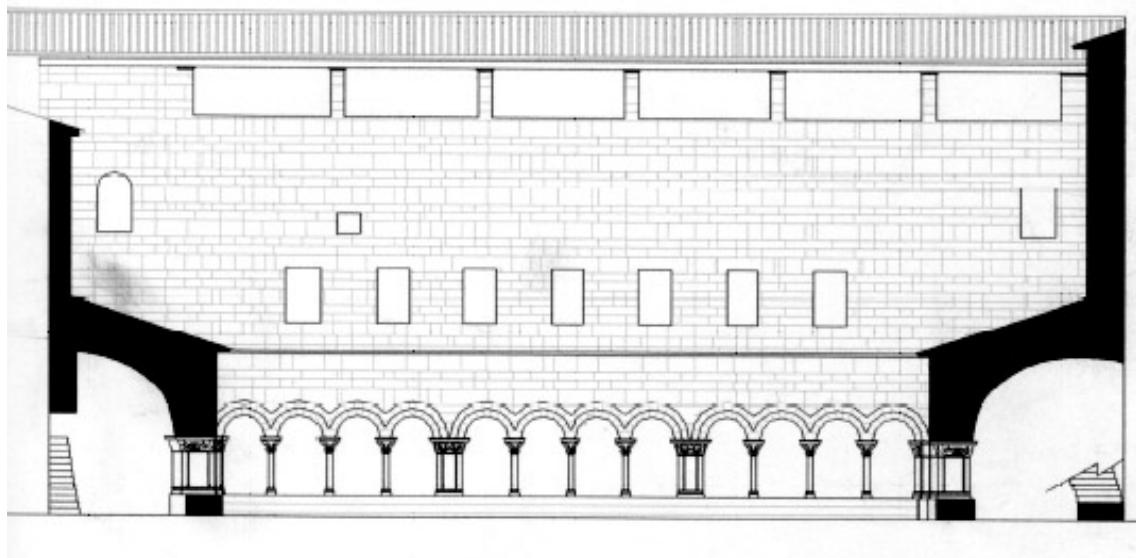


Fig.16. Façana nord del claustre.

3. MATERIAL EMPRAT EN LA CONSTRUCCIÓ DEL CLAUSTRE.

3.1. Descripció de la pedra.

La pedra de Girona és una roca calcària i, com a tal, en la seva composició mineral hi domina el carbonat càlcic. Pertany al grup de les roques sedimentàries, és a dir, procedeix de la transformació d'un sediment en roca. El camí que segueix un sediment quan es converteix en roca comporta diversos processos entre els quals destaquen la compactació, la pèrdua d'aigua i la fonamentació.

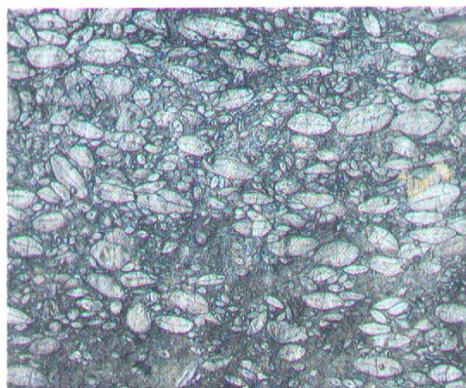


Fig.17 La pedra de Girona

La pedra de Girona té una coloració grisa blavosa en les superfícies acabades de trencar. Presenta nombrosos fòssils, especialment nummulits, que li atorguen una textura pigallada de blanc, com es pot observar a la Fig.17.

El nom “pedra de Girona” amb què coneixem aquesta roca prové del fet de trobar-se i haver-ne explotat des fa molt temps a les rodalies de la ciutat de Girona. L'elevat contingut de nummulits d'aquesta formació geològica fa que, amb independència del lloc on es trobi, també s'anomeni arreu “calcària nummulítica”.

A nivell geològic, la pedra de Girona té el seu origen en el dipòsit de carbonats i restes d'organismes en el fons d'un mar poc profund que a mitjans de l'època oceànica (entre 40 i 50 milions d'anys) ocupava aquestes i altres zones. En aquell mar es donaven unes condicions ambientals i climàtiques idònies perquè hi visquessin entre d'altres una munió d'organismes unicel·lulars anomenats nummulits.

Els fòssils de nummulits són els innegables protagonistes de la pedra de Girona. Aquests deixen en un segon terme al que es refereix a importància als altres fòssils.

En més o menys contingut sempre podem observar a simple cop d'ull la presència de formes rodones o el·líptiques de colors blanquinosos d'aquests organismes petrificats.

3.2. Característiques físico-mecàniques (1)

El material emprat en la construcció de les columnes del claustre és la pedra de Girona. Aquest material presenta les característiques indicades a la, que s'adjunta a continuació.

Característiques físico-mecàniques de la pedra de Girona	
COMPOSICIÓ (segons centres d'extracció)	Calcita del 80 al 90 % Feldespat del 5 al 10% Quars < 5% Dolomita < 3%
COLOR:	Color en fractura fresca: blau grisós. Color d'alteració: ocre crema.
ESTRUCTURA / TEXTURA	Compacta a granular (en funció del contingut fossilífer).
FRACTURA	Plana, amb tendència col·loïdal.
DENSITAT MITJANA (massa volumètrica):	2,70 g/cm ³
COEFICIENT D'ABSORCIÓ	0,90% (capacitat d'absorció baixa). 50% del total en 16h. (absorció lenta)
POROSITAT	0,30%.
DURESA MITJANA	3,0 a 3,5 (l'escala de Mohs).
RESISTÈNCIA MECÀNICA A LA COMPRESSIÓ (σ_{uc})	732 kg/cm ²
RESISTÈNCIA MECÀNICA A FLEXIÓ	300 kg/cm ²
MÒDUL DE YOUNG	747474,33 Kg/cm ²
RESISTÈNCIA MECÀNICA AL DESGAST PER FREGAMENT	2,41mm
RESISTÈNCIA A L'IMPACTA:	45 cm.

Dades obtingudes del llibre "La pedra de Girona, Girona itineraris" [Ref. 4].

La resistència a tracció segons el llibre "Piedra, ceràmica y vidrio" [Ref.1]. La resistència tracció es pot aproximar, per un mòdul de Young entre 7 i $11 \cdot 10^5$ kg/cm²:

$$\text{Resistència compressió} = 10 \cdot \text{Resistència a tracció}$$

Llavors podem dir que:

$$\text{RESISTÈNCIA MECÀNICA A TRACCIÓ } (\sigma_{ut}) = 73,2 \text{ kg/cm}^2$$

4. ELEMENTS FINITS

4.1. Introducció al mètode dels elements finits

El Mètode del Elements Finites (MEF) consisteix bàsicament en transformar un sistema físic real en un altre sistema, un model amb un nombre finit d'incògnites, relacionades entre sí per elements de mida finita.

Per tant, aquest model creat, serà una idealització matemàtica del sistema real inicial. Si no es coneix, o com a mínim s'intueix, com serà el comportament del sistema real, la modelització es podrà fer molt complicada o fins i tot impossible. D'igual manera, hi hauria casos en què la modelització no seria fiable, al no saber si els resultats obtinguts són correctes o no.

Un model creat pel MEF està format per ELEMENTS i NUSOS:

- Un **ELEMENT** és “una representació matemàtica matricial, anomenada matriu de rigidesa, de la interacció entre els graus de llibertat d'un conjunt de nodes” (Drs. Juan José del Coz Díaz i Fco. José Suarez Domínguez – Universitat d'Oviedo) . Pot ésser puntual, lineal, superficial, volumètric, etc.

Els elements estan connectats entre sí a través dels nusos, i és a través d'aquestes connexions que la informació passa d'un element als elements que hi estan connectats.

- Un **NUS** (o **NODE**) és una localització en l'espai, determinat per les seves coordenades en X, Y i Z. Cada nus té uns certs Graus de Llibertat (G.d LL.) que determinen la resposta del camp, i està afectat per unes determinades accions del sistema físic (forces, condicions de contorn, etc.)

Concretament en un sistema estructural, que és el que s'estudia en aquest projecte, hi ha 6 G.d LL. (3 translacions i 3 rotacions), i les condicions de contorn inclouen, bàsicament, restriccions de desplaçaments, càrregues aplicades als nusos (forces, pressions, càrregues volumètriques, inèrcies, etc.) i temperatures (en aquest projecte no s'estudien ja que no hi ha variacions de temperatura).

L'operació de discretització d'una determinada forma geomètrica en tot un conjunt d'elements, connectats entre sí per nusos, s'anomena MALLAT.

4.2. Característiques de l'element SOLID65

L'element SOLID65, emprat en aquest treball, s'utilitza per modelitzar sòlids en tres dimensions amb o sense barres de reforç. Els sòlids discretitzats amb aquest element són capaços de fissurar-se en el cas de tracció i de mostrar aixafament en el cas de compressió.

En usos concrets, per exemple, la capacitat sòlida de l'element es pot utilitzar per modelitzar el formigó mentre que la del reforç es pot fer servir per fer el model de les barres d'acer. Altres casos en que aquest element és aplicable serien compostos reforçats (tal com fibra de vidre) i materials geològics (com per exemple una roca).

L'element està definit per 8 nodes que contenen 6 graus de llibertat cadascun d'ells, 3 de desplaçaments, traduïts als eixos X, Y i Z i 3 de rotacions respecte aquests tres eixos. A més es poden definir les especificacions de fins a tres tipus de reforç diferents.

El model de material *Concrete* que incorpora aquest element és similar al dels altres elements destinats a modelitzar sòlids en tres dimensions però amb la característica addicional que inclou les capacitats de fissuració i aixafament del material.

L'aspecte més important d'aquest element és el tractament de característiques no lineals del material. El model *Concrete* és capaç de fissurar-se en les tres direccions ortogonals, patir un aixafament, deformar-se plàsticament i patir fluència.

Els reforços que es poden introduir als models tenen capacitat de sofrir tracció i compressió però no esforços tallants. També tenen la capacitat de deformació i fluència plàstica. A la Fig. 18 es mostra gràficament les característiques de l'element SOLID65.

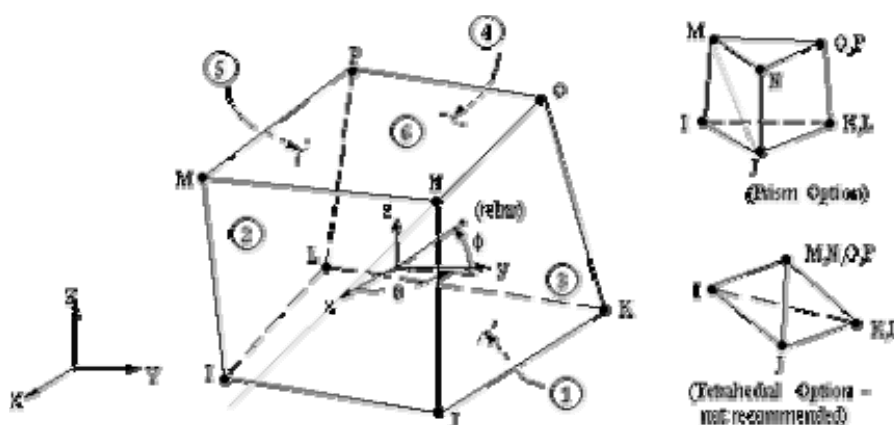


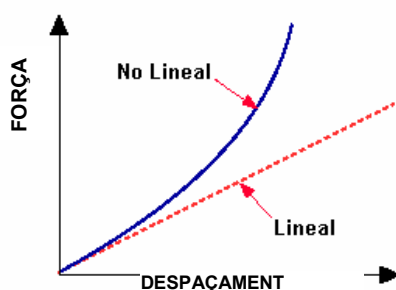
Fig. 18. Característiques del SOLID65

Una vegada entrats els paràmetres corresponents el programa ho tracta linealment fins arribar a un límit de ruptura. Quan s'assoleix aquest límit el material es trenca fràgilment.

Per complementar aquesta modelització hi ha la opció de definir a les característiques del material una corba tensió - deformació no lineal deguda a la compressió. Aquesta es defineix a través de la opció *Multilinear Elastic*. L'actuació del programa en aquest cas a tracció es la mateixa que en el cas *Concrete sol*, però a compressió, en comptes d'actuar linealment fins arribar al límit de ruptura, segueix la corba introduïda en les característiques del material.

4.3. Tipus de NO linealitat

L'anàlisi lineal assumeix que la relació entre carregues i desplaçaments resultants és lineal, és a dir, es compleix el principi de superposició: si es duplica la magnitud de la càrrega s'obté el doble de resposta del model (desplaçament, deformacions i tensions resultants), fig.19. Totes les estructures reals es comporten de forma no lineal a partir d'un cert nivell de càrrega. En molts casos, un anàlisi lineal pot ser adequat, però en altres molts casos la solució lineal produirà resultats erronis, en aquests casos s'haurà de realitzar un anàlisi no lineal.



Diferència de la resposta entre Anàlisi
Lineal i No Lineal

Fig. 19. Comparativa anàlisi lineal i no lineal.

Les situacions de no linealitat que es poden presentar en els problemes reals són:

Anàlisi No Lineal per la Geometria ; En l'anàlisi no lineal per elements finits, una important font de no linealitats es deu a l'efecte dels grans desplaçaments en la configuració geomètrica global de l'estructura. En anàlisi lineal els desplaçaments induïts són molt petits, de tal forma que s'ignoren els canvis de rigidesa de l'estructura causats per les carregues. En canvi, les estructures i components mecànics amb grans desplaçaments poden experimentar importants canvis en la geometria degut a que les carregues induïdes per la deformació poden provocar

una resposta no lineal de l'estructura en forma de rigidització (*stress stiffening*) o estovament (*stress softening*). Per exemple, les estructures tipus cable (fig 20) en general mostren un comportament de rigidització a l'augmentar la càrrega. En canvi, les estructures en arc primer pateixen un ablaniment seguit d'una rigidització per la tensió, un comportament àmpliament conegut com a vinclament "*snap-through snap-back*":

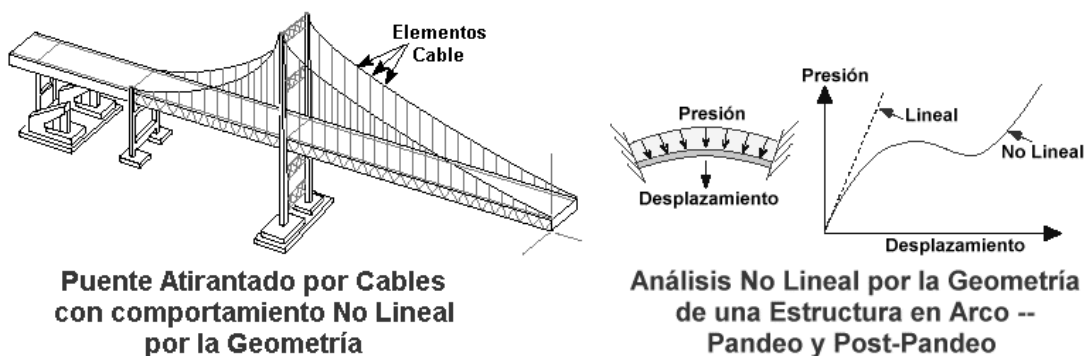
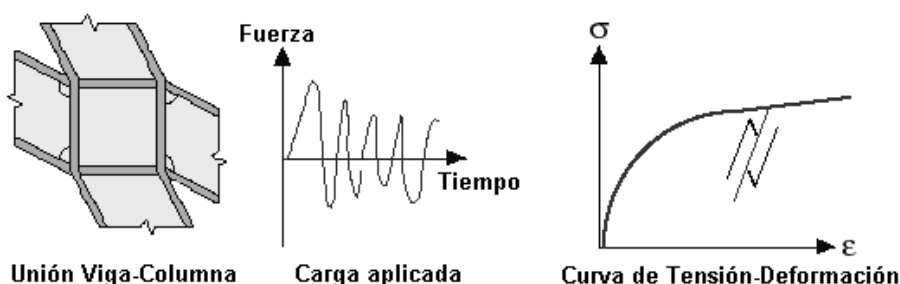


Fig. 20. Anàlisi no lineal per la geometria.

Anàlisi No Lineal pel Material : Una altre important causa de no linealitat és conseqüència de la relació no lineal existent entre tensió i deformació. Aquesta situació succeeix quan el material no segueix la Llei de Hook, és a dir, les tensions no són directament proporcionals a les deformacions. Alguns materials es comporten linealment només si les deformacions són molt petites, altres materials en canvi segueixen comportaments completament diferents. Existeixen diferents factors causants del comportament no lineal del material, per exemple la dependència de la corba de tensió-deformació del material de la història de carregues (com en els problemes amb plasticitat), la duració de la càrrega (anàlisi de fluència -- creep) o la temperatura (problemes termo-plàstics). Un exemple de comportament no lineal pel material és el cas de plastificació de la unió viga-columna durant un terratrèmol (fig.21) :



Carga y Descarga de la Unión Viga-Columna bajo Cargas Dinámicas

Fig. 21. No linealitat pel material.

Anàlisi No Lineal per Contacte: És un cas especial de problemes no lineals que té res a veure amb el canvi de naturalesa de les condicions de contorn en l'anàlisi d'estructures en moviment. Aquesta situació apareix en l'anàlisi de problemes de contacte. Exemples de càlcul no lineal amb contacte són els següents: estructures que són colpejades durant un terratrèmol (fig.22), contacte entre dents d'un engranatge, unions cargolades, i xocs entre cossos en contacte. L'avaluació de les condicions de contorn de contacte no lineals (nodes, línies o superfícies) se realitza mitjançant elements GAP de contacte:

Análisis No Lineal por Contacto
al golpearse dos estructuras

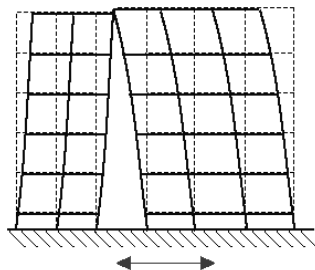


Fig. 22. No linealitat per contacte.

4.4. Tipus de contactes

Hi ha diferents contactes per a definir el contacte entre cossos. Els principals tipus de contactes són:

Bonded: Aquest és el qui hi ha per defecte. Aquest tipus de contactes no permeten ni lliscar les superfícies de contacte ni que es separin. La separació (*gap*) serà nul·la i no té en compte la penetració inicial.

No separation (sense separació): Aquest tipus de contactes és similar al bonded. No permet la separació.

Frictionless (Menors friccions): És un tipus de contacte unilateral, això vol dir que la pressió normal és igual a zero si es separa. Dona una solució no lineal.

Rough (Superfície aspre): Aquest tipus de contactes són similars al de frictionless. És un tipus de contacte perfecte per a contactes entre superfícies rugoses que no llisquin entre elles. Dintre d'aquest tipus de contacte podem especificar la característica que no penetri un dins de l'altre (Adjust to Touch) que ens permetrà poder separar aquest contacte entre superfícies.

Frictional (Fregament): Permet introduir un tipus de contacte amb un coeficient de fricció. No permet la separació.

Els tipus de contactes no lineals són Frictionless, Rough i Frictional. Aquest tipus de contactes permeten obtenir una solució més acurada perquè el model s'ajusta millor a les característiques reals dels contactes, però per un altre costat s'allarga la seva solució.

Dintre de tots aquest tipus de contactes hi ha els *symmetric* o *asymmetric* en que hi ha una superfície superior de contacte i una inferior. Habitualment és millor l'asimètric per a modelar contactes entre superfícies entre sòlids.

5. DADES DEL PROJECTE I DEL SEU AUTOR

Títol del projecte:

Modelització de la descàrrega d'un pilar del Claustre de la Catedral de Girona

Dades del tècnic autor:

Nom: Narcís Serra Font

Adreça: C/ Pau Casals,6

Codi postal: 17780 Garriguella

Telèfon: 627613928

D.N.I.: 40445498-K

Sol·licitant del projecte:

Nom: Miquel Llorens Sulivera

Professió: Professor de l'Escola Politècnica de Girona

6. MODELITZACIÓ DEL CLAUSTRE DE LA CATEDRAL DE GIRONA.

6.1 Especificacions del tipus d'element i de les constants

Usarem el l'element SOLID65 per mallar tota l'estructura.

Els paràmetres utilitzats per introduir les característiques del material són el mòdul de Young, el coeficient de Poisson i la densitat.

Mòdul de Young:	$E = 7,47e10 \text{ N/m}^2$
Poisson:	$\mu = 0,3357$
Densitat mitja:	$\rho = 2700 \text{ kg/m}^3$

Els límits a tracció i a compressió que introduïrem en el següent apartat són :

Tensió límit a tracció :	$\sigma_{ut} = 7,32e6 \text{ N/m}^2$
Tensió límit a compressió:	$\sigma_{uc} = 7,32e7 \text{ N/m}^2$

Aquestes dades són necessàries en els casos lineals i quan no es considera la deformació plàstica del material a compressió.

Quan aquesta deformació es consideri s'ha d'introduir les dades d'una corba tensió-deformació, com que no s'han trobat dades de les corbes d'esforç deformació de la pedra de Girona, s'ha deduït de corbes característiques de materials ceràmics (fig.23):

	Deformació (m)	Esforç (N/m ²)
1	0	0
2	$1,33 \cdot 10^{-4}$	$9,96 \cdot 10^6$
3	$2,8 \cdot 10^{-4}$	$2,02 \cdot 10^7$
4	$4,5 \cdot 10^{-4}$	$3,03 \cdot 10^7$
5	$6,7 \cdot 10^{-4}$	$4,0 \cdot 10^7$
6	$8,5 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^7$
7	$1,12 \cdot 10^{-4}$	$5,02 \cdot 10^7$
8	$1,22 \cdot 10^{-4}$	$6,02 \cdot 10^7$
9	$1,44 \cdot 10^{-4}$	$7,04 \cdot 10^7$
10	$1,57 \cdot 10^{-4}$	$7,32 \cdot 10^7$

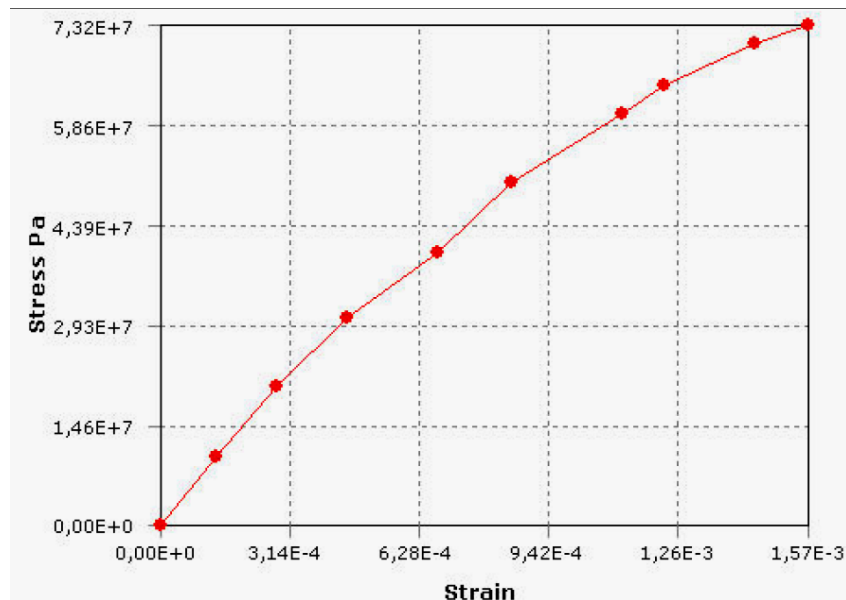


Fig. 23. Corba tensió-deformació a compressió de la Pedra de Girona.

7. MODELITZACIÓ DEL SISTEMA DE DESCÀRREGA.

La característica principal d'una anàlisi no lineal és que la solució no es pot obtenir mitjançant la resolució d'un únic sistema d'equacions lineals, sinó a partir d'una sèrie d'aproximacions lineals amb correccions. El mètode que el programa ANSYS utilitza per resoldre, corregir i solucionar una gran part dels anàlisis no lineals és el procés iteratiu de Newton-Raphson.

Les no linealitats degudes al contacte es produeixen quan dos o més components d'un conjunt estructural s'acosten fins a tocar-se, s'allunyen fins a deixar de fer-ho a llisquen, durant un procés de deformació.

El contacte és una no linealitat degut a que una o ambdues de les següents magnituds són desconegudes.

- L'àrea o punts de contacte.
- Les forces transmeses, tant normal com tangencial.

Hi ha molts tipus de problemes de contacte, entre els quals cal destacar:

- Impacte dinàmic
- Conformat de metalls
- Unions cargolades
- Unions de components
- Unions lliscants
- Confinament
- Etcètera

Les condicions de contacte que es poden seleccionar són les de punt a punt i les de superfície a superfície. Els punts o superfícies poden ser rígids o deformables. Per a utilitzar la capacitat de contacte es poden identificar les àrees on es pensa que es produirà el contacte durant la deformació; en cas contrari, el volum de càlcul necessari per a la resolució del problema és molt més gran. En la modelització del contacte capitell-columna, el contacte utilitzat és de superfície amb superfície i, malauradament, la localització precisa dels punts de contacte pot no ser coneguda prèviament.

Una anàlisi de contacte pel mètode dels elements finits requereix l'establiment de la rigidesa dels elements en que s'han discretitzat les dues o més àrees que entren en contacte. En cas contrari, es produirà una penetració d'una àrea en una altra. Per tal d'evitar-ho, caldria que la rigidesa fos infinita, però valors molt alts poden comportar un mal condicionament numèric del problema, així com dificultats de convergència a causa de la possible aparició de singularitats. S'ha d'escollir el valor amb molta cura per tal de minimitzar la penetració i, a la vegada, el nombre d'iteracions necessàries. El programa ANSYS fa comprovacions d'aquests valors i avisa totes possibles incidències.

El comportament tangencial o de lliscament entre dos cossos en contacte es pot modelitzar amb o sense fregament. El comportament sense fregament permet que dos cossos llisquin relativament un respecte de l'altre sense oferir cap oposició. Si s'inclou el fregament es desenvolupen forces de tallant entre ells. Les forces de fricció tangencial són d'avaluació molt senzilla: $F_{\text{fricció}} = F_{\text{normal}} \cdot \mu_{\text{est}}$, a on μ_{est} representa el coeficient de fricció estàtic (abans no es produeix el lliscament). F_{normal} s'avalua integrant les compressions de contacte en el domini d'integració format per l'àrea de contacte. La convergència del model del capitell-columna realitzat amb elements de contacte seria impossible en cas de no assignar cap coeficient de fricció estàtic. En efecte, només cal pensar com és d'improbable que un arc construït amb blocs de gel sense cap mena de fricció entre ells es mantingui estable.

Quan la força tangencial que tracta de moure els dos cossos (un respecte de l'altre) és menor que la força de fricció, aquests continuen enganxats i junts. Si la força supera un cert llindar, aleshores els dos cossos lliscaran i apareixeran unes forces de fricció $F_{\text{fricció}} = F_{\text{normal}} \cdot \mu_{\text{din}}$ a on μ_{din} representa el coeficient de fricció dinàmic (menor que el coeficient de fricció estàtic). Això no ha de passar en el nostre model, ja que implicaria que el capitell lliscaria sobre la columna, produint-se un col·lapse i no arribaríem a la convergència. El col·lapse del model no és l'objecte del nostre estudi.

- Els resultats que pot aportar una anàlisi amb elements de contacte són:
- La situació final i situació anterior de l'element:
 - o Obert (sense contacte)
 - o Amb contacte i enganxat
 - o Sense contacte i lliscat
- Distància entre les dues superfícies:
 - o Positiva per superfícies separades
 - o Negativa per penetracions
- Força normal
- Força tangencial
- Força de lliscament (en el cas que es produeixi lliscament)

El mètode més rigorós per modelitzar una estructura com la nostra consisteix, doncs, a simular mitjançant el mètode dels elements finits les complexes relacions de contacte entre els seus components (blocs).

S'accepta que el comportament global és molt similar al del conjunt de tot el claustre subdividit en molts més elements, evitant així l'enorme cost computacional que aquesta darrera opció suposaria. Es malla de forma independent cada bloc (columna, capitell,...), fet que implica que cada bloc sigui independent de qualsevol altre en el sentit que no tenen cap node en comú. La relació entre subestructures s'estableix mitjançant els elements de contacte. Com ja s'ha vist, els elements de contacte

revesteixen cada bloc mallat amb elements ordinaris i impedeixen que un bloc penetri dins de l'àrea ocupada per un altre. En cas contrari res el coaccionaria en aquest sentit.

L'establiment d'aquestes noves regles del joc implica una relació més realista dels elements. La contrapartida immediata és el notable increment de la quantitat de recursos computacionals necessaris per a la seva resolució, ja que el grau de no linealitat del procés és substancialment més elevat.

Cal establir un nombre suficient de subpassos per tal de facilitar la convergència. Tot i així el sistema només convergeix en una ínfima part de tots els possibles estats de càrrega, per això és imprescindible predeterminar una finestra d'estats de càrrega.

Per tal se simular la força ascendent del pistó hidràulic sobre els arcs a ambdós costats de la columna estudiada, a través dels xindris, Aplicarem una pressió sota aquests arcs fins al punt en el que es trenqui el contacte entre el capitell i el cos del claustre, com a l'esquema de la fig. 24.

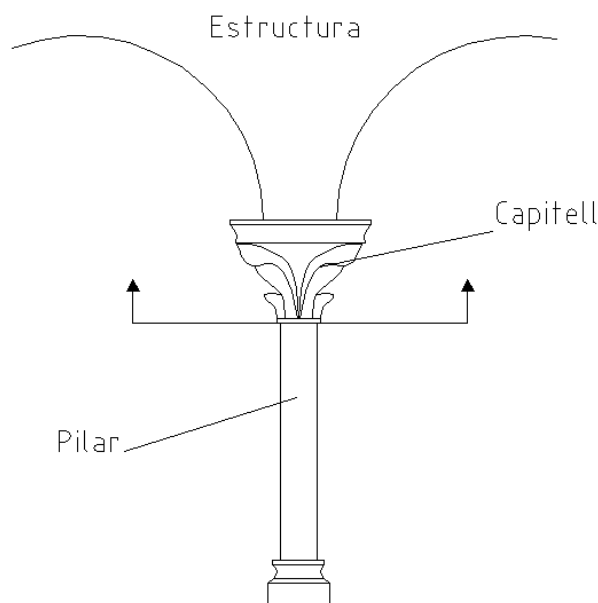


Fig.24. Desacoblament del capitell

7.1. MODEL DE CÀRREGA D'UN PILAR AMB CONTACTES

Segons les proves que es varen fer de descàrrega de les columnes en la galeria nord del claustre de la catedral de Girona, es van obtenir els valors de les càrregues que aguantaven cada una de les 6 columnes de pedra de Girona de 16 cm de diàmetre i 1,05m d'alçada. Es pot veure la disposició de les columnes, fig 25 i els resultats de les deformacions en la fig.26.

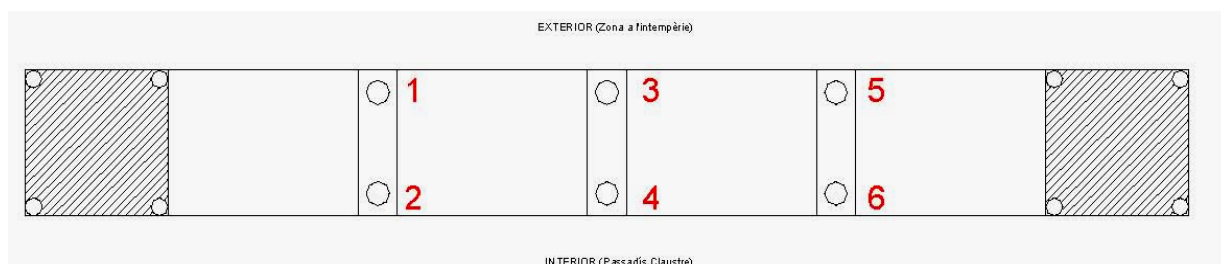


Fig. 25. Esquema de situació de les columnes del claustre.

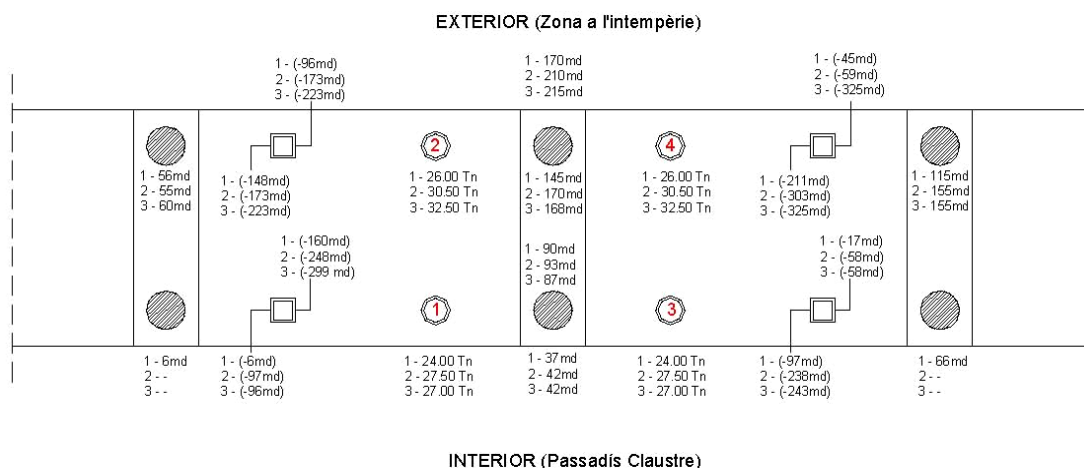


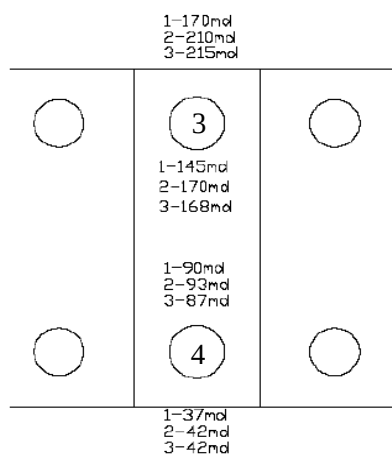
Fig. 26. Resum de resultats de les proves de càrrega (3 assaigs). [Ref.6]

7.1.1. Càrregues de la columna central-exterior

Modelitzarem el sistema de càrrega de la columna més desfavorable, en el nostre cas és la columna num.3, la central i exterior.

Segons la prova de descàrrega que es va realitzar a la galeria nord del Claustre de la Catedral de Girona. Les càrregues d'aquesta columna són:

Deformació de les columnes EXTERIOR



INTERIOR

Mitjana de les microdeformacions
unitàries de la columna exterior:

$$\text{Galga exterior:} \\ \varepsilon = \frac{(170 + 210 + 215)}{3} = 198,3 \mu d$$

$$\text{Galga interior:} \\ \varepsilon = \frac{(145 + 170 + 168)}{3} = 161 \mu d$$

Càlcul de les tensions:

$$\sigma(\text{Pa}) = E(\text{mòdul elàstic o de Young, Pa}) \times \varepsilon (\text{deformació unitària})$$

Per tant:

$$\sigma_1 = 7,47 \cdot 10^{10} (\text{Pa}) \times 198,3 \cdot 10^{-6} = 14,8 \text{ MPa}$$

$$\sigma_2 = 7,47 \cdot 10^{10} (\text{Pa}) \times 161 \cdot 10^{-6} = 12 \text{ MPa}$$

Ara apliquem la formula de Navier:

$$\sigma = \frac{N}{A} \pm \frac{M}{\omega}$$

a on:

σ ; tensió (Pa)

N; Axial (N)

A; àrea de la secció, columna (m^2)

M; Moment ($\text{N} \cdot \text{m}$)

ω ; mòdul resistent (m^3)

$$\sigma_1 = \frac{N}{A} + \frac{M}{\omega} = \frac{N}{(\pi \cdot 0,16^2 / 4)} + \frac{M}{(\pi \cdot 0,16^3 / 32)} = 14,8 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$

$$\sigma_2 = \frac{N}{A} - \frac{M}{\omega} = \frac{N}{0,0201} - \frac{M}{4,021 \cdot 10^{-4}} = 12 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$

Tenim dues equacions amb dues incògnites, podem saber N i M:

$$N = 269.340 \text{ N} \approx \boxed{27.500 \text{ kg}}$$

$$M = 562,94 \text{ N} \cdot \text{m}$$

El moment calculat no és un moment pròpiament dit, sinó que és una excentricitat de la càrrega que es pot calcular:

$$e = \frac{M}{N} = \frac{562,94 \text{ N} \cdot \text{m}}{269340 \text{ N}} = 0,00209 \text{ m} = 0,209 \text{ cm}$$

Com que e es menor que $\varnothing_{\text{columna}}/6 = 16 \text{ cm}/6 = 2,67 \text{ cm}$. Podem dir que la càrrega es troba dins del nucli central i per tant podem afirmar que tota la columna es troba treballant a compressió.

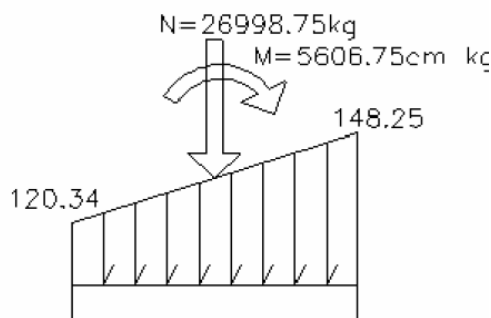


Fig. 29. Esquema de càrregues de la columna 3.

L'àrea mínima de les columnes per no superar la tensió màxima a compressió:

$$\sigma = \frac{N}{A} + \frac{M}{\varpi} = \frac{269340}{(\pi \cdot \theta^2 / 4)} + \frac{562,94}{(\pi \cdot \theta^3 / 32)} \leq \sigma_{uc} = 7,32 \cdot 10^7 \text{ Pa} \rightarrow \varnothing = 7,6 \text{ cm} \rightarrow A = 45,36 \text{ cm}^2$$

Però amb el model de la columna amb el SOLID65 i les característiques de la pedra de Girona (1), el programa ANSYS té l'opció de representar gràficament les falles que es produeixen als materials. Aquesta representació la fa als punts d'integració. És diferència entre una esquerda provocada per tracció (crack), representada per un cercle i l'esgotament a compressió (crush), representat per un octaedre. En cada punt d'integració es pot produir la falla per tres plans diferents, la primera que apareix es representa amb el color vermell, la segona amb verd i la tercera en blau.

En aquest cas les falles comencen a aparèixer a la part inferior d'una columna de diàmetre 9 cm, un cop imposades les càrregues es representa en la figura 30:

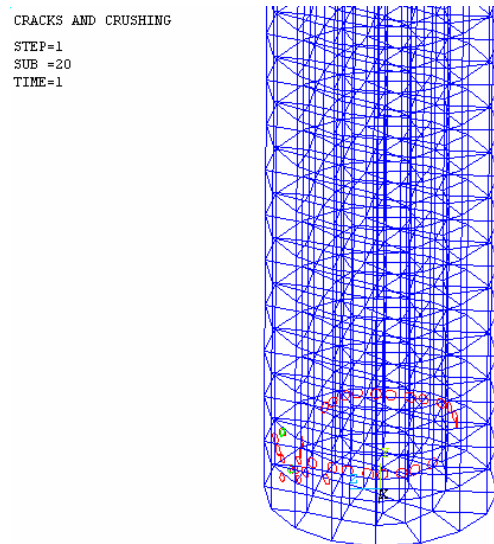


Fig. 30. Representació gràfica de les esquerdes, columna $\varnothing$ 9 cm.

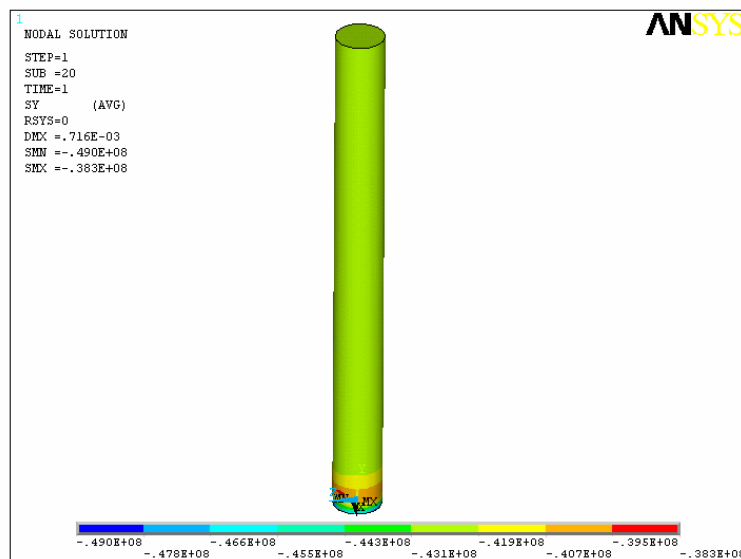


Fig. 31. Tensions de Von_Misses (Pa), columna $\varnothing$ 9 cm .

7.1.2. Procés de creació del model

La columna i el capitell s'ha modelitzat amb un element tipus SOLID 65 i amb les característiques del material Pedra de Girona (1). Els contactes creats entre cossos són tipus Rough (que es pot separar) entre el capitell i el cub de descàrrega superior i un contacte Bonded, entre capitell i columna, esquema del model en la fig.27.

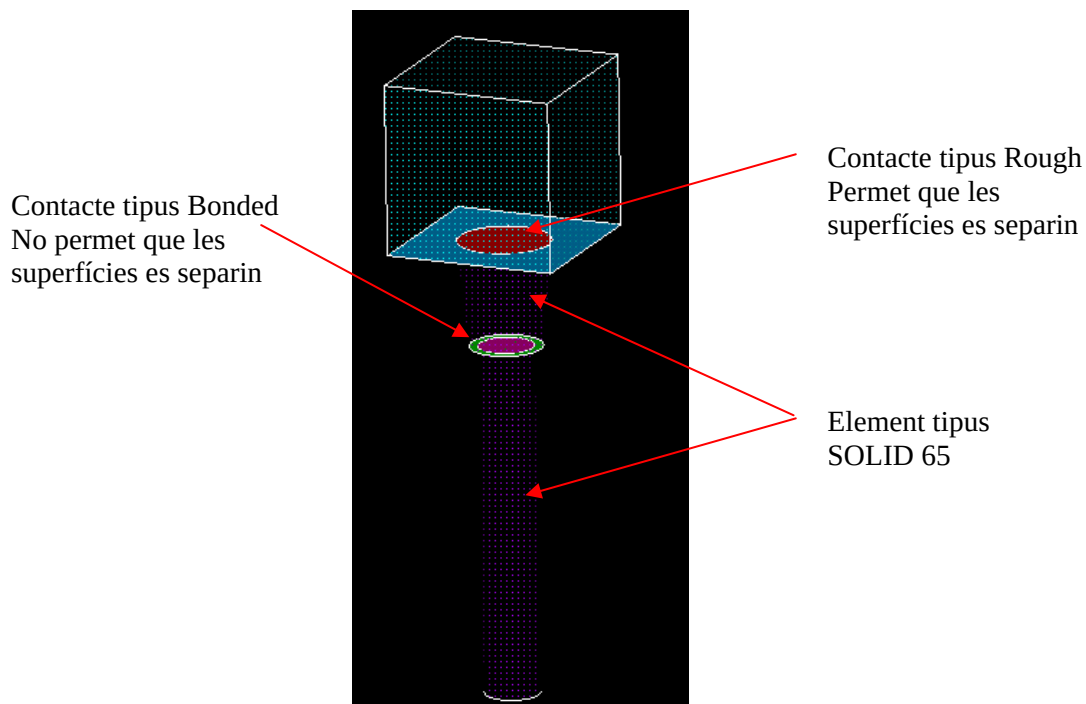


Fig. 27. Figura del model.

7.1.3. Condicions de contorn

Les condicions de contorn perquè aquest model no s'inestabilitzi seran, restringir el moviment en qualsevol de les direccions a l'espai de la base de la columna i en el cub superior li restringirem tots els desplaçament horitzontal, permetent el desplaçament vertical, fig.28.

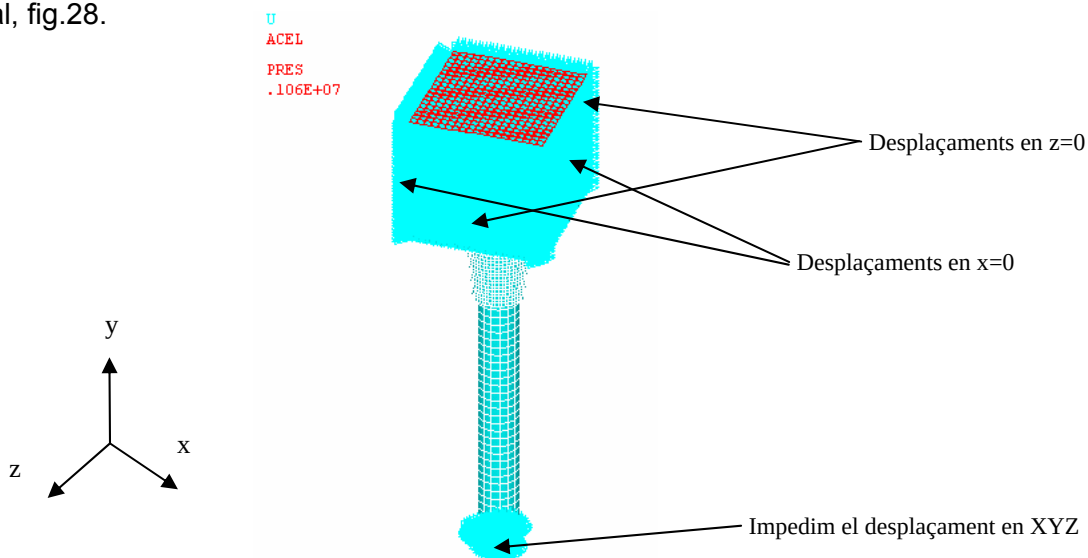


Fig. 28. Condicions de contorn

Ara ja hi podem aplicar les càrregues:

- Aplicarem la constant de la gravetat per tenir en compte en pes propi.
Solution>DefineLoad>Apply>Structural>Inertia>Gravity>ACEL Y=9,8 (m/s²)

Com que el cub superior és 0,5x0,5x0,5 m³ i la densitat de la pedra de Girona és de 2.700 kg/m³, aplicarem a la cara superior del cub per tal de simular la càrrega que baixa del claustre sobre el capitell 27.500-(2700·0,5·0,5·0,5)= 27.162,5 kg. Per tant aplicarem una pressió a la cara superior del cub de (27.162,5·9,8 N)/(0,5·0,5) m²= 1.064.770 Pa.

Solution>DefineLoad>Apply>Structural>Pressure>On Area>VALUE=1064770 (Pa) i el moment *Solution>DefineLoad>Apply>Structural>Force/Moment>On Node>FX;VALUE=563*
En la fig 32 es poden veure les condicions de contorn del model.

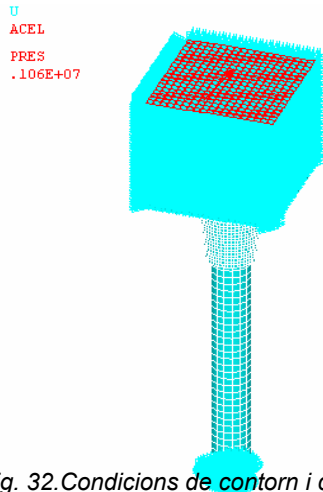


Fig. 32. Condicions de contorn i càrregues.

7.1.4. Anàlisi dels resultats de la càrrega

Si mirem les deformacions màximes del model un cop aplicades les condicions de contorn i les forces (fig. 34) i la deformació de tot el conjunt (fig.33).

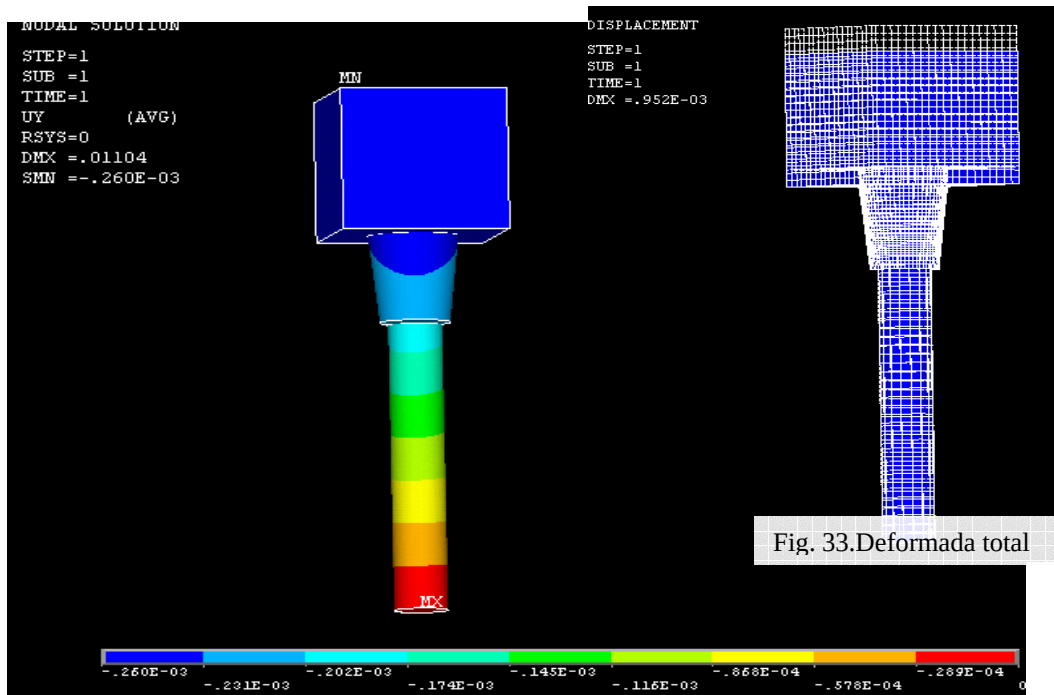


Fig. 34. Deformació (m) en la direcció vertical. Valors a la meitat de la columna ~0,116·10⁻³

Per comparar els resultats obtinguts en la prova de càrrega i el model hem de mirar els valors de la deformació unitària en el centre de la columna que és a on hi havia les galgues extensiomètriques. Els resultats del programa són deformació en la direcció vertical en m. Els valors en el centre de la columna són de l'ordre de $-0,116 \cdot 10^{-3}$ m.

Ens cal calcular la deformació unitària a la meitat de la columna (node núm. 7336):

$$\varepsilon = \frac{L_o - (L_o - L_f)}{L_o} = \frac{1,05/2 - (0,525 - 0,116 \cdot 10^{-3})}{0,525} = 2,2 \cdot 10^{-4}$$

Aquest valor és molt similar al obtingut a les proves de càrrega de la columna 3,
 $\bar{\varepsilon} = 1,983 \cdot 10^{-4}$ m

Si seleccionem tots els nodes de la base de la columna i mirem els valors de les reaccions, General Postproc>List Results>Reaction Solu. Obtindrem les reaccions en cada un dels nodes i el valor total (Fig. 29), que s'aproxima molt al valor imposat de 275.000 N :

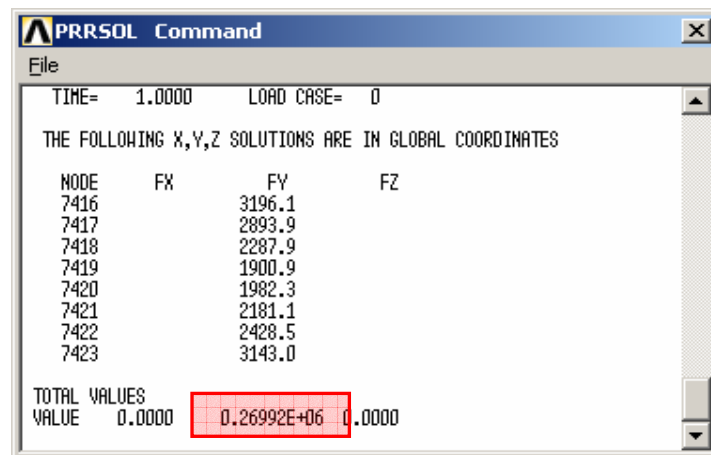


Fig. 35. Reaccions en els nodes de la base de la columna.

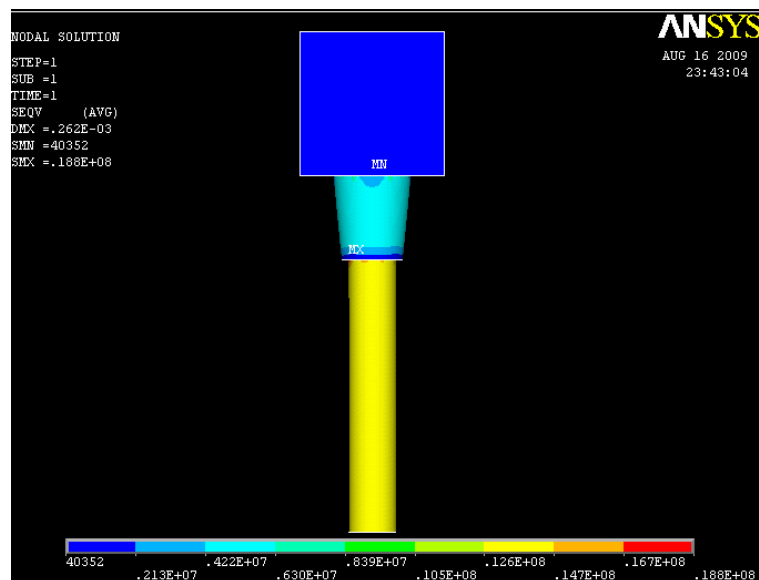


Fig. 36. Tensions de Von-Misses.

Podem observar que la columna suporta unes tensions de 12,6 MPa (fig.30) està molt lluny dels 73,2 MPa del límit a compressió de la pedra de Girona (1). Encara que aquesta és la columna que aguanta més de totes, al rebre tota l'àrea tributària de sobre seu.

7.2. DESCÀRREGA DE LA COLUMNA

Si apliquem una pressió a la cara inferior del cub, com és va fer a la prova de càrrega del claustre de la Catedral de Girona. La columna estudiada es va descarregar amb una força de 32 Tn és a dir 313600 N que aplicades sobre la superfície del cub dona una pressió a aplicar de $313.600\text{N}/(0,5 \times 0,5)\text{m}^2 = 1.254.400\text{ Pa}$.

ANSYS va aplicant les pressions en el cub de forma progressiva fins al punt en el que el model s'inestabilitza perquè es aquest moment es separa el cub del capitell, com es pot observar en la figura 37.

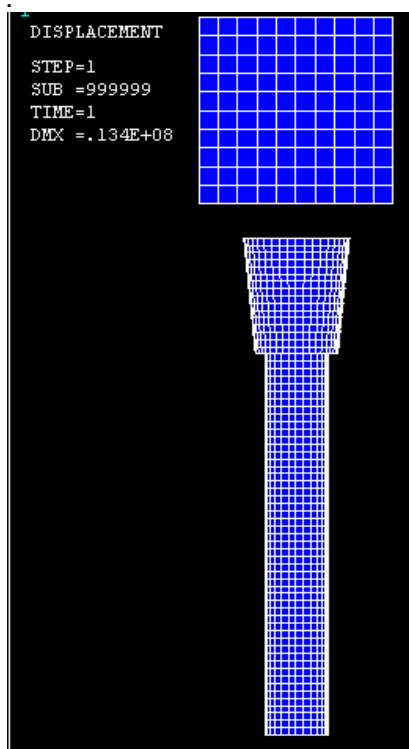


Fig. 37.Descàrrega total de la columna, aplicant una pressió cap amunt de 1.260.000 Pa.

Si representem el desplaçament de la columna en funció de la càrrega amb la l'anem descarregant ens donarà els valors (fig. 32):

	Descàrrega (Tn)	Pressió de descàrrega (MPa)	Deformació de la Columna (m)	Deformació unitària (µd)
1	0	0	$0,103 \cdot 10^{-3}$	196,19
2	2	0,078	$0,1014 \cdot 10^{-3}$	193,10
3	4	0,157	$0,0982 \cdot 10^{-3}$	187,04
4	6	0,235	$0,0924 \cdot 10^{-3}$	176,03
5	8	0,314	$0,0833 \cdot 10^{-3}$	158,65
6	10	0,392	$0,0742 \cdot 10^{-3}$	141,27

7	12	0,470	$0,0654 \cdot 10^{-3}$	124,57
8	14	0,549	$0,0591 \cdot 10^{-3}$	112,54
9	16	0,627	$0,0522 \cdot 10^{-3}$	99,43
10	18	0,706	$0,0464 \cdot 10^{-3}$	83,45
11	20	0,784	$0,0321 \cdot 10^{-3}$	61,10
12	22	0,862	$0,0233 \cdot 10^{-3}$	44,30
13	24	0,941	$0,0179 \cdot 10^{-3}$	34,23
14	26	1,019	$0,0132 \cdot 10^{-3}$	25,06
15	28	1,098	$0,0066 \cdot 10^{-3}$	12,53
16	30	1,176	$0,1575 \cdot 10^{-9}$	$0,0003 \approx 0$
17	32	1,254	0	0
18	34	1,333	0	0

Fig. 38. Valors obtinguts en un dels nodes del mig del claustre (node núm. 7336).

7.2.1. Anàlisi dels resultats de la descàrrega

Si comparem les dades amb els valors de la prova de càrrega, obtenim la gràfica:

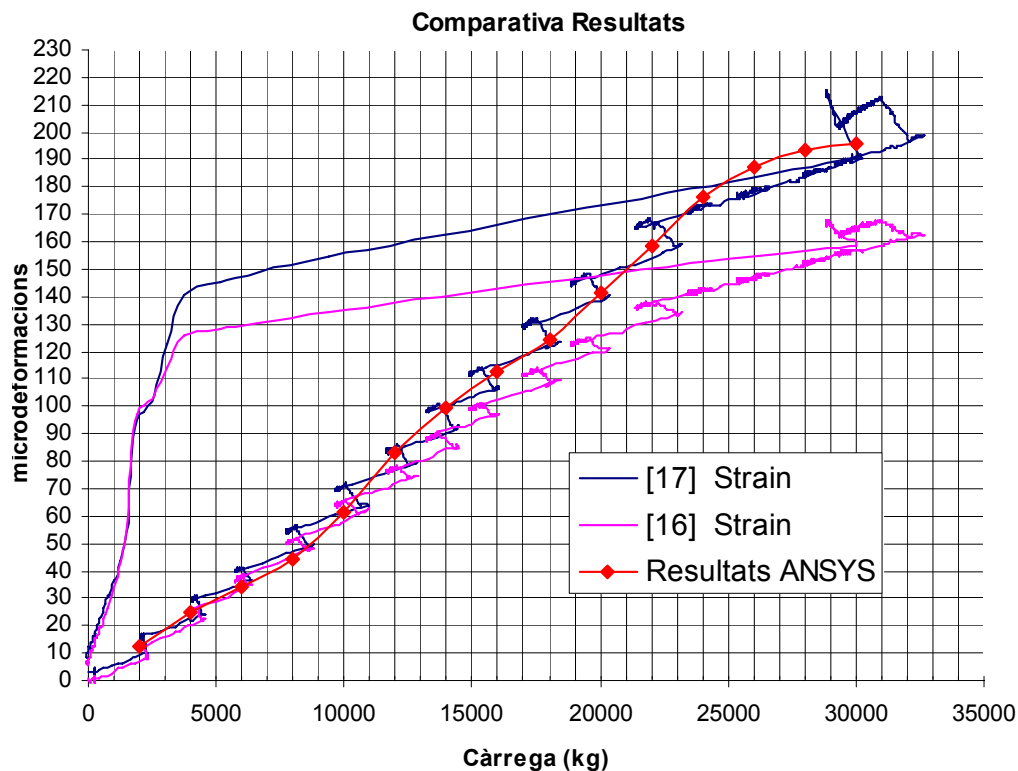


Fig39. Comparació model ANSYS vs. Prova de càrrega. [Ref.6]

8. MODELITZACIÓ DEL LA GALERIA NORD DEL CLAUSTRE DE LA CATEDRAL DE GIRONA

Cada cop és més freqüent el fet de voler estudiar el comportament de construccions ja finalitzades tant en el camp de l'arquitectura, com de l'enginyeria. Fins fa pocs anys aquesta era una tasca molt difícil degut al poc coneixement que podem obtenir d'aquestes un cop han estat construïdes.

En una segona part d'aquest treball s'ha volgut modelitzar la part central de la galeria nord del claustre de la catedral de Girona, zona on es va realitzar la prova de càrrega. Com es tenen les dades reals gràcies a la prova de càrrega [Reg.] intentarem obtenir un model volumètric que s'aproximi al màxim possible a la realitat i comprovar si es crea l'arc de descàrrega o no, com es va comprovar amb l'assaig experimental.

Tal i com passarà en la majoria dels capítols presents en aquest projecte, la descripció més detallada de cada capítol es mostrarà en els annexes a la memòria corresponents. D'aquesta manera, a la memòria només s'hi redactarà un resum de la solució final adoptada de cada capítol i els passos seguits per arribar-hi. Per tant, per obtenir més informació d'aquest capítol, es troba a l'annex C.

8.1. Dades de partida

Per tal de partir d'algunes dades inicials, es va partir de les característiques geomètriques que es poden veure en els plànols 3 i 4. I parirem de les característiques físico-mecàniques de la Pedra de Girona que es poden veure en el capítol 3.2.

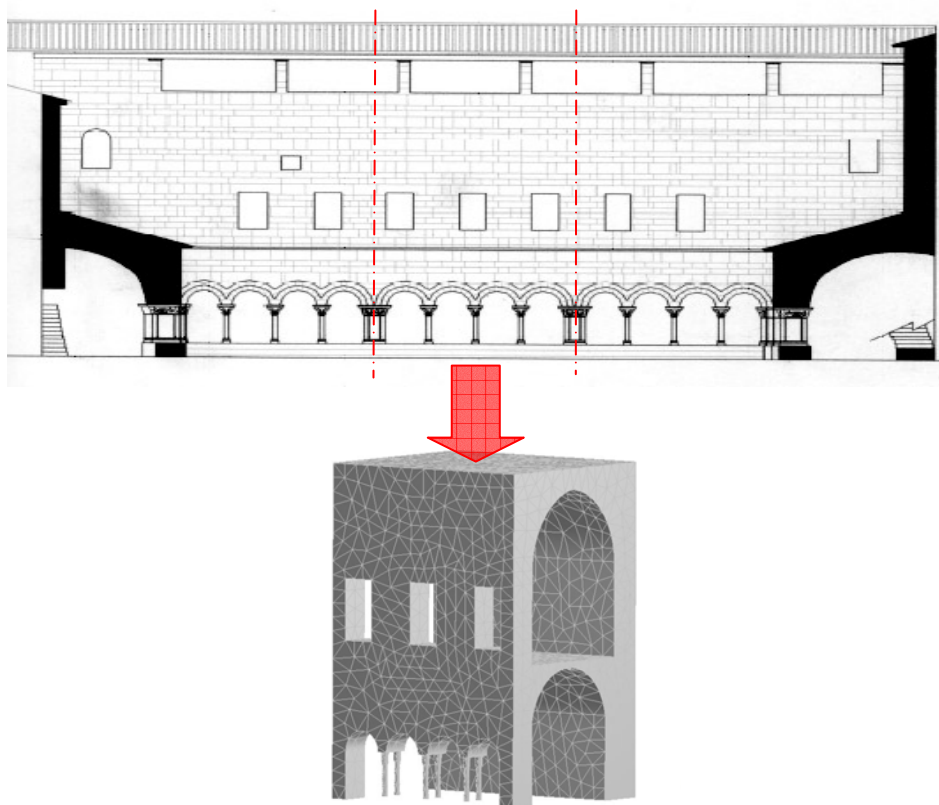


Fig40. Part central de l'ala nord del claustre modelitzat.

Inicialment es va pensar realitzar el model volumètric directament amb el programa ANSYS però amb la complicada geometria i per tal de crear els contactes amb la màxima precisió possible, hem decidit modelitzar per separat els volums amb el programa Pro/Engineer i exportar aquests cossos al paquet informàtic ANSYS (en el nostre cas ANSYS v8.0 i ANSYS Workbench).

El sistema d'obtenció del model és el següent, figurà:

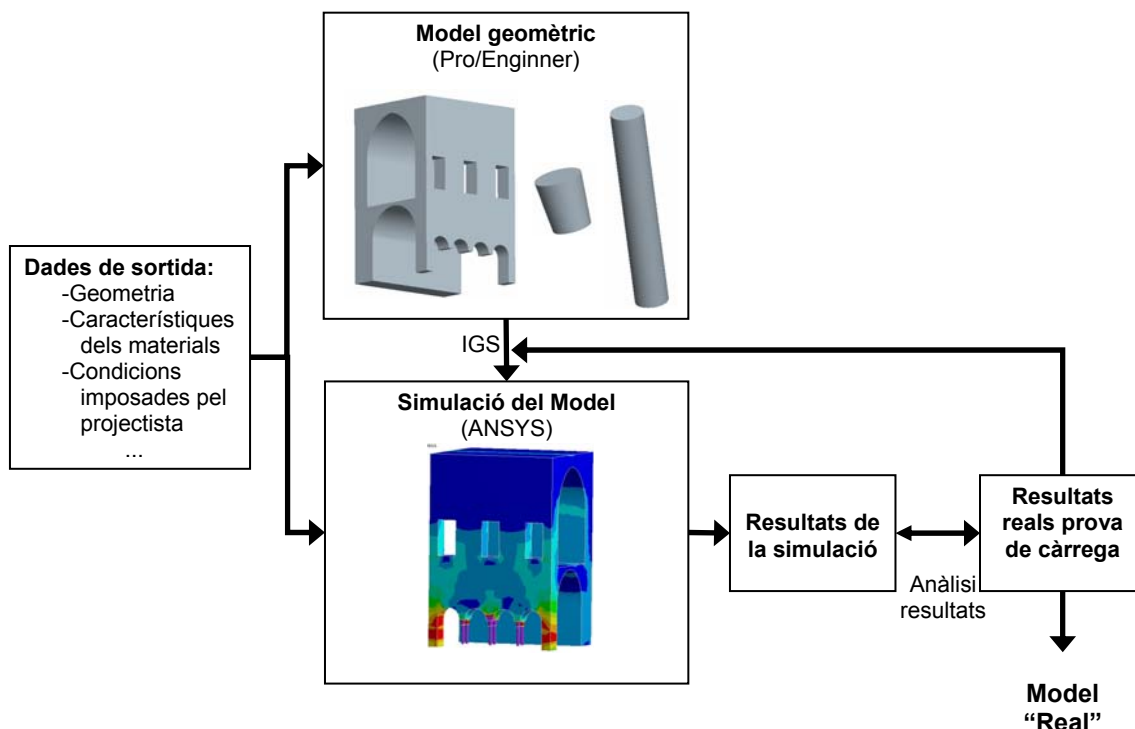


Fig 41. Esquema de treball per tal d'obtenir un model realista de la galeria nord del claustre de la Catedral de Girona.

8.2. Dades conegudes

De la prova de càrrega realitzada l'any 2006 i explicada en el capítol 1.1.4 sabem que hem d'obtenir els valors:

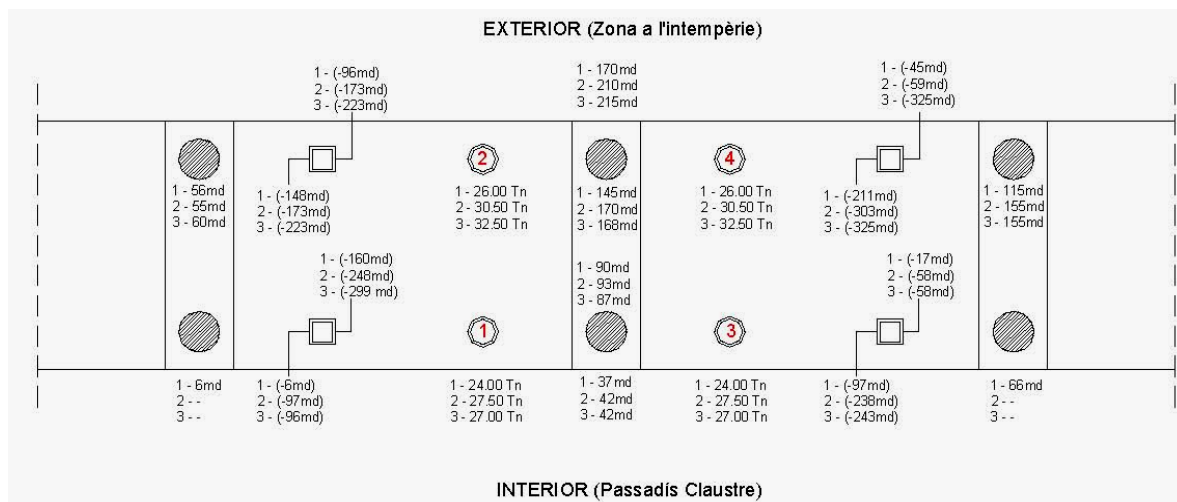


Fig 42. Resultats prova de càrrega. [Ref.6]

Amb les fórmules de Navier i de Hook, podem saber les càrregues que rep cada parell de columnes:

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= \frac{N}{A} \pm \frac{M}{\varpi} \\ \sigma &= E \times \varepsilon \end{aligned} \right\} \begin{aligned} &\text{Com que el moment en funció de l'axial que reben les càrregues és} \\ &\text{pot considerar menyspreable, l'axial que reben les columnes en} \\ &\text{funció de la deformació unitària, és:} \\ &N(N) = \varepsilon \times E \times A = \varepsilon (\mu\text{deformacions}) \times 747474,33 \text{ Kg/cm}^2 \times 201,06 \text{ cm}^2 \end{aligned}$$

Costat esquerra

$$\left. \begin{aligned} N_{\text{columna 1}} &= 5,45 \text{ Tn} \\ N_{\text{columna 2}} &= 0,57 \text{ Tn} \end{aligned} \right\} \text{Càrrega conjunt de columnes costat esquerra} = 6,02$$

Centre

$$\left. \begin{aligned} N_{\text{columna 3}} &= 27 \text{ Tn} \\ N_{\text{columna 4}} &= 10 \text{ Tn} \end{aligned} \right\} \text{Càrrega conjunt de columnes centrals} = 37 \text{ Tn}$$

Costat dret

$$\left. \begin{aligned} N_{\text{columna 5}} &= 13,5 \text{ Tn} \\ N_{\text{columna 6}} &= 2 \text{ Tn} \end{aligned} \right\} \text{Càrrega conjunt de columnes costat dret} = 15,5 \text{ Tn}$$

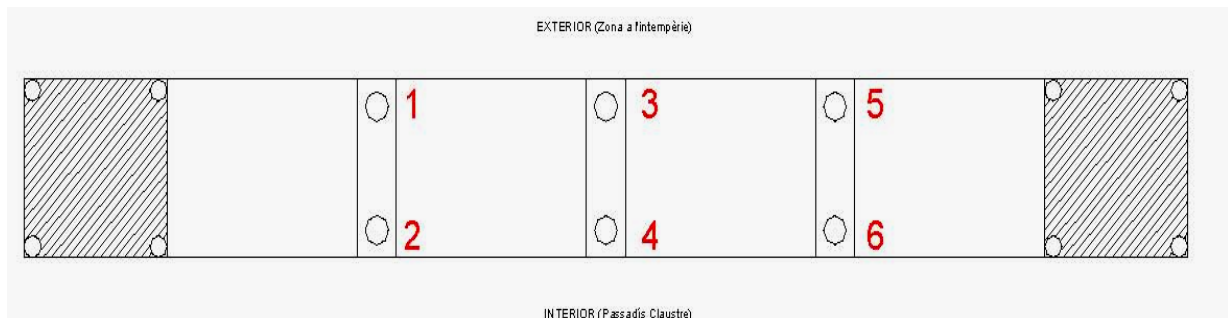


Fig. 43. Esquema en planta de les columnes.

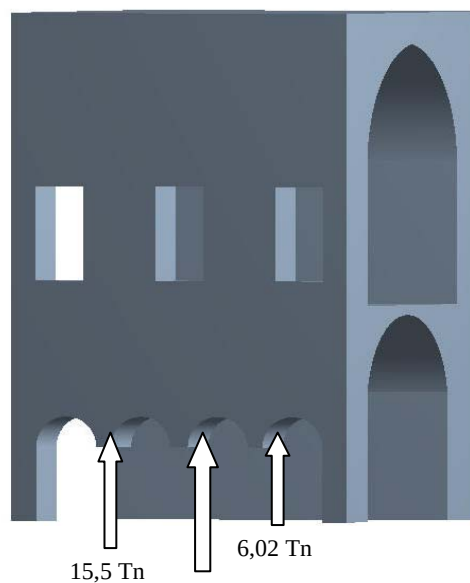


Fig. 44. Esquema resultats reals prova de càrrega.

A la vista dels resultats es pot parlar d'una doble asimetria del sistema: asimetria de les columnes interiors i exteriors i asimetria del sistema de la part dreta a la part esquerra.

Es pot afirmar que no es forma cap arc de descàrrega segons es descriu en el punt 1.1.1, sinó que cada columna suporta la seva part de càrrega corresponent segons un model d'àrees tributàries dels pisos superiors, veure punt 1.1.2.

8.3. Modelització del cos de la galeria nord del claustre

Inicialment per tal de comprovar que hem modelitzar geomètricament i caracteritzant el material amb la pedra de Girona(1) correctament el cos del claustre. Modelitzarem només el cos del claustre aplicant com a condicions de contorn la gravetat, per veure si amb el pes propi, les reaccions que es generen en les zones del capitells són les esperades segons els valors experimentals de la prova de càrrega.

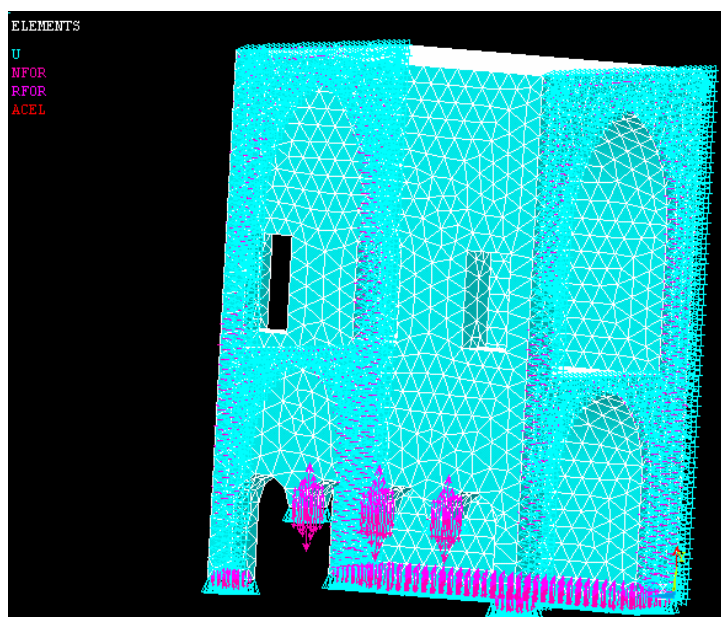


Fig. 45. Només el cos del claustre amb les restriccions i el resultat de les reaccions.

Les reaccions obtingudes amb el pes propi del cos del claustre i amb les característiques de la pedra de Girona(1) són:

$$E=7,47 \cdot 10^{10} \text{ Pa}$$

$$d=2.700 \text{ kg/m}^3$$

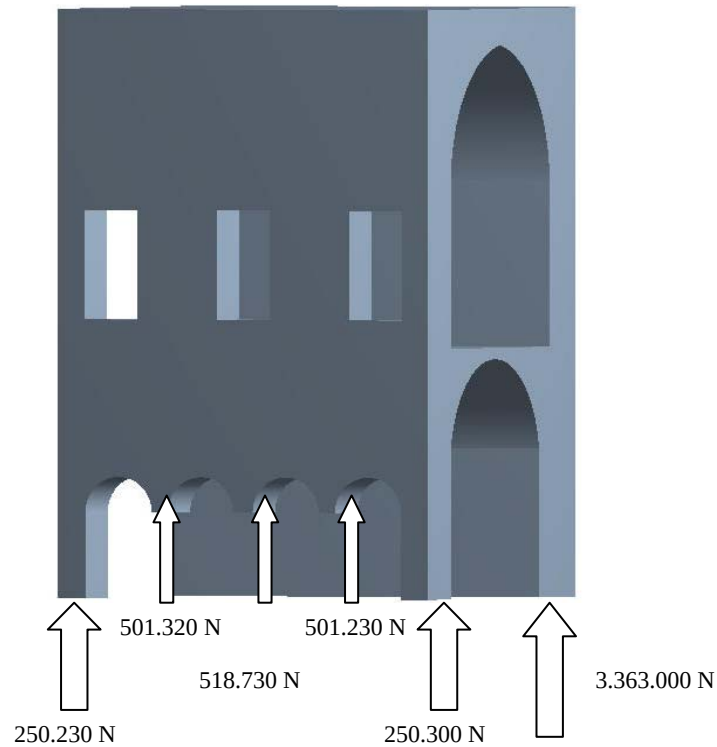


Fig. 46. Reaccions obtingudes del model.

Les tensions , fig 47, es concentren en la zona de les arcades ja que en aquests punts tenim les restriccions que impedeixen el desplaçament cap avall:

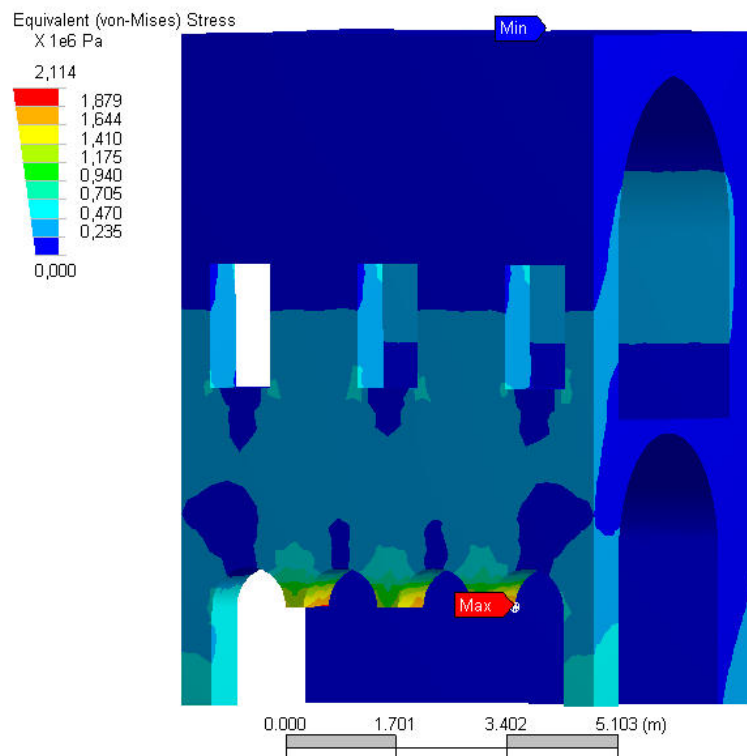


Fig. 47. Tensions de Von-Misses (Pa)

Si mirem les deformacions (fig 48 i 49) veiem que es deforma tot el claustre molt uniformement cap avall, això es degut a que amb les condicions de contorn imposades (reaccions en cada arcada) impedim els desplaçaments vertical.

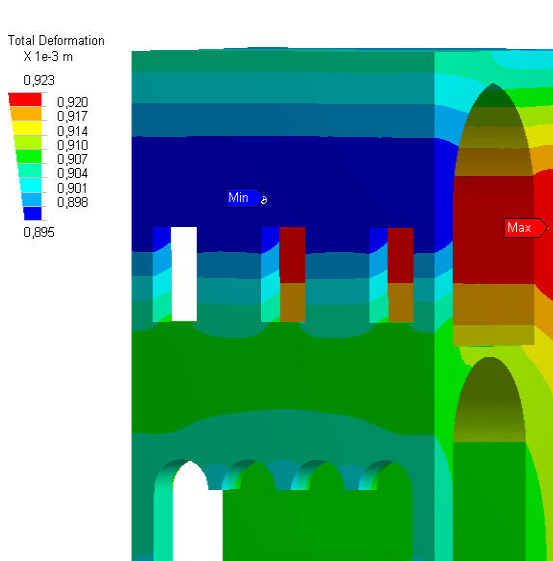


Fig. 48. Deformació total cos claustre (m)

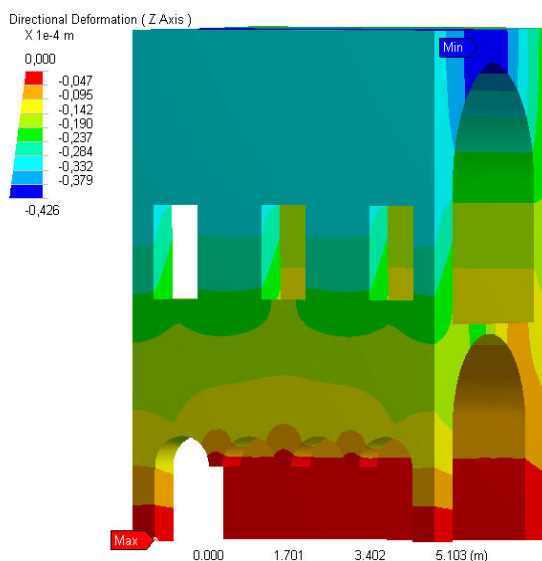


Fig. 49. Deformació vertical (m)

Si fem el sumatori de totes les reaccions:

$$\sum R_y = 5.384.810 \text{ N} = 538.481 \text{ kg}$$

La suma de les reaccions verticals és molt similar a la massa del cos del claustre:

$$\begin{aligned} M_{\text{cos}} &= \text{Volum del cos claustre (m}^3\text{)} \cdot \text{densitat Pedra de Girona (kg/m}^3\text{)} \\ &= 194,81 \cdot 2700 = 525.987 \text{ kg} \end{aligned}$$

En aquesta primera aproximació al model encara que a la zona dels capitells i columnes centrals (columnes 3 i 4) hi arriben a descarregar unes 52 Tn, és un valor diferent al obtingut amb la prova de càrrega 37 Tn.

Segons els resultats experimentals les zones dels capitell i columnes a banda i banda de la zona central haurien de rebre molta menys càrrega i en canvi ser absorbida per les piles dels laterals. Es genera un model molt simètric en que les piles laterals aguanten les mateixes càrregues i les zones dels pilars 1-2 i 5-6 també. Al impedir amb les condicions de contorn del model el desplaçament vertical en la zona de les arcades, estem sustentant tot el pes del claustre amb les reaccions i les pilastres no treballen quasi gens.

Com que pel tipus de construcció del claustre, no tota la galeria està feta amb pedra. En les zones de les voltes hi ha replens per tal de construir els forjats, aquest replèn de densitats similars a 2.000 kg/m³ (Valor obtingut en el projecte Ref.2]. També és possible que hi hagi espais buit a l'interior de les parets.

Per tal de saber quina densitat mitja tindrà el cos del claustre, hem anat variant la densitat del cos del claustre fins a obtenir una reacció similar al valor de la prova de càrrega (37 Tn) a la zona de les columnes centrals (Columnes 3 i 4), que és a on sabem per la prova de càrrega que reben tota l'àrea tributària de sobre seu.

Amb la densitat mitjana del tot el cos del claustre de 2.200 kg/m^3 . Hem obtingut els valors:

$$E=7,47 \cdot 10^{10} \text{ Pa}$$

$$d=2.200 \text{ kg/m}^3$$

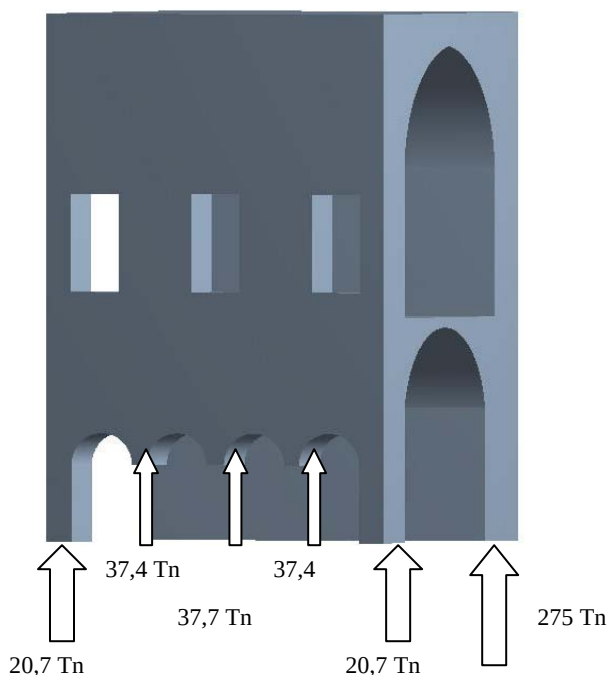


Fig. 50. Resultats de les reaccions.

Valors obtinguts seleccionant les bases de les piles o columnes i utilitzant la opció:
General Postproc>List Results>Reaction Solu

PRRSOL Command	PRRSOL Command	PRRSOL Command																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
File	File	File																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
PRINT REACTION SOLUTIONS PER NODE	PRINT REACTION SOLUTIONS PER NODE	LOAD STEP= 1 SUBSTEP= 1 TIME= 1.0000 LOAD CASE= 0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
**** POST1 TOTAL REACTION SOLUTION LISTING ****	**** POST1 TOTAL REACTION SOLUTION LISTING ****	THE FOLLOWING X,Y,Z SOLUTIONS ARE IN GLOB																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
LOAD STEP= 1 SUBSTEP= 1 TIME= 1.0000 LOAD CASE= 0	LOAD STEP= 1 SUBSTEP= 1 TIME= 1.0000 LOAD CASE= 0	THE FOLLOWING X,Y,Z SOLUTIONS ARE IN GLOB																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
THE FOLLOWING X,Y,Z SOLUTIONS ARE IN GLOB	THE FOLLOWING X,Y,Z SOLUTIONS ARE IN GLOB COORDI																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
<table><tr><th>NODE</th><th>FX</th><th>FY</th><th>FZ</th></tr><tr><td>68</td><td></td><td>20.079</td><td></td></tr><tr><td>78</td><td></td><td>-88.464</td><td></td></tr><tr><td>79</td><td></td><td>8174.7</td><td></td></tr><tr><td>8226</td><td></td><td>166.57</td><td></td></tr><tr><td>8236</td><td></td><td>47.695</td><td></td></tr><tr><td>8237</td><td></td><td>9549.4</td><td></td></tr><tr><td>8474</td><td></td><td>11729.</td><td></td></tr><tr><td>8475</td><td></td><td>1439.4</td><td></td></tr><tr><td>8476</td><td></td><td>22759.</td><td></td></tr><tr><td>8477</td><td></td><td>2200.7</td><td></td></tr><tr><td>8478</td><td></td><td>10620.</td><td></td></tr><tr><td>8479</td><td></td><td>12163.</td><td></td></tr><tr><td>8480</td><td></td><td>2701.0</td><td></td></tr><tr><td>8481</td><td></td><td>23673.</td><td></td></tr><tr><td>8482</td><td></td><td>3240.6</td><td></td></tr><tr><td>8483</td><td></td><td>11033.</td><td></td></tr><tr><td>8484</td><td></td><td>21537.</td><td></td></tr><tr><td>8485</td><td></td><td>20620.</td><td></td></tr><tr><td>8486</td><td></td><td>20165.</td><td></td></tr><tr><td>8487</td><td></td><td>20590.</td><td></td></tr><tr><td>8488</td><td></td><td>19801.</td><td></td></tr><tr><td>8489</td><td></td><td>17774.</td><td></td></tr><tr><td>8490</td><td></td><td>18798.</td><td></td></tr><tr><td>8491</td><td></td><td>18156.</td><td></td></tr><tr><td>8492</td><td></td><td>29327.</td><td></td></tr><tr><td>8493</td><td></td><td>39449.</td><td></td></tr><tr><td>8494</td><td></td><td>26508.</td><td></td></tr><tr><td>8495</td><td></td><td>-487.19</td><td></td></tr><tr><td>8496</td><td></td><td>-499.10</td><td></td></tr></table>	NODE	FX	FY	FZ	68		20.079		78		-88.464		79		8174.7		8226		166.57		8236		47.695		8237		9549.4		8474		11729.		8475		1439.4		8476		22759.		8477		2200.7		8478		10620.		8479		12163.		8480		2701.0		8481		23673.		8482		3240.6		8483		11033.		8484		21537.		8485		20620.		8486		20165.		8487		20590.		8488		19801.		8489		17774.		8490		18798.		8491		18156.		8492		29327.		8493		39449.		8494		26508.		8495		-487.19		8496		-499.10		<table><tr><th>NODE</th><th>FX</th><th>FY</th><th>FZ</th></tr><tr><td>80</td><td></td><td>54.542</td><td></td></tr><tr><td>90</td><td></td><td>57.126</td><td></td></tr><tr><td>91</td><td></td><td>8188.6</td><td></td></tr><tr><td>8169</td><td></td><td>295.91</td><td></td></tr><tr><td>8170</td><td></td><td>239.34</td><td></td></tr><tr><td>8171</td><td></td><td>9780.8</td><td></td></tr><tr><td>8497</td><td></td><td>12446.</td><td></td></tr><tr><td>8498</td><td></td><td>1067.1</td><td></td></tr><tr><td>8499</td><td></td><td>22978.</td><td></td></tr><tr><td>8500</td><td></td><td>1264.2</td><td></td></tr><tr><td>8501</td><td></td><td>11055.</td><td></td></tr><tr><td>8502</td><td></td><td>12543.</td><td></td></tr><tr><td>8503</td><td></td><td>956.50</td><td></td></tr><tr><td>8504</td><td></td><td>22975.</td><td></td></tr><tr><td>8505</td><td></td><td>1348.5</td><td></td></tr><tr><td>8506</td><td></td><td>11013.</td><td></td></tr><tr><td>8507</td><td></td><td>21897.</td><td></td></tr><tr><td>8508</td><td></td><td>21972.</td><td></td></tr><tr><td>8509</td><td></td><td>21317.</td><td></td></tr><tr><td>8510</td><td></td><td>21275.</td><td></td></tr><tr><td>8511</td><td></td><td>19916.</td><td></td></tr><tr><td>8512</td><td></td><td>18321.</td><td></td></tr><tr><td>8513</td><td></td><td>19879.</td><td></td></tr><tr><td>8514</td><td></td><td>18309.</td><td></td></tr><tr><td>8515</td><td></td><td>29979.</td><td></td></tr><tr><td>8516</td><td></td><td>32382.</td><td></td></tr><tr><td>8517</td><td></td><td>42789.</td><td></td></tr><tr><td>8518</td><td></td><td>-273.56</td><td></td></tr><tr><td>8519</td><td></td><td>-354.94</td><td></td></tr></table>	NODE	FX	FY	FZ	80		54.542		90		57.126		91		8188.6		8169		295.91		8170		239.34		8171		9780.8		8497		12446.		8498		1067.1		8499		22978.		8500		1264.2		8501		11055.		8502		12543.		8503		956.50		8504		22975.		8505		1348.5		8506		11013.		8507		21897.		8508		21972.		8509		21317.		8510		21275.		8511		19916.		8512		18321.		8513		19879.		8514		18309.		8515		29979.		8516		32382.		8517		42789.		8518		-273.56		8519		-354.94		<table><tr><th>NODE</th><th>FX</th><th>FY</th><th>FZ</th></tr><tr><td>92</td><td></td><td>-102.18</td><td></td></tr><tr><td>102</td><td></td><td>27.729</td><td></td></tr><tr><td>103</td><td></td><td>8170.0</td><td></td></tr><tr><td>8172</td><td></td><td>84.211</td><td></td></tr><tr><td>8182</td><td></td><td>145.33</td><td></td></tr><tr><td>8183</td><td></td><td>9518.4</td><td></td></tr><tr><td>8397</td><td></td><td>11733.</td><td></td></tr><tr><td>8398</td><td></td><td>2938.7</td><td></td></tr><tr><td>8399</td><td></td><td>23150.</td><td></td></tr><tr><td>8400</td><td></td><td>1911.8</td><td></td></tr><tr><td>8401</td><td></td><td>10513.</td><td></td></tr><tr><td>8402</td><td></td><td>12227.</td><td></td></tr><tr><td>8403</td><td></td><td>2947.4</td><td></td></tr><tr><td>8404</td><td></td><td>23246.</td><td></td></tr><tr><td>8405</td><td></td><td>1610.6</td><td></td></tr><tr><td>8406</td><td></td><td>11072.</td><td></td></tr><tr><td>8407</td><td></td><td>20077.</td><td></td></tr><tr><td>8408</td><td></td><td>20221.</td><td></td></tr><tr><td>8409</td><td></td><td>21991.</td><td></td></tr><tr><td>8410</td><td></td><td>20524.</td><td></td></tr><tr><td>8411</td><td></td><td>18506.</td><td></td></tr><tr><td>8412</td><td></td><td>20238.</td><td></td></tr><tr><td>8413</td><td></td><td>17771.</td><td></td></tr><tr><td>8414</td><td></td><td>18143.</td><td></td></tr><tr><td>8415</td><td></td><td>27505.</td><td></td></tr><tr><td>8416</td><td></td><td>28347.</td><td></td></tr><tr><td>8417</td><td></td><td>39509.</td><td></td></tr><tr><td>8418</td><td></td><td>-451.72</td><td></td></tr><tr><td>8419</td><td></td><td>-520.06</td><td></td></tr></table>	NODE	FX	FY	FZ	92		-102.18		102		27.729		103		8170.0		8172		84.211		8182		145.33		8183		9518.4		8397		11733.		8398		2938.7		8399		23150.		8400		1911.8		8401		10513.		8402		12227.		8403		2947.4		8404		23246.		8405		1610.6		8406		11072.		8407		20077.		8408		20221.		8409		21991.		8410		20524.		8411		18506.		8412		20238.		8413		17771.		8414		18143.		8415		27505.		8416		28347.		8417		39509.		8418		-451.72		8419		-520.06	
NODE	FX	FY	FZ																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
68		20.079																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
78		-88.464																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
79		8174.7																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
8226		166.57																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
8236		47.695																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
8237		9549.4																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
8474		11729.																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
8475		1439.4																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
8476		22759.																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
8477		2200.7																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
8478		10620.																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
8479		12163.																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
8480		2701.0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
8481		23673.																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
8482		3240.6																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
8483		11033.																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
8484		21537.																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
8485		20620.																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
8486		20165.																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
8487		20590.																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
8488		19801.																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
8489		17774.																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
8490		18798.																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
8491		18156.																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
8492		29327.																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
8493		39449.																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
8494		26508.																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
8495		-487.19																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
8496		-499.10																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
NODE	FX	FY	FZ																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
80		54.542																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
90		57.126																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
91		8188.6																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
8169		295.91																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
8170		239.34																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
8171		9780.8																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
8497		12446.																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
8498		1067.1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
8499		22978.																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
8500		1264.2																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
8501		11055.																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
8502		12543.																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
8503		956.50																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
8504		22975.																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
8505		1348.5																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
8506		11013.																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
8507		21897.																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
8508		21972.																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
8509		21317.																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
8510		21275.																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
8511		19916.																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
8512		18321.																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
8513		19879.																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
8514		18309.																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
8515		29979.																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
8516		32382.																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
8517		42789.																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
8518		-273.56																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
8519		-354.94																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
NODE	FX	FY	FZ																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
92		-102.18																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
102		27.729																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
103		8170.0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
8172		84.211																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
8182		145.33																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
8183		9518.4																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
8397		11733.																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
8398		2938.7																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
8399		23150.																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
8400		1911.8																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
8401		10513.																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
8402		12227.																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
8403		2947.4																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
8404		23246.																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
8405		1610.6																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
8406		11072.																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
8407		20077.																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
8408		20221.																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
8409		21991.																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
8410		20524.																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
8411		18506.																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
8412		20238.																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
8413		17771.																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
8414		18143.																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
8415		27505.																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
8416		28347.																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
8417		39509.																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
8418		-451.72																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
8419		-520.06																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
TOTAL VALUES	TOTAL VALUES	TOTAL VALUES																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
VALUE 0.0000 0.37117E+06 0.0000	VALUE 0.0000 0.38367E+06 0.0000	VALUE 0.0000 0.37106E+06 0.0000																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								

Fig. 51. Reaccions costat esquerra.

Reaccions centre.

Reaccions costat dret. (N)

Amb aquesta densitat mitja pel cos del claustre tenim una càrrega molt similar, en la zona del centre, al que sabem que té. Com que hem restringit els desplaçament verticals el les zones del les columnes, no permetem que el cos es deformi en la direcció vertical i per això totes tres zones entre les arcades reben les mateixes càrregues.

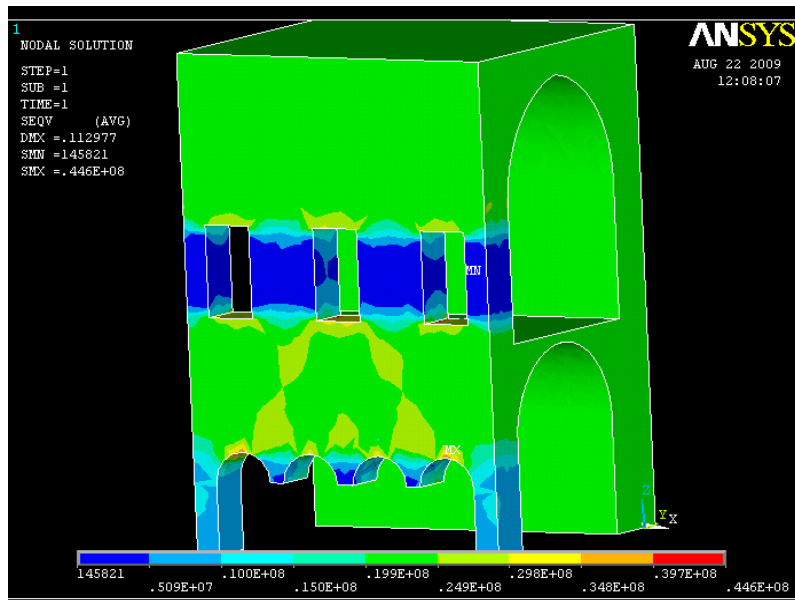


Fig. 52. Tensions de Von-Misses.

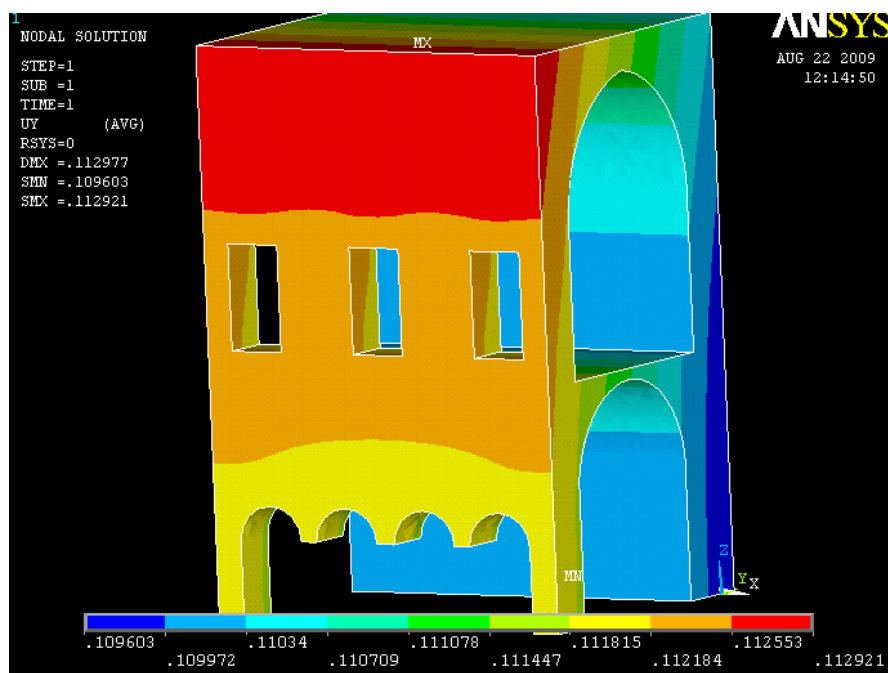


Fig. 53. Deformació vertical (m)

Hem conclòs que el model no es comporta elàsticament i per tant tot el cos del claustre es carrega verticalment i uniformement per totes les reaccions verticals que s'han aplicat al nostre model. Al restringir el desplaçament vertical en les zones entre els arcs, estem evitem que el model es deformi plàsticament i per això obtenim aquesta distribució de càrregues.

8.4. Model amb capitells i columnes (tot una peça):

Es següent pas és generar un model amb els capitells i columnes, per evitar els factors de forma obtinguts en el model anterior.

Per tant modelem el cos del claustre a estudiar i els seus respectius 6 capitells i 6 columnes, com es pot observa en la fig.52. I tot amb les característiques de partida de la Pedra de Girona (1).

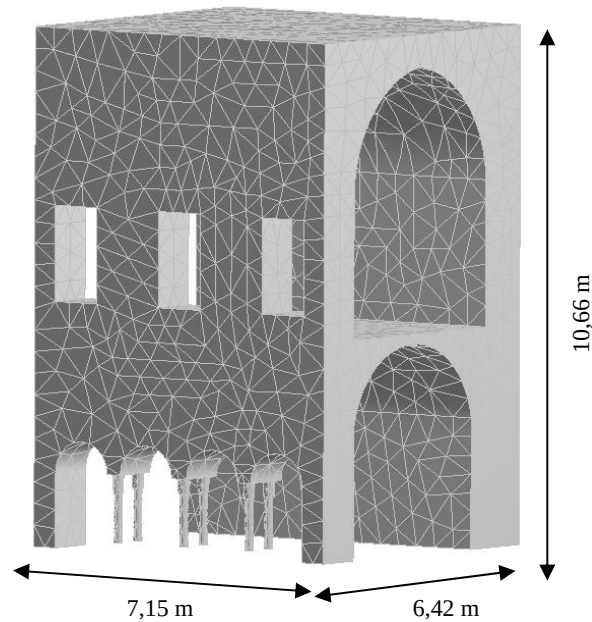


Fig. 54. Tot el claustre mallat.

Les reaccions obtingudes en aquest cas en la base de les columnes, són les representades en la figura 55:

$$E=7,47 \cdot 10^{10} \text{ Pa}$$

$$d=2.200 \text{ kg/m}^3$$

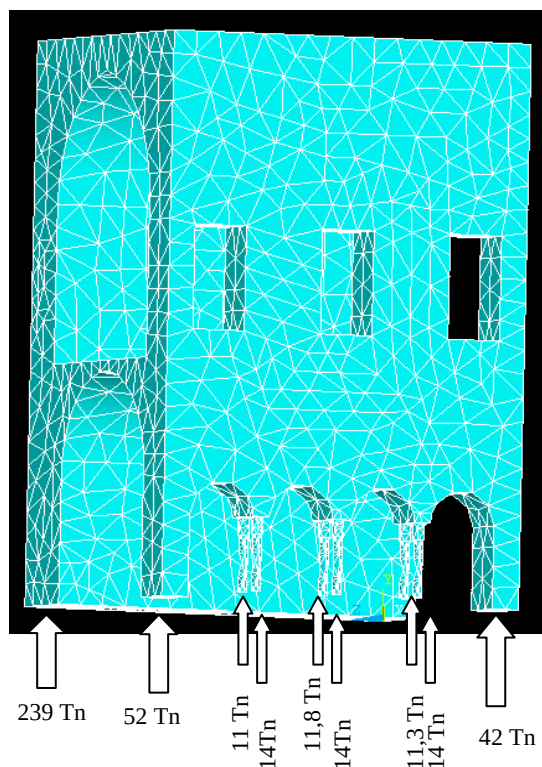


Fig. 54. Resultats de les reaccions.

Podem veure com es distribueixen les tensions en la fig 55 i la deformació vertical en la fig 56.

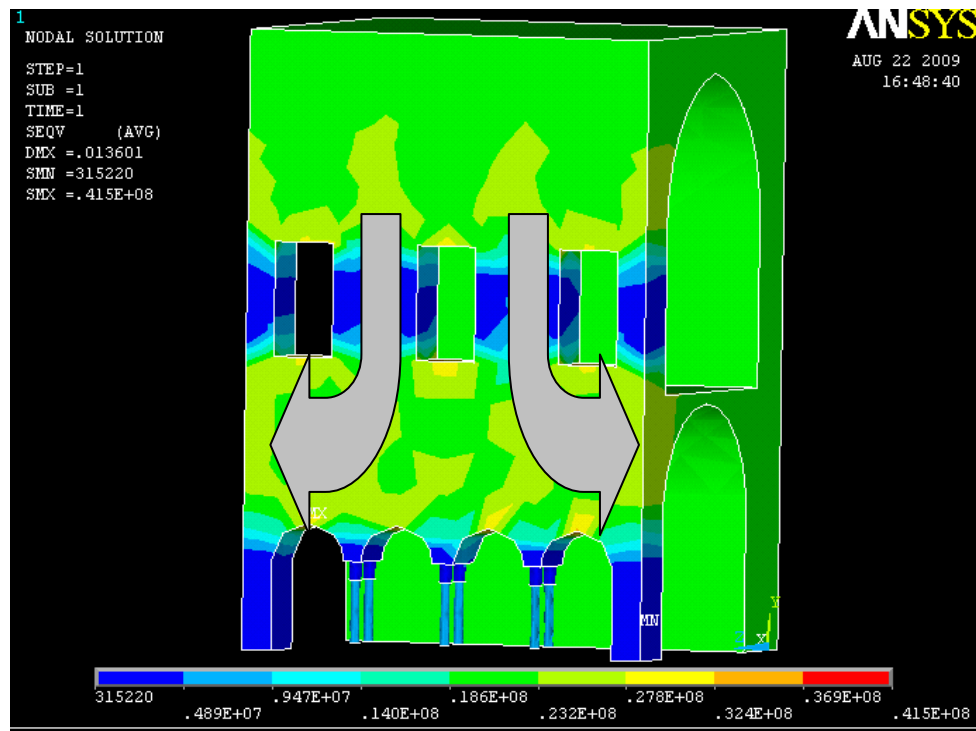


Fig. 55. Von-Mises (Pa). Esquema de flux de les càrregues (un sol cos)

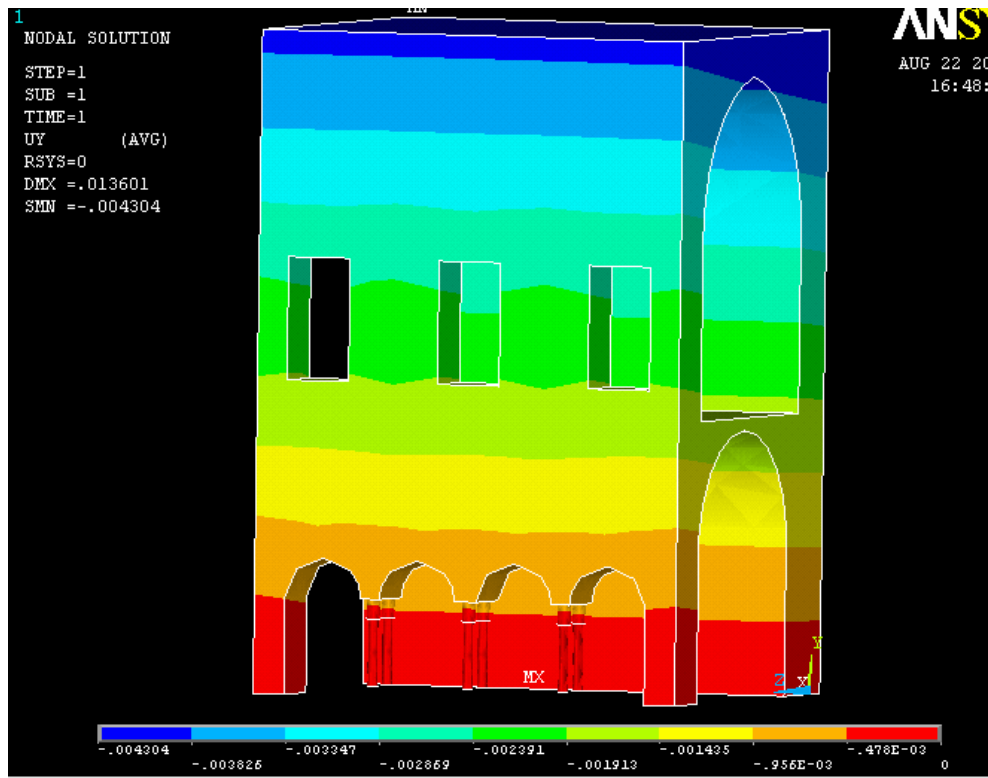


Fig. 56. Deformació vertical (un sol cos).

Amb aquest model es pot observar que al modelitzar tot els cos del claustre sent una sol cos, incloses les piles laterals, fa que tot el volum superior del claustre comenci a descarregar-se a les columnes i aquestes es deformen una mica, lo suficient per tal que el claustre ara es descarregui per les piles laterals i la paret de la muralla (paret posterior), ja que aquestes parts treballen solidaria ment amb el cos superior al ser un de sol.

8.5. Model amb capitells i columnes (contactes):

El següent pas es modelitzar el claustre amb els contacte entre les peces per veure si sense ser un sol cos potser el conjunt treballa diferent. A part de generar la no linealitat amb la creació de contactes entre cossos d'aquesta manera també ens és d'utilitat per podem distingir la densitat del cos del claustre amb la densitat de les columnes i capitells, que aquests si que són de material massís de pedra de Girona (1).

Per tant al model que realitzarem serà un model diferenciat amb tres parts:

- Cos superior del Claustre

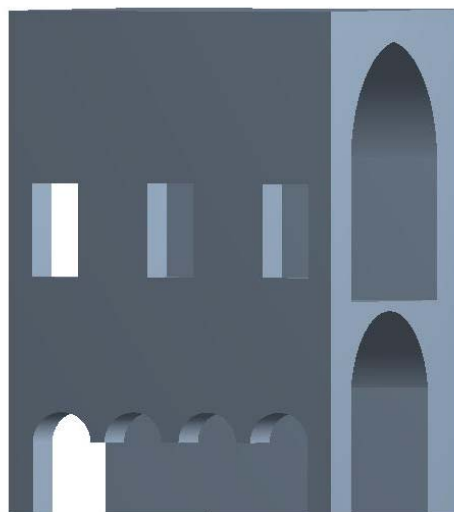


Fig. 57. Cos superior claustre.

- Capitells i Columnes

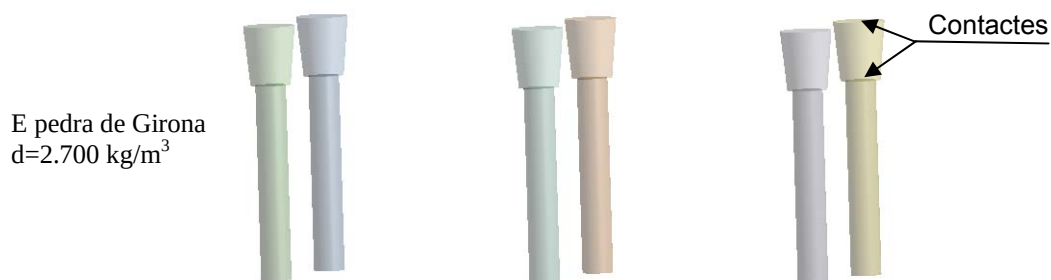


Fig. 58. Columnes i capitells.

En la figura 59 podem veure els contactes creats entre columnes-capitells i capitells-cos del claustre. Són contactes tipus rough, que permeten la seva separació (en l'Annex C s'explica com crear aquest tipus de contactes entre superfícies).

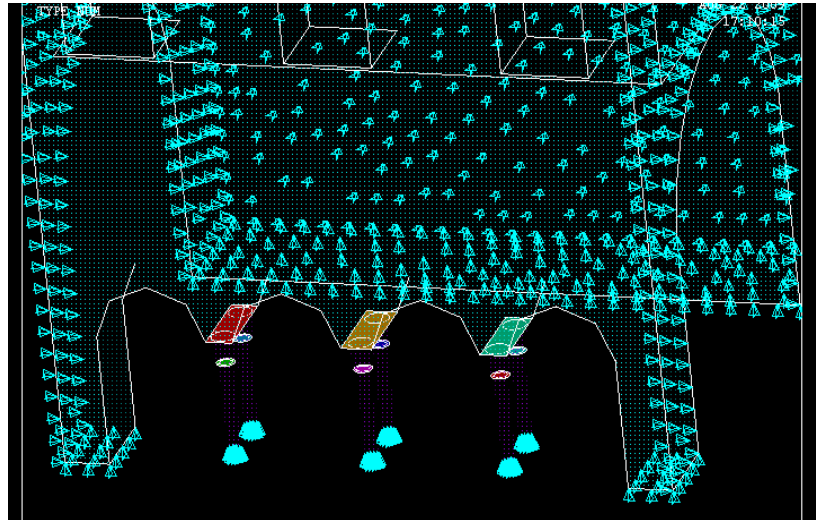


Fig. 59. Representació del contactes del model

Les càrregues que arriben a les columnes són:

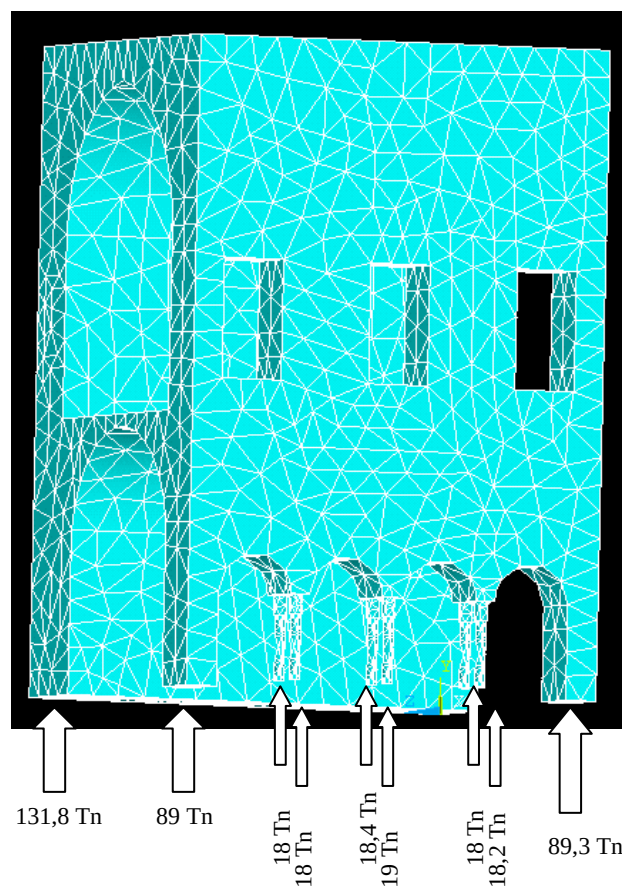


Fig. 60. Esquema de flux de les càrregues.

Les tensions baixen molt uniformement, com que les piles laterals tenen més àrea reben proporcionalment més càrrega.

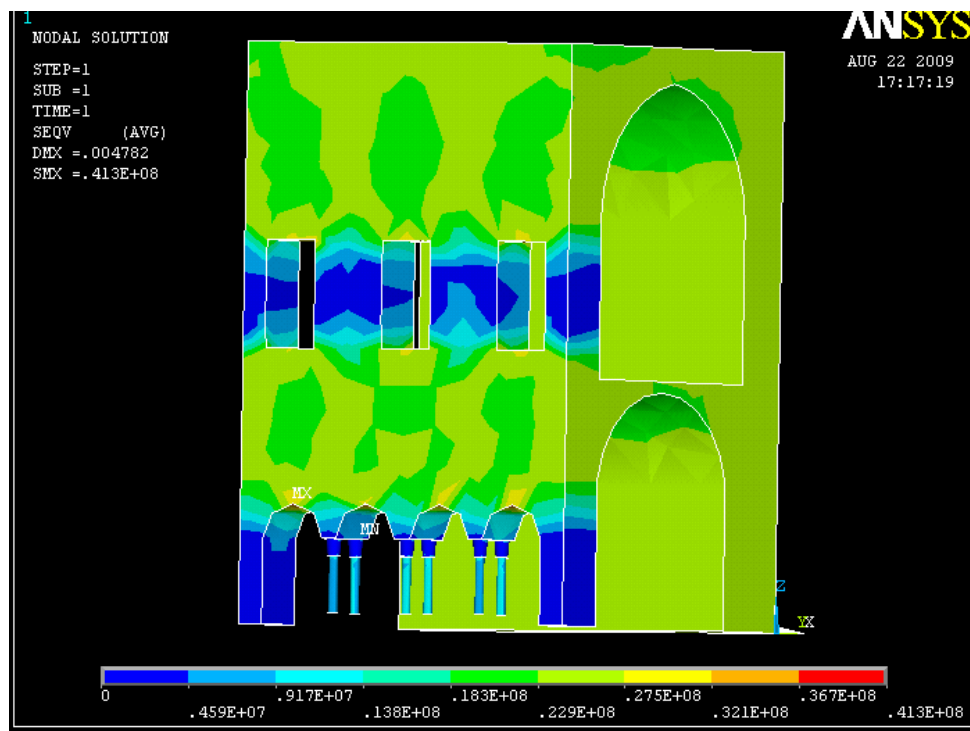


Fig. 61. Von-Mises (Pa).

Les columnes i capitells només reben una part molt petita de les càrregues, unes 18 Tn, un cop les columnes es deformat (aproximadament al centre de les columnes $3e-5$ m en la direcció vertical), aquestes deixen de treballar ja que les piles laterals com que són molt més robustes i ara aguanten totes les càrregues.

La hipòtesi de sortida en que es considerarà el cos del claustre com un sol cos amb les característiques de la pedra de Girona(1). No es correcta ja que en realitat no és una sol cos fet de pedra si no que és conjunt travat de peces assentades amb morter, és a dir una obra de fàbrica. En restauracions fetes en la Catedral de Girona, les parets d'aquest tipus de construcció segueix el sistema constructiu de la figura 62, en que hi ha unes parets estructurals fetes de blocs de pedra rejuntats amb morter i a l'interior és reomplen amb replens de pedres:

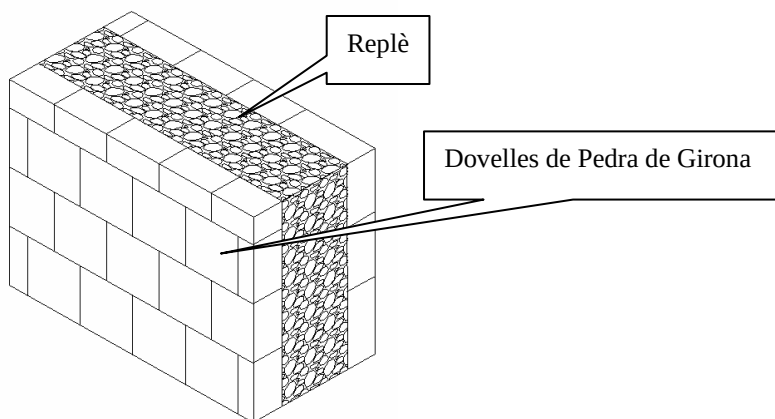


Fig. 62. Esquema constructiu de les parets de pedra del Claustre.

Per tant el nostre model elàstic no s'ajusta a la realitat de la construcció. Arribats a aquest punt es van plantejar dues hipòtesis per a seguir afinant el model:

- Es podria dividir la part del cos del claustre en moltes parts o blocs, per tal de modelitzar al més fidedigna la estructura de l'obra de fàbrica. Aquest tipus de model a part de no ser l'objecte d'aquest treball, en el que volem obtenir un model plàstic "senzill" amb el que puguem aproximar-nos a la realitat, per simples limitacions computacionals i per tant vaig rendiment a l'hora de poder obtenir resultats d'una forma relativament dinàmica. Per tot lo exposat anteriorment, aquesta solució va ser descartat.

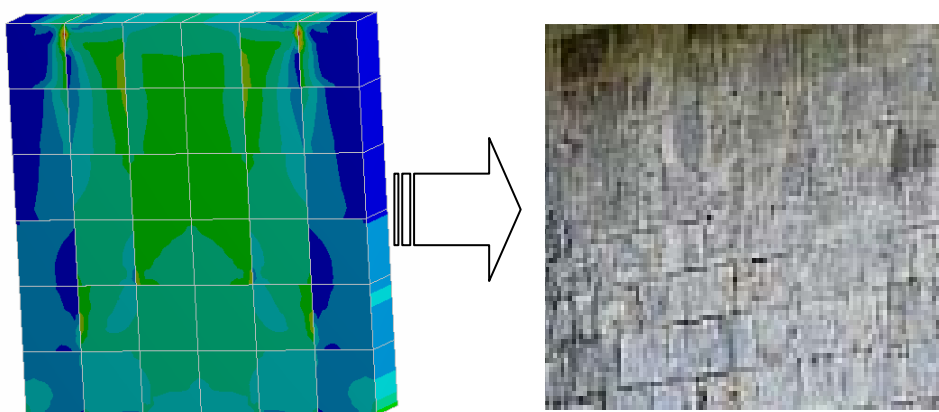


Fig. 63. Opció 1: Divisió del cos en moltes parts simulant així l'obra de fàbrica.

- Una altre solució, que ha sigut la finalment adoptada, és tractar la part superior del claustre diferenciant-lo de les columnes i capitell, per tal de poder caracteritzar el cos i es comporti més com una obra de fàbrica i no com un sol cos de pedra.

8.6. Model amb capitells i columnes (contactes) diferents E:

Existeixen diversos factors (moviment sísmics, pluges, vents,...) que han modificat la forma i els materials, sorgint tensions noves. A més, amb el pas del temps es poden haver degradat els materials originals. La simple pèrdua de morter també pot fer que les tensions variïn i que es modifiqui tota la manera de treballar. De cada tipus estructural s'ha de tenir en compte la configuració constructiva i els possibles materials, deteriorats o simplement envellits.

Els projectes que havien tractat aquests aspectes [Ref. 5 i Ref.7] citats anteriorment. Però la gran dificultat dels càlculs es troba en els materials. Cada dovella estreta de la mateixa pedrera i al mateix dia, té diferents vetes, composicions i distribucions de components químics, diferents capacitats mecàniques i de tota la resta de característiques. Un altre aspecte són els morters, que pateixen de les mateixes dificultats de càlcul.

Per això s'intentarà assolir un model que s'ajusti al màxim possible a la realitat, aquesta realitat serà les dades obtingudes per la prova de càrrega [Ref. 6] que es va realitzar a l'ala nord del claustre de la Catedral de Girona.

En aquest model mantindrem les característiques inicials de la Pedra de Girona(1) en els capitells i columnes, ja que són peces massisses de pedra de Girona. Per altre banda, modificarem el mòdul de Young de la part superior per assimilar-nos més a les característiques de l'obra de fàbrica. Al modificar el mòdul de Yong (E) el volum superior el deformarà molt més i per tant farà que flecti més la part central, i així es carreguin les columnes, com es produeix en la realitat.

Amb les contactes entre els cossos simularem la no linealitat del model i també ens serà útil per tal de poder caracteritzar diferent els materials de les columnes i de l'obra de fàbrica.

Inicialment el pes propi del cos del claustre superior, carrega en els capitells de les 6 columnes.

Aquestes es deformen fins que les piles comencen a treballar.

En aquest punt les columnes deixen de treballar i la resta de la carrega del claustre es carrega a les piles laterals.

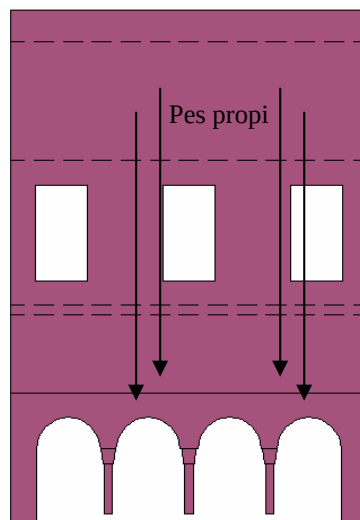
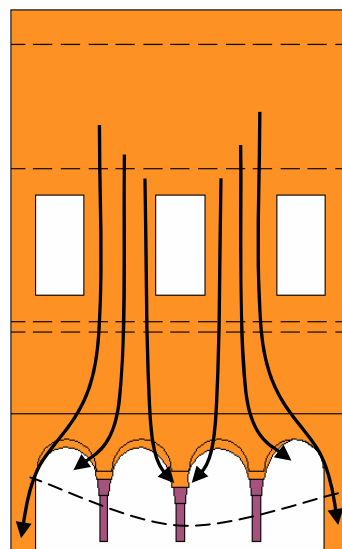


Fig. 64. Model inicial, capítol 8.5

Ara el cos comença deformar-se, les piles no es deformen tant com les columnes al tenir més inèrcia i creen unes reaccions.

Per tant va carregant-se el cos a les columnes centrals més que a les laterals, com passa en la realitat.



LLEGENDA

- E fàbrica
- E pedra de Girona (1)

Fig. 65. Deformació i flux de forçes.

8.6.1. Determinació del Mòdul de Young del Claustre:

Com que no tenim dades de l'obra de fàbrica de la Catedral de Girona, segona l'Annex C del "Documento Básico SE-F" del "Código Técnico de la Edificación" [Ref. 3] podem obtenir els valors de resistència característica a compressió. La resistència característica d'una fàbrica realitzada amb morter ordinari té la formula:

$$f_k = k \cdot f_b^{0,65} \cdot f_m^{0,25} = 0,60 \cdot 20^{0,65} \cdot 15^{0,25} = 7,6 \text{ MPa}$$

Sent;

- f_k : Resistència característica a compressió de la fàbrica.
- k : Constat $K=60$ per peces massisses.
- f_b : Resistència normalitzada a compressió de les peces de la fàbrica, en el cas de la Pedra de Girona 20 N/mm^2 .
- f_m : Resistència a la compressió específica del morter ordinari, no major de 20 N/mm^2 , ni que f_b . Hem agafat un valor de 15 MPa .

Com a mòdul d'elasticitat secant instantani d'una fàbrica es pot agafar igual a:

$$E = 1000 \cdot f_k = 7,6 \cdot 10^9 \text{ Pa}$$

Aplicant al model de tot el claustre amb contactes entre cossos, amb les característiques de la pedra de Girona (1) als capitells i columnes i les característiques del cos del claustre:

-Pedra de Girona (1):

Young's Modulus	7,47e+010 Pa
☐ Poisson's Ratio	0,3357
☐ Density	2700, kg/m³
☐ Thermal Expansion	1,4e-005 1/°C
☐ Tensile Yield Strength	0, Pa
☐ Compressive Yield Strength	0, Pa
☐ Tensile Ultimate Strength	7,32e+006 Pa
☐ Compressive Ultimate Strength	7,32e+007 Pa

Fig.66. Característiques de la pedra de Girona.

Corba esforç-deformació:

	Strain	Stress Pa
1	0,	0,
2	1,3339e-004	9,964e+006
3	2,8e-004	2,02e+007
4	4,5e-004	3,03e+007
5	6,7e-004	4,e+007
6	8,5e-004	5,02e+007
7	1,12e-003	6,02e+007
8	1,22e-003	6,45e+007
9	1,44e-003	7,04e+007
10	1,57e-003	7,32e+007

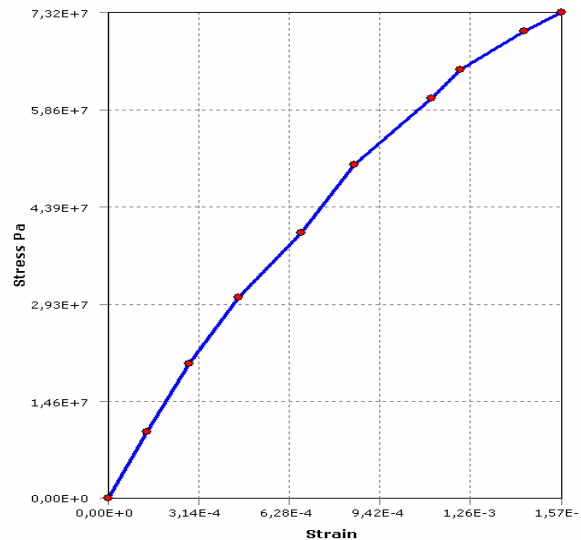


Fig.67. Corba Esforç deformació de la pedra de Girona.

Per un altre costat tindrem les característiques de l'obra de fàbrica del cos del claustre i de les piles laterals:

Young's Modulus	7,6e+009 Pa
☐ Poisson's Ratio	0,3357
☐ Density	2200, kg/m³
☐ Thermal Expansion	1,4e-005 1/°C
☐ Tensile Yield Strength	0, Pa
☐ Compressive Yield Strength	0, Pa
☐ Tensile Ultimate Strength	7,33e+005 Pa
☐ Compressive Ultimate Strength	7,33e+006 Pa
Multilinear Isotropic Hardening	

Fig.68. Característiques de la fàbrica

Corba esforç-deformació

	Strain	Stress Pa
1	0,	0,
2	1,15e-004	8,74e+005
3	2,3e-004	1,5e+006
4	4,5e-004	2,55e+006
5	6,7e-004	3,75e+006
6	8,5e-004	4,7e+006
7	1,12e-003	5,85e+006
8	1,22e-003	6,34e+006
9	1,44e-003	7,e+006
10	1,57e-003	7,33e+006

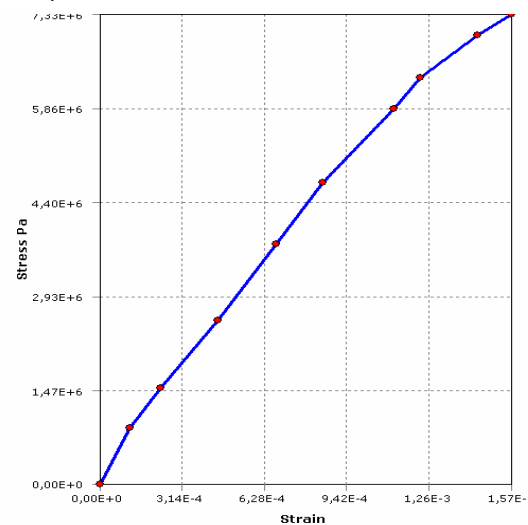


Fig.69. Corba esforç-deformació de la fàbrica.

Obtenim les càrregues:

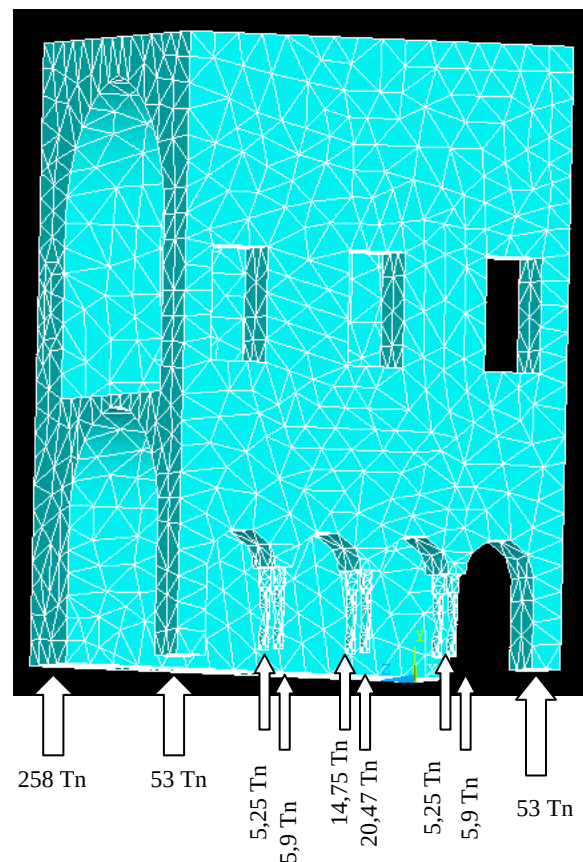


Fig.70. Esquema de les càrregues.

Si mirem les reaccions en els contactes entre columnes i capitells podem veure que les càrregues són similars a les obtingudes en la base de les columnes:

Reactions						
For additional options, please visit the context menu for this table (right mouse button)						
Name	Contact Side		Force Magnitud...	Moment Magnitude (N·m)	Force X (N)	Force Y (N)
capitell_06 To Columna_06	Contact	☐	51620	☐	120,1	☐
capitell_06 To Columna_06	Target	☐	51620	☐	520,87	☐
capitell_05 To Columna_05	Contact	☐	58118	☐	135,22	☐
capitell_05 To Columna_05	Target	☐	58118	☐	580,81	☐
capitell_03 To Columna_03	Contact	☐	1,8663e+005	☐	427,74	☐
capitell_03 To Columna_03	Target	☐	1,8663e+005	☐	507,86	☐
capitell_04 To Columna_04	Contact	☐	1,351e+005	☐	314,34	☐
capitell_04 To Columna_04	Target	☐	1,351e+005	☐	1355,7	☐
capitell_02 To Columna_02	Contact	☐	51626	☐	120,11	☐
capitell_02 To Columna_02	Target	☐	51626	☐	124,5	☐
capitell_01 To Columna_01	Contact	☐	58112	☐	135,2	☐
capitell_01 To Columna_01	Target	☐	58112	☐	166,15	☐

Fig. 71. Reaccions en els contactes entre les columnes i els capitells.

8.6.2. Anàlisi dels resultats:

Amb aquest model tenim uns resultats molt similars en quant a les càrregues conegudes, que hi ha entre les arcades de cada parell de columnes. Ho recordem en la figura 72 :

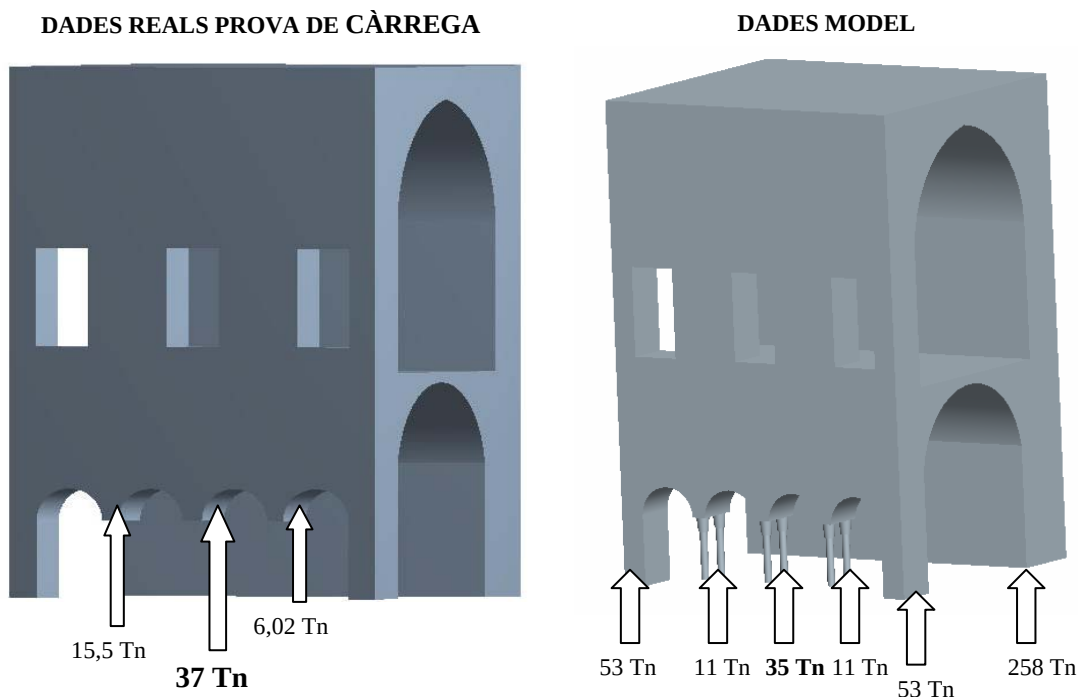


Fig. 72. Comparació valors reals respecte nostre model.

S'intueix l'asimetria que es va veure en la prova de càrrega entre les columnes exteriors i interior. La càrrega a suportar per les columnes exteriors és més gran que la suportada per les columnes interiors.

El fet que no rebin encara més càrrega les columnes exteriors que les interiors com a la realitat és possible que sigui degut a que en les zones de les voltes de canó del primer pis i la de mig punt del segon pis, és possible que no treballin solidàriament amb les voltes com hem fet al modelitzar la geometria de claustre, si no que hi hagi zones de replens no homogenis que provoquen empentes horitzontals a les parets del claustre, figura 73.

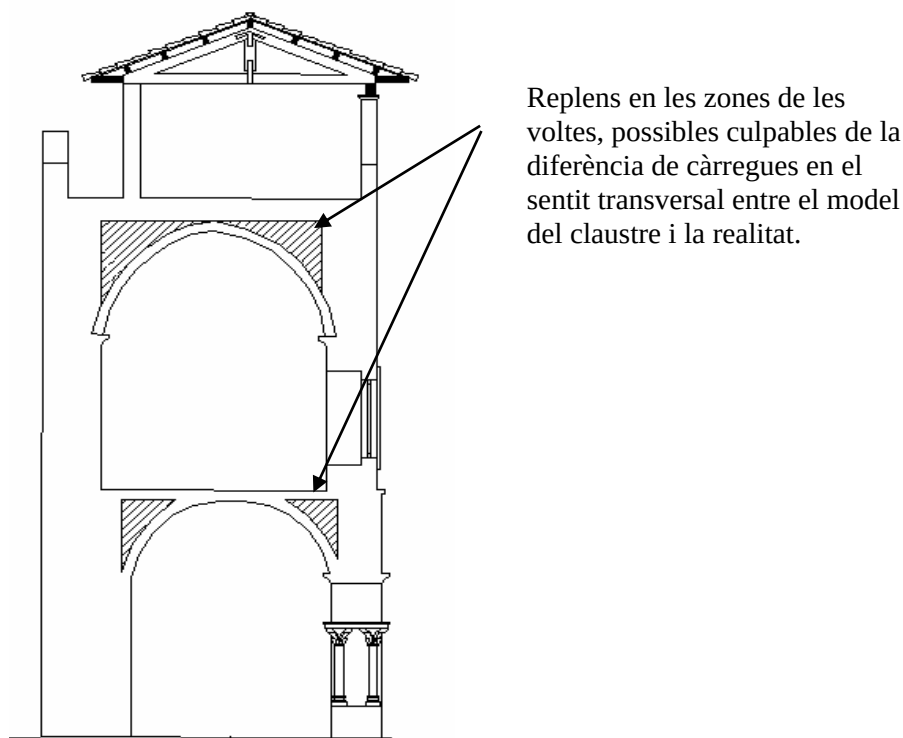


Fig. 73. Secció de la galeria nord.

No és la intenció del present treball descriure de forma precisa l'estat de càrregues en el sentit transversal de la galeria nord del claustre de la Catedral de Girona, si no que es pretén veure el comportament del cos del claustre i si es genera o no l'arc de descàrrega en el sentit longitudinal de la galeria nord del claustre de la Catedral de Girona.

Per una altre costat com ja es comenta el projecte redactat per Àlex Salcedo [Ref. 6], en el que comentava que el fet que en les proves de càrrega hi hagués una asimetria entre les columnes de la dreta i de l'esquerra, era molt estrany i podria ser degut a algun error en la pròpia prova de càrrega i/o a un assentament diferencial entre les dues bandes, tot i que per el moment no s'ha pogut demostrar. En nostre model es tant simètric que sempre es comportarà simètricament, per tant les càrregues de les columnes 1 i 2 seran similars a les columnes 5 i 6.

Veiem en la fig.74 que tot el cos està molt per sota del límits de compressió, les tensions majors estan en les piles encara que tenen més superfície que les columnes i en la part central del claustre (columnes 3 i 4). Treballen les piles i les columnes centrals.

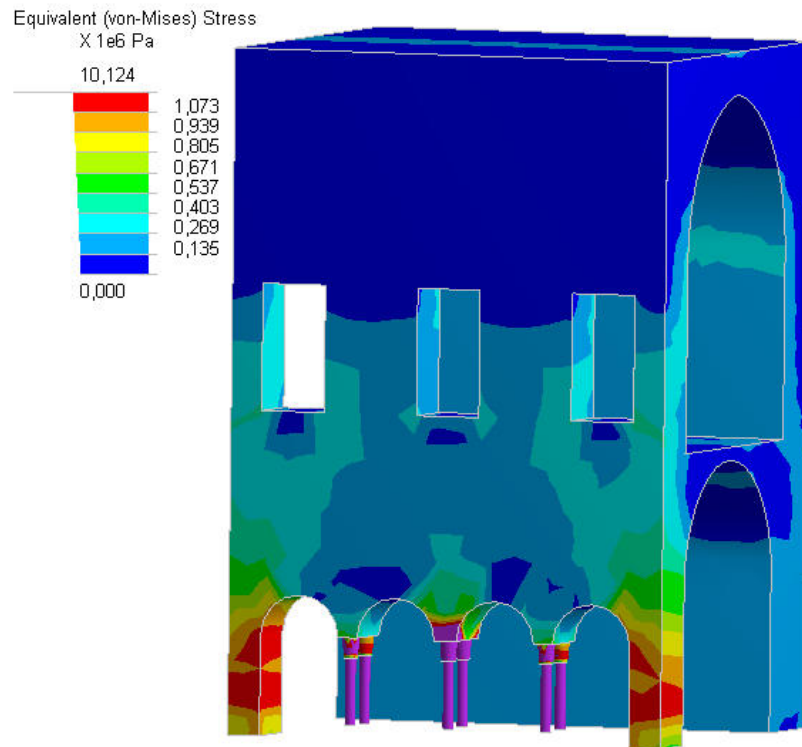


Fig. 74. Von Mises (Pa).

Al imposar les característiques de l'obra de fàbrica fa que es permeti la deformació del cos i de les piles, figura 75.

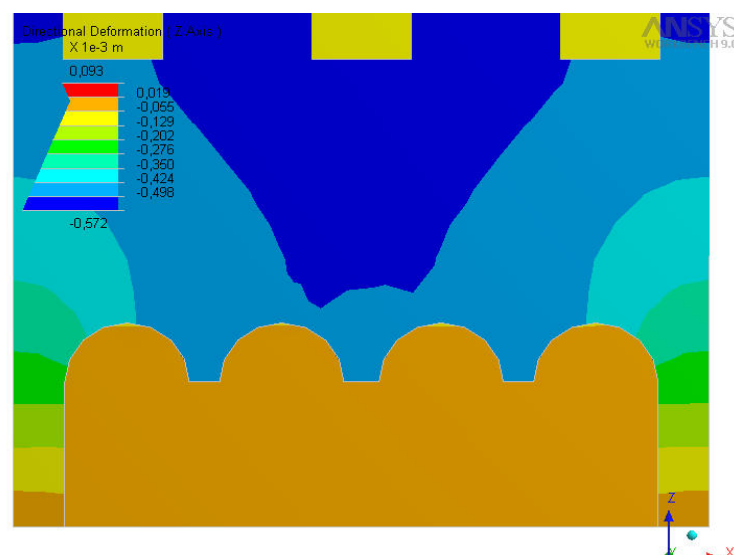


Fig. 75. Deformació vertical (m).

Si observem la deformació en la zona a on es van col·locar les galgues extensiomètriques, meitat de les columnes, de les columnes 3 (central exterior) i 4 (central interior), columnes que ens serveixen en el present treball per comparar model amb la realitat. Podem veure que obtenim unes deformacions similars a les obtingudes en la prova de càrrega [Reg. 6] una mica menys perquè en el nostre model aquestes columnes reben quelcom menys de càrrega que en la realitat. La columna 3 es deforma més que la columna 4. I al seu torn la part frontal d'aquestes columnes es deforma més que la part posterior.

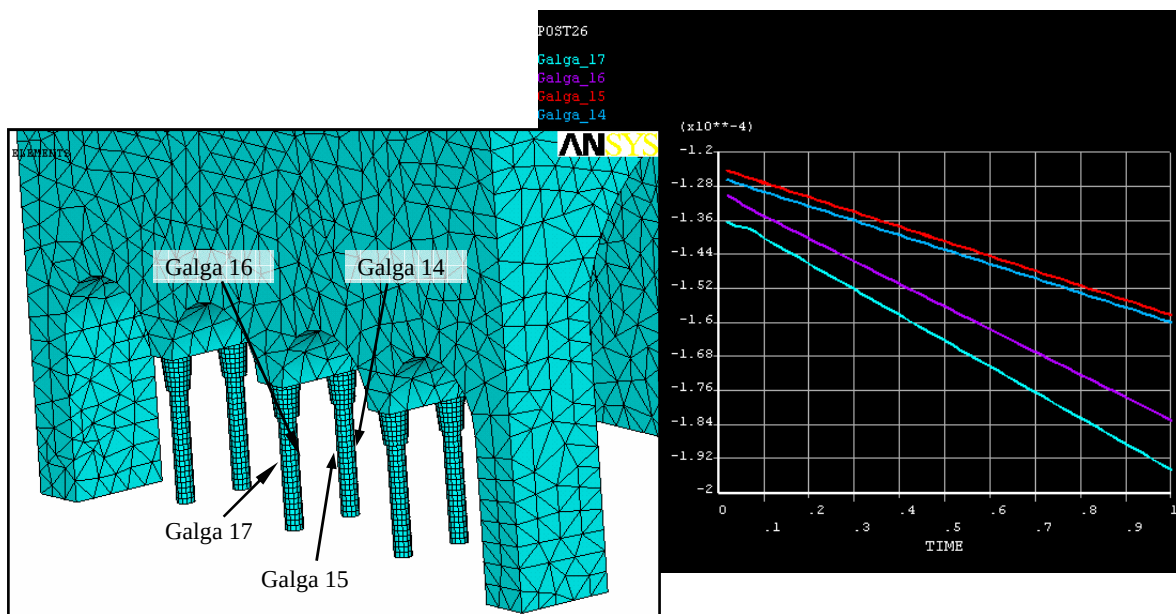


Fig. 76. Deformació columnes 3 i 4, microdeformacions-temps.

Si representem els vectors de les tensions principals, és quan es veu molt clarament com es comporten les càrregues del pes propi del claustre. En les figures 77 i 78, podem dir que no es produeix cap de les dues hipòtesis inicials. No hi ha una baixada de càrregues homogènia [Ref. 7] ni un arc de descàrrega [Re. 5].

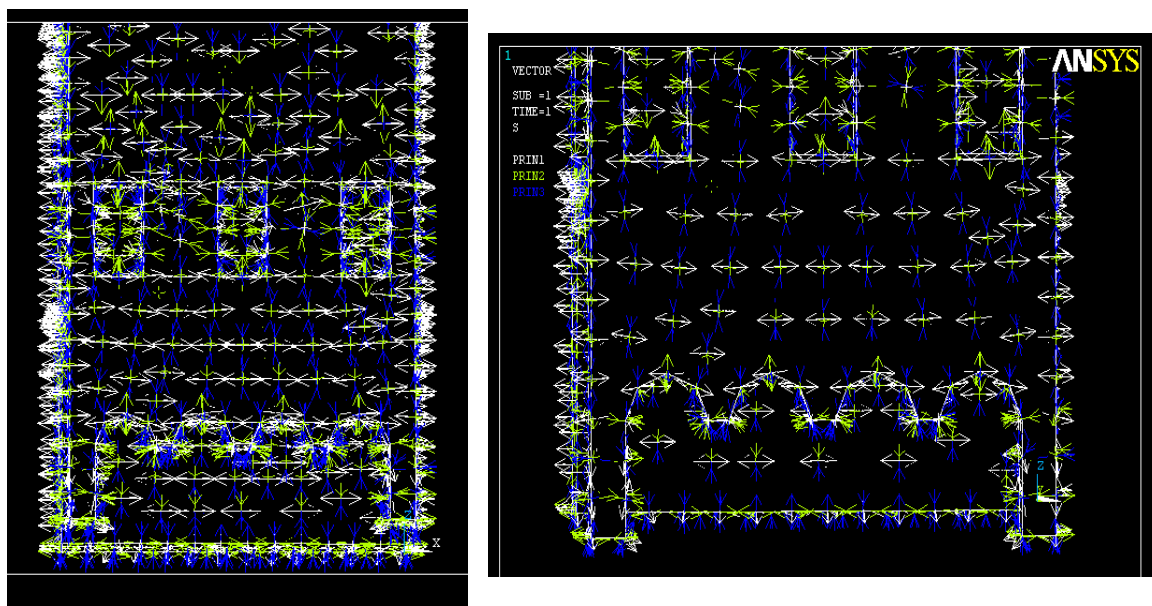


Fig. 77. Vectors tensions principals, vista general i detall (ANSYS v8.0) .

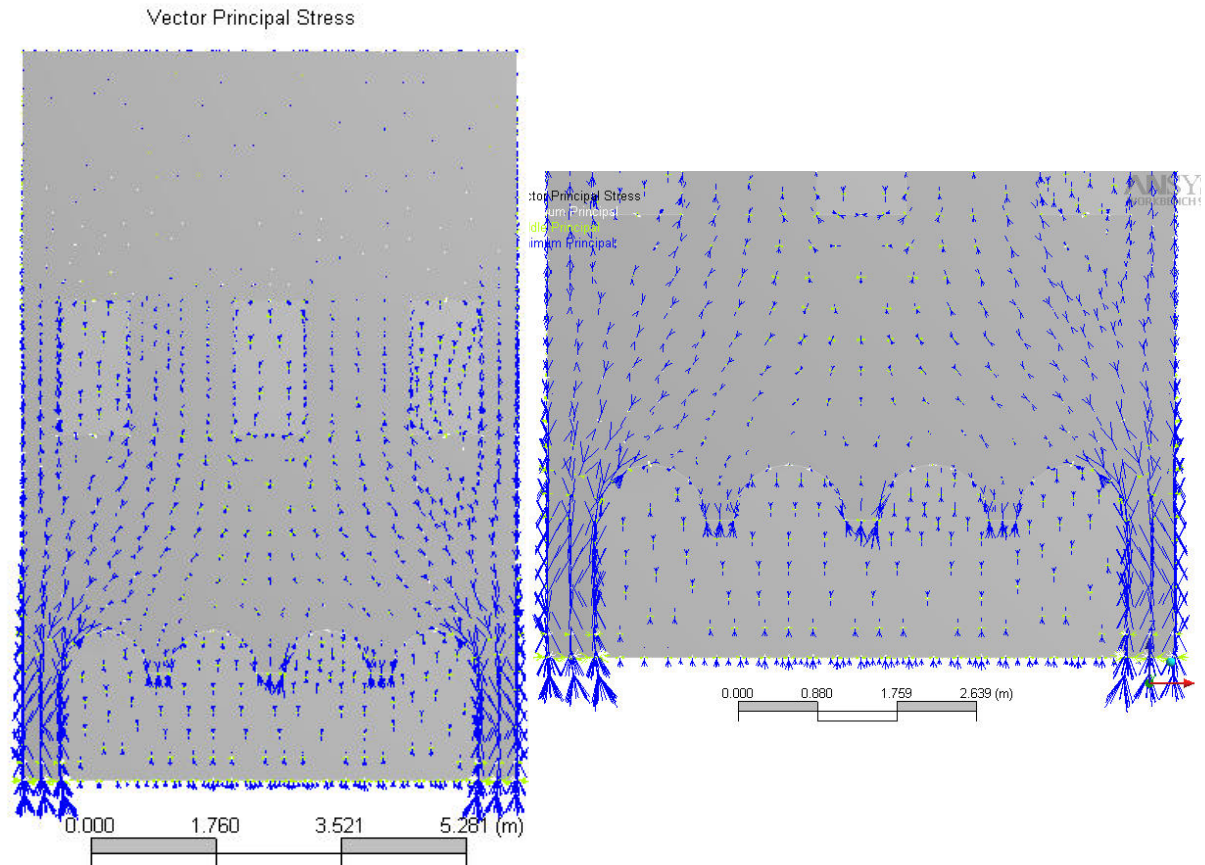


Fig. 78. Vectors tensions principals, vista general i detall (ANSYS Workbench) .

En tot cas es podria dir que es genera un arc de descàrrega tant deformat que es generen dues grans mènsules laterals que fa que la major part de les càrregues es descarreguin per les piles laterals (fig 79), fent que els parells de columnes del costat no rebin quasi bé càrregues (unes 6 tones) i en la part central del claustre les càrregues baixen cap al parell de columnes centrals (Columnes 3 i 4).

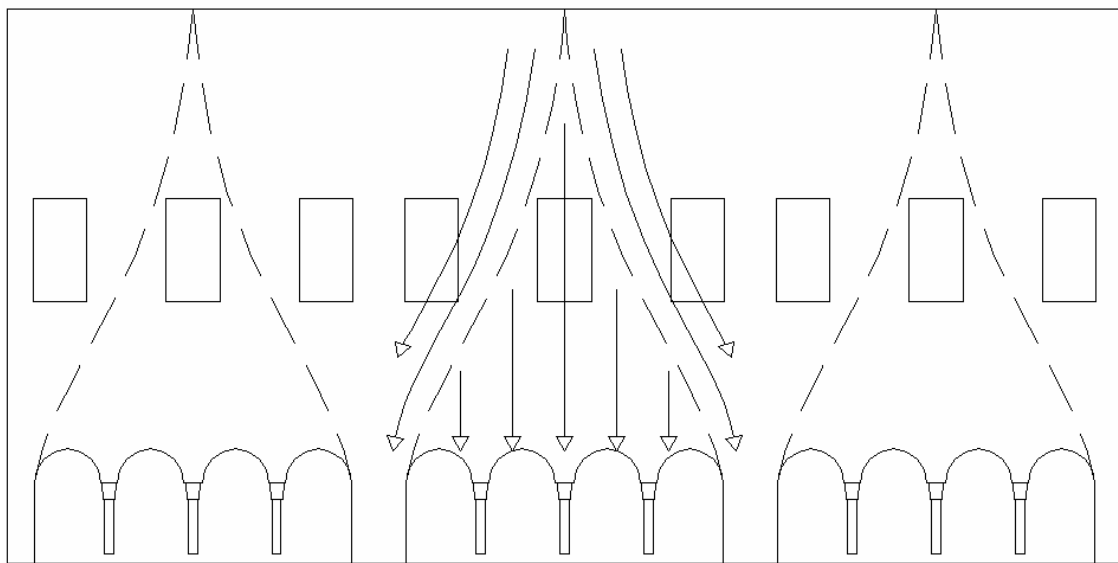


Fig. 79. Esquema del flux de càrregues.

Les columnes centrals tampoc reben tota l'àrea tributària, ja que l'àrea tributària (fig. 80) que haurien d'aguantar aquestes columnes té un volum de $19,057 \text{ m}^3 \cdot 2200 \text{ kg/m}^3 = 51.454 \text{ kg}$. Que està força lluny dels 37.000 kg. Un 30% de la càrrega va cap als laterals.

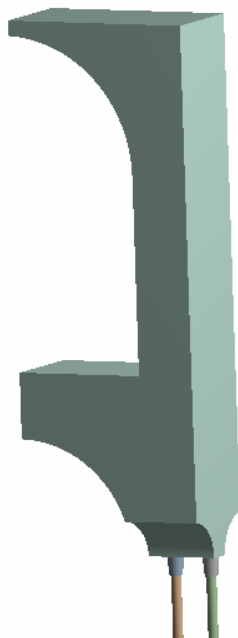


Fig. 80. Àrea tributària que haurien d'aguantar les columnes 3 i 4.

Si es decidís de fer algun treball de restauració en el claustre de la catedral de Girona, en vista dels resultats obtinguts. Caldria primer actuar amb les columnes centrals de cada quatre arc, ja que són les columnes que reben més càrrega i principalment les exteriors que són les que suporten més càrrega i al seu torn són les que han patit més el pas del temps i les agressions externes com els agents atmosfèrics o la contaminació ambiental, l'estat d'algunes d'aquestes columnes es poden veure en les imatges de la figura 80.



*Fig. 81. Estat d'algunes de les columnes del claustre de la catedral de Girona.
columna 1, columna 3 i columna 5*

8.7. Canvi d'us de la primera planta:

Una de les intencions que té el bisbat és el de donar un nou us al recinte de la primera planta de la façana nord del claustre, que es vol destinar a menjador. Cal verificar, amb el model obtingut, si les noves sobrecàrregues que es produiran podran ser absorbides per l'estructura de fàbrica.

Segons el “Código Técnico de la Edificación” [Ref. 3] en la taula “3.1-Valores característicos de las sobrecargas” que per la categoria zones d'accés al públic i subcategoria d'us C2- Zones amb seients fixos, la sobre càrrega uniforme d'us és de 4 kN/m².

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

Fig.82. Sobrecàrregues d'ús segons CTE [Ref. 3].

Les reaccions que obtenim amb el nou estat de càrregues, és el de la fig 83:

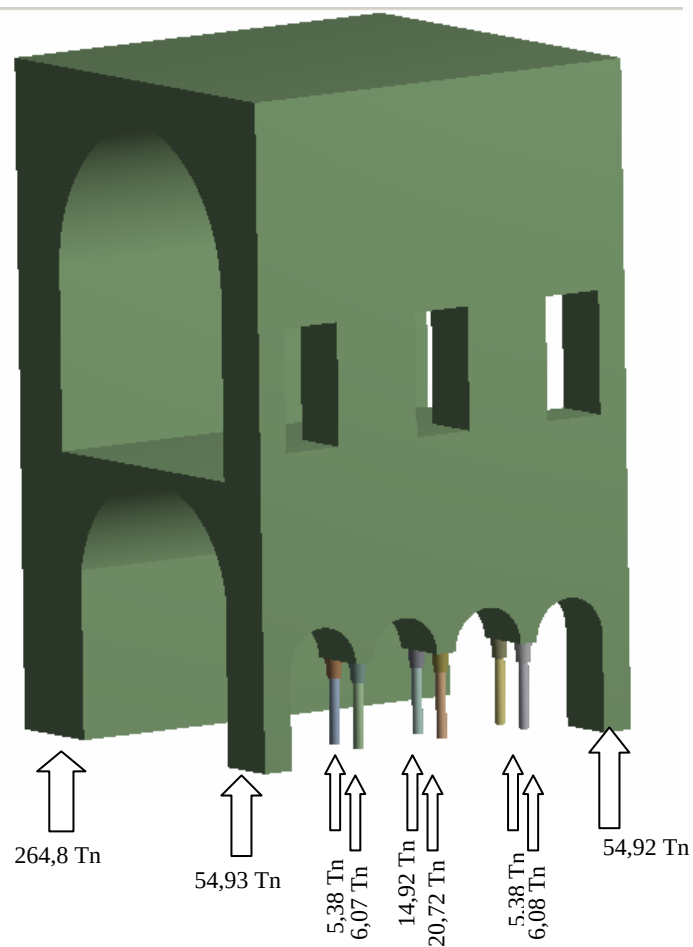


Fig. 83. Esquema de flux de les càrregues.

Les càrregues en les columnes un cop aplicades les sobrecàrregues d'ús de 4.000 Pa, quasi són imperceptibles ja que ha augmentat les reaccions en les columnes en una mitjana del 2,2%.

L'estructura d'obra de fàbrica amb tot el sistema constructiu de arcs i voltes fa que les sobrecàrregues s'absorbeixin, sense representar cap perill estructural pel conjunt històric i arquitectònic.

8.8. Descàrrega del claustre:

En aquest punt es simula la prova de descàrrega en el nostre model, per veure si es comporta com és d'esperar.

Per fer-ho apliquem una pressió ascendent en les dues arcades centrals per tal de desacoblar el cos superior del claustre dels capitells.

Però per fer-ho ens tornem a trobar amb el mateix problema amb el que ens hem trobat anteriorment. Al apretar el cos cap amunt, al tenir les piles laterals pe condicions de contorn fixades en la seva base ens impedeixen el desplaçament del cos cap amunt.

Per tal de assimilar el nostre model amb les característiques estructurals d'una obra de fàbrica, tornarem a realitzar, com hem fet anteriorment, uns contactes entre els cos del claustre amb les piles laterals (fig 84), i cada una d'aquestes parts es comportarà com un tros d'obra de fàbrica.

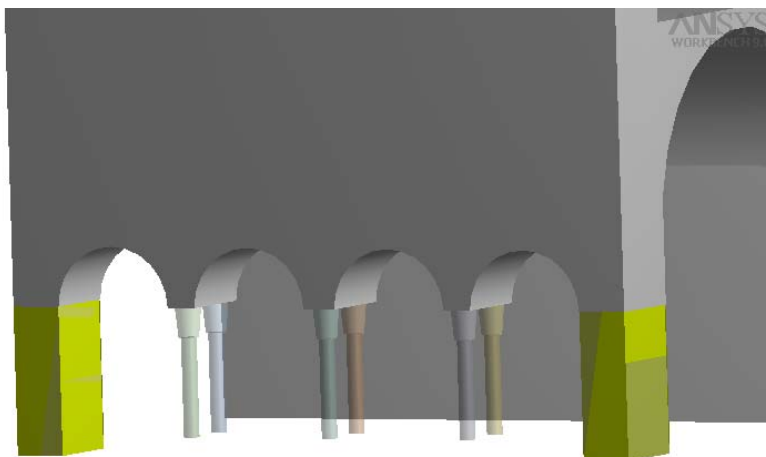


Fig. 84. Piles laterals.

Si apliquem unes pressions ascendent de 2Pistons hidràulics x 28.000 kg = 560.000 N sota de cada arc central, veiem en la figura 85, que es comença a desacoblar el contacte de la columna 3 i la columna 4 ja esta totalment descarregada. Color taronja (Sticking) vol dir que es toquen les superfícies del contacte i el color groc (Near) de la columna 3 vol dir que comencen a separar-se les superfícies.

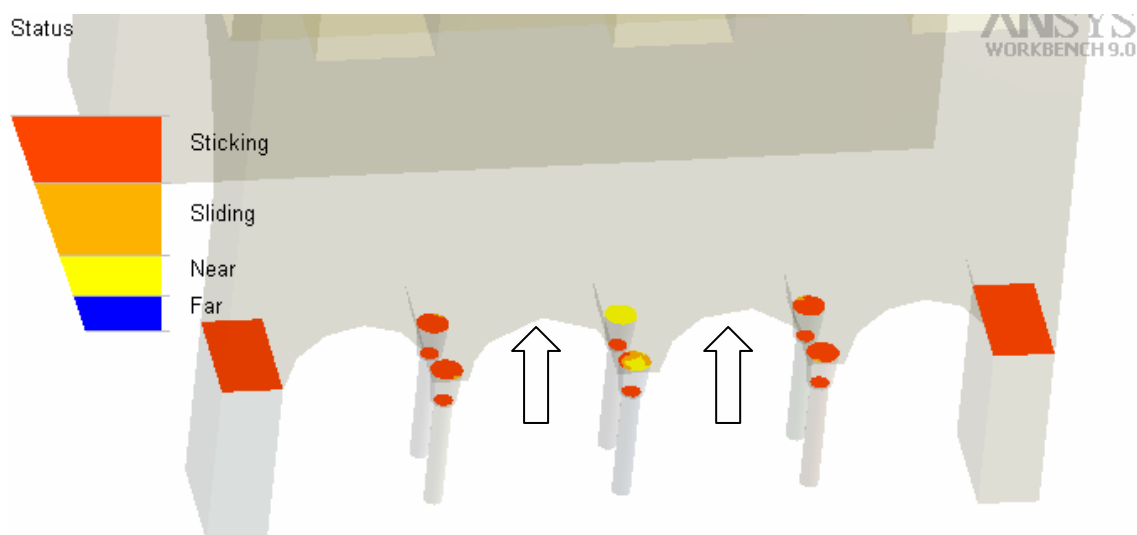


Fig. 85. Estat del contactes.

Si mirem la deformació total (fig 86) es pot veure la columna 4 de color blau, que vol dir que està totalment descarregada. En canvi la columna 3 encara rep quelcol de càrrega

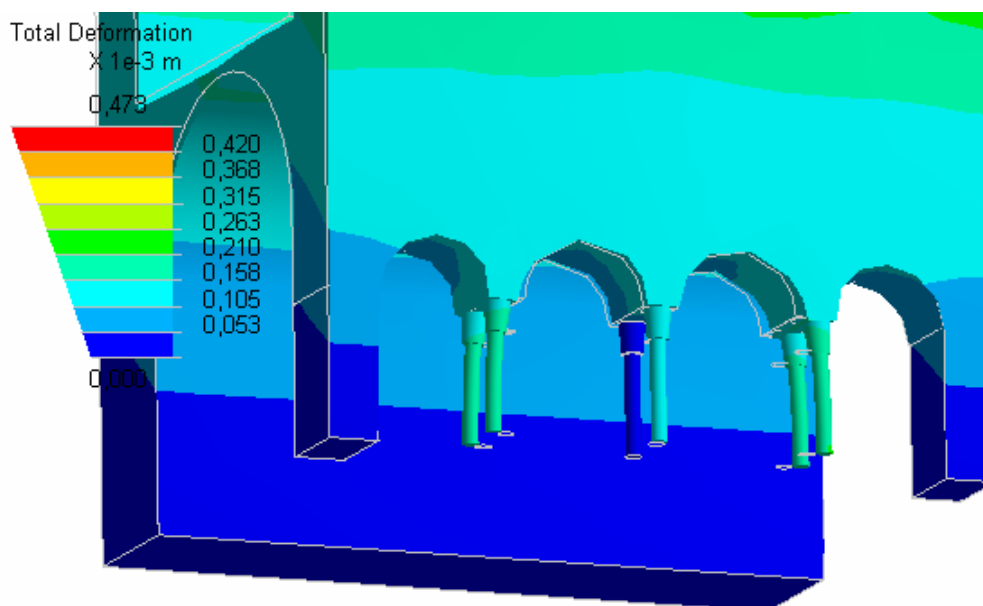


Fig. 86. Descàrrega de la columna 4.

Si augmenten la pressió a 600.000 N, estem aixecant per la part central del claustre tant que es comencen a desenganxar les columnes laterals i les columnes centrals estan totalment descarregades, com es pot comprovar en la figura 85.

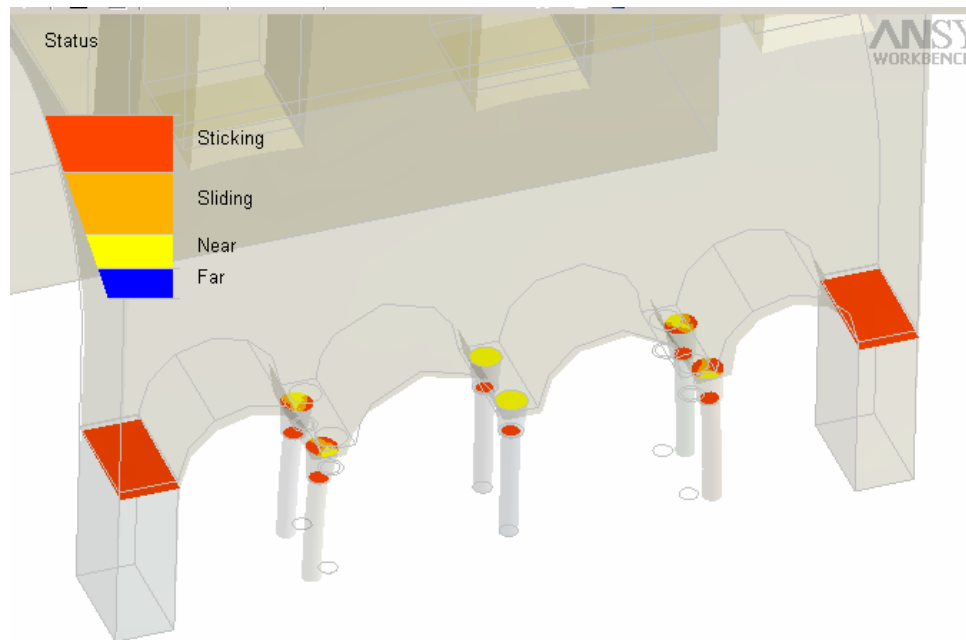


Fig. 87. Estat del contactes.

Si mirem la deformació es pot veure les columnes 3 i 4 de color blau, que vol dir que està totalment descarregada.

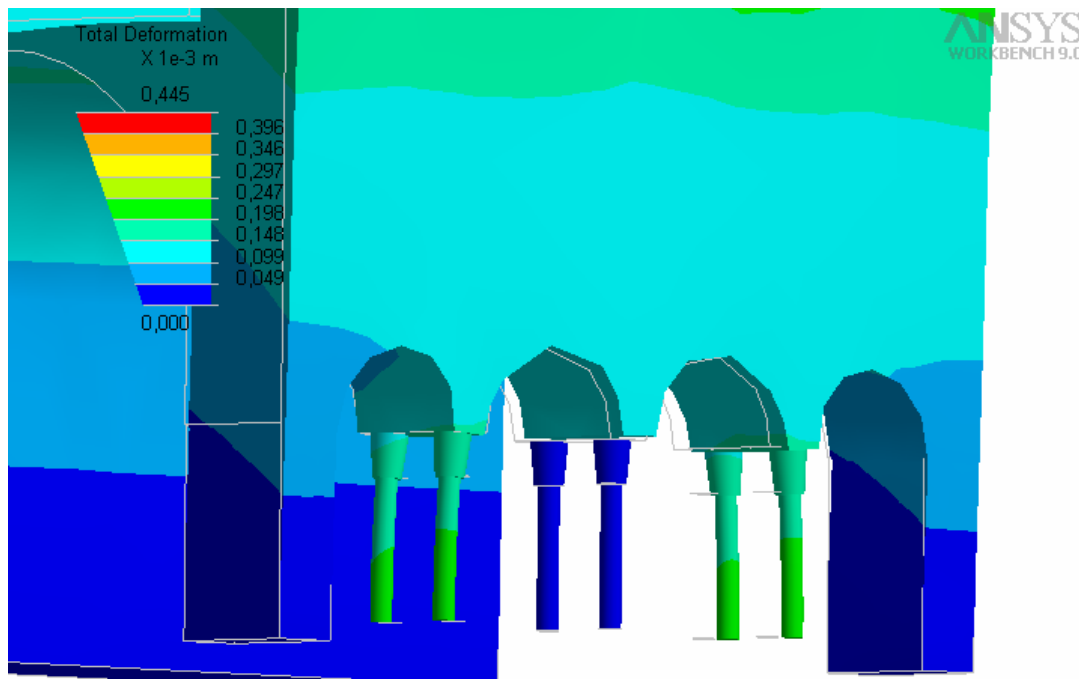


Fig. 88. Descàrrega total de les columnes centrals (columna 3 i Columna 4).

9. RESUM ECONÒMIC

COST TOTAL DE PROJECTE: 8.040 €

El pressupost necessari per la realització d'aquest projecte és de
VUIT MIL QUARANTA EUROS.

Girona, setembre del 2009

L'Estudiant redactor del projecte

Narcís Serra Font

10. CONCLUSIONS

Aquest projecte s'ha portat a terme tenint en compte varis objectius promoguts en part per l'autor del projecte i en un altre part pel director del projecte . Aquests objectius es descriuen a continuació:

- Obtenir un aprenentatge i coneixement d'eines pròpies de disseny i modelització com a complement dels estudis realitzats.
- Realitzar un treball que demostrï l'aprenentatge dels mètodes i tècniques d'anàlisi i resolució impartides a la carrera d'Enginyeria Industrial.
- Degut a la manca d'experiència prèvia en un estudi d'aquestes característiques ha fet que s'hagi hagut de començar del principi, plantejant les situacions pas per pas. També ha sigut una mica difícil l'aprenentatge del funcionament del programa ANSYS amb aquestes característiques ja que sovint és difícil estar segur de si s'està fent la modelització correctament. S'ha hagut d'aprendre a realitzar contactes de forma autodidacte ja que no existeix massa informació al respecte. Per poder entendre el funcionament del programa i obtenir resultats coherents s'ha hagut d'avançar lentament.
- Com que no es tenia cap model amb els estudis anteriors s'ha hagut de crear un model pas a pas i amb metodologia inversa de la galeria nord del claustre de la Catedral de Girona. Els estudis anteriors realitzats amb altres programes de programació amb elements finits donaven resultats contradictoris entre ells, mentre que uns deien que es generava un arc de descàrrega altres conclouien que no i les carregues baixaven homogèniament. En vista de que no teníem cap model concloent i coneixent les dades de la prova de càrrega realitzada al 2007, per tant tenim resultats reals. Hem anat creant un model no lineal pas a pas fins a obtenir un model que ens ha semblat prou similar a la realitat. I un cop assolit un model força similar a la realitat tot-hi les limitacions que pot tenir aquest, s'ha pogut afirmar com també es va veure en la prova de càrrega:
 - Que no es forma cap arc de descàrrega segons descriu el punt 1.1.1 però tampoc es produeix l'altre hipòtesi que cada columna suporta la seva part de càrrega corresponent segons un model d'àrees tributàries dels pisos superiors, punt 1.1.2. En tot cas es podria dir que es genera un arc de descàrrega tant deformat que això fa que en tota la façana del claustre es creïn grans mènsoles en les zones de les piles, descarregant-se la major part de la càrrega per aquestes.
 - El parell de columnes centrals ha de suportar quasi tota l'àrea tributària de sobre seu (aproximadament el 70%) i a conseqüència d'això, potser s'haurà d'intervenir en l'estat d'aquestes columnes ja que n'hi ha de molt malmeses. Les columnes dels costats aguanten molt poca càrrega i tota la càrrega del claustre és aguantada per les piles laterals.

- S'ha pogut observar al llarg de la creació del model com les columnes exteriors del Claustre (les que donen al pati interior) han de suportar més càrrega que les columnes interiors.
Per un altre banda, aquestes mateixes columnes exteriors són les que es troben en més mal estat i les que presenten els danys més greus per la càrrega que suporten. Per tant, s'haurà de dur a terme un procés de reparació i substitució segons l'estudi realitzat en el projecte "Proves de càrrega al claustre de la catedral de Girona", [Ref.6]. Aquest anàlisi s'ha efectuat només sobre les columnes centrals de l'ala nord del Claustre i en un futur s'hauria de fer extensible a la resta de columnes mitjançant el mateix sistema. Per fer-ho es podria utilitzar el model creat en aquest projecte per fer extrapolable a la totalitat del claustre.
- El model volumètric no lineal creat en aquest treball pot servir per a futurs treballs. Per tal de determinar, amb models ajustats a altres parts del claustre de la catedral de Girona, de forma no invasiva (proves de càrrega) l'estat de càrregues de la resta de columnes del claustre i determinar si cal una campanya de restauració. Poden determinar quines són les columnes o ports del claustre que aguanten més càrrega i per tant més susceptibles de la fallada estructural.

Girona, setembre del 2009

L'Estudiant redactor del projecte

Narcís Serra Font

11. RELACIÓ DE DOCUMENTS EN EL PROJECTE

DOCUMENT 1: MEMÒRIA I ANNEXOS A LA MEMÒRIA

Memòria

Annex A.- CARACTERITZACIÓ DEL MATERIAL PEDRA DE
GIRONA

Annex B.- ESTUDI DE LA INTERCOMUNICACIÓ.

Annex C.- MODELITZACIÓ DE LA GALERIA NORD DEL
CLAUSTRE DE LA CATEDRAL DE GIRONA.

Annex D.- DISSENY DEL PILAR SECUDARI.

Annex E.- ESTUDI ECONÒMIC.

DOCUMENT 2: PLÀNOLS

12. BIBLIOGRAFIA

La bibliografia utilitzada per a la realització del present estudi ha estat:

Llibre:

ANCEDONDO VERDU, Francisco. "Piedra, ceràmica y vidrio", Editorial RUGARTE,SL (1991). [Ref.1]

Projecte/Treball Fi de Carrera:

Bras, X, González, A i Vandenbrossche, P. "Anàlisi de les columnes del Claustre de la Catedral de Girona". Projecte Final de Carrera. Escola politècnica Superior. Universitat de Girona (2001).

Projecte/Treball Fi de Carrera:

BASSOLS, C. i COMAS, M. "Proposta d'un sistema d'instrumentació complet per la prova de càrrega del Claustre de la Catedral de Girona". Projecte Final de Carrera. Escola politècnica Superior. Universitat de Girona (2002). [Ref.2]

Projecte/Treball Fi de Carrera:

CANÓN MALLÉN, Eduard. "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. (2005).

Altres publicacions:

"Código Técnico de la Edificación". Editat pel Ministerio de Vivienda. Any 2006. [Ref.3]

Llibre:

"La pedra de Girona, Girona itineraris" editat per l'Ajuntament de Girona. [Ref.4]

Altres publicacions:

Llorens, M. "Conveni de col·laboració científica entre la Universitat de Girona i el Bisbat de Girona". Realitzat l'any 2006.

Projecte/Treball Fi de Carrera:

PUIG, F. "Anàlisi estructural de la façana nord del Claustre de la Catedral de Girona". Projecte Final de Carrera. Escola politècnica Superior. Universitat de Girona. (1999). [Ref.5]

Projecte/Treball Fi de Carrera:

SALCEDO DESPLANS, Àlex. "Proves de càrrega al claustre de la catedral de Girona". Projecte Final de Carrera. Escola politècnica Superior. Universitat de Girona. (2007). [Ref.6]

Material obtingut a la xarxa:

Universitat d'Albèrta.(<http://www.mece.ualberta.ca/tutorials/ansys/index.html>, 3 de Novembre del 2005).

Projecte/Treball Fi de Carrera:

VAN PETEGHEM, S. "Techniques of structural analysis applied to historical construction; Study of the cloister of the Cathedral of Gerona". Projecte Final de Carrera. Escola politècnica Superior. Universitat de Girona. (2002). [Ref.7]

ANNEXOS

ANNEX A:

CARACTERITZACIÓ DEL MATERIAL PEDRA DE GIRONA.....pàg.78

ANNEX B:

ESTUDI DE LA INTERCOMUNICACIÓ.....pàg.82

ANNEX C:

MODELITZACIÓ DE LA GALERIA NORD
DEL CLAUSTRE DE LA CATEDRAL DE GIRONA..... pàg.100

ANNEX D:

DISSENY DEL PILAR SECUNDARI.....pàg.115

ANNEX E:

ESTUDI ECONÒMIC.....pàg.127