



Titulació:

Grau en Enginyeria en Tecnologies Industrials

Alumne:

Jordi Garcia Valero

Títol:

Estudi estructural del Mas Can Codorniu utilitzant un codi d'element finits.

Director(s):

Jordi Marcé Nogué

Lluís Gil Espert

Data entrega:

29 de Juny de 2015

Estudi estructural del Mas Can Codorniu utilitzant un codi d'elements finits

Memòria

Autor: Jordi Garcia Valero

Director(s): Jordi Marcé Nogué i Lluís Gil Espert

Data d'entrega: 29 de Juny de 2015

Agraïments

En primer lloc, m'agradaria donar les gràcies per la ajuda i coneixements proporcionats durant el desenvolupament de l'estudi al director Jordi Marcé Nogué, que per motius personals no ha pogut concloure el treball fins al final amb mi. De igual manera agrair el recolzament, ajut i coneixements, al director Lluís Gil Espert per fer-se càrrec del projecte que estava a mig acabar, i ajudar-me a concloure'l. Als dos agrair la ràpida contestació a totes les qüestions que m'anaven sorgint a mesura que avançava en el desenvolupament del projecte i l'aportació de diverses idees que ha fet possible la finalització del projecte. Aquest treball ha comptat amb el suport del projecte BIA2012-32234 del MIN. DE ECONOMIA Y COMPETITIVIDAD.

Per altre banda agrair a la Gisela Guitart i la Raquel Olesa, responsables d'esdeveniments de les Caves Codorniu, l'ajuda prestada a la hora de representar el model tridimensional dels edificis estudiats, així com també la petita visita guiada a les instal·lacions.

En últim lloc, no em puc oblidar de tots els familiars i amics que m'han recolzat i ajudat a la completa finalització de l'estudi.

A tots vosaltres, moltes gràcies.

INDEX

1.- Objectiu	9
2.- Abast	9
3.- Justificació	10
4.- Requeriments	10
4.1.- Normativa vigent	10
5.- Antecedents	11
6.- Breu introducció al Mas Can Codorniu	11
7.- Coneixements Teòrics	14
7.1- Mètode d'elements finits (MEF)	14
7.1.1- Hipòtesis de discretització	14
7.1.2.- Funcions d'interpolació	15
7.2.- Equacions generals.....	16
7.2.1.- Camp de deformacions.....	16
7.2.2.- Deformacions unitàries	17
7.2.3.- Estat de tensions. Equació constitutiva.....	18
7.2.4.- Equació d'equilibri d'un element	19
7.3.- Criteris de fallada	20
7.3.1.- Teoria del màxim esforç normal. Teoria de Rankine	22
7.4.- Document Bàsic SE-AE	23
8.- Programes utilitzats	24
8.1.- CATIA	25
8.2.- ANSYS.....	25
9.- Implementació de l'estudi	27
9.1.- Modelat de l'edifici en CAT (CATIA)	27
9.1.1.- Plànols de l'edifici	27
9.1.2.- Visita guiada al Mas Can Codorniu.....	30
9.2.- Hipòtesis generals.....	33
9.2.2.- Materials constructius	33
9.2.2.1.- Càlcul de propietats del material constructiu	34

9.2.3.- Condicions de contorn	35
9.2.4.- Càrregues exteriors	35
9.3.- Importació del model a ANSYS	36
9.4.- Mallat de l'edifici.....	37
9.4.1.- Mallat per parts.....	41
9.4.2.- Mallar com a únic sòlid	43
9.5.- Aplicació de les hipòtesis	45
9.5.1.- Aplicació de recolzaments	45
9.5.2.- Aplicació de càrregues externes.....	45
9.5.2.1.- Càrregues de neu	46
9.5.2.2.- Càrregues de vent.....	46
9.6.- Estudi amb accions de vent i neu.....	46
9.6.1.- Pre procés	46
9.6.1.1.- Aplicació de les càrregues fixes	46
9.6.1.2.- Aplicació de les càrregues variables	47
9.6.2.- Post procés.....	48
9.6.2.1.- Deformacions	48
9.6.2.2.- Teoria del màxim esforç normal. Teoria Rankine	50
9.6.3.- Anàlisis dels resultats	55
9.7.- Estudi de fallada.....	56
9.7.1.- Pre - procés	56
9.7.2.- Post procés.....	57
9.7.2.1.- Estudi de deformacions.....	57
9.7.2.2.- Teoria del màxim esforç normal. Teoria Rankine	58
9.7.3.- Anàlisis del resultats	63
10.- Conclusions generals	64
11.- Continuacions de l'estudi.....	64
12.- Impacte mediambiental.....	65
13.- Pressupost	66
14.- Bibliografia.....	67

LLISTA DE FIGURES

Figura 1.- Façana porxo de premses	12
Figura 2.- Detall de la façana	12
Figura 3.- Porxo de premses	13
Figura 4.- Interior del celler gran	13
Figura 5.- Deformacions d'un element finit.....	17
Figura 6.- Forces sobre un element finit.....	19
Figura 7.- Diagrama esforç - deformació de materials dúctils i fràgils	21
Figura 8.- Cercles de Mohr	22
Figura 9.- Representació gràfica de la Teoria Rankine	23
Figura 10.- Logotip DSS CATIA	25
Figura 11.- Mòduls de ANSYS	25
Figura 12.- Alçat de la façana principal	28
Figura 13.- Alçat de la façana posterior	28
Figura 14.- Secció transversal dels dos edificis	29
Figura 15.- Modelat final de l'edifici.....	30
Figura 16.- Fotografia dels pilars i modelat posterior	31
Figura 17.- Fotografia dels elements d'unió i modelat posterior	31
Figura 18.- Fotografia i modelat de la nau lateral.....	31
Figura 19.- Fotografia i model del porxo de premses	32
Figura 20.- Façana lateral.....	32
Figura 21.- Edifici explosionat.....	33
Figura 22.- Model importat a ANSYS	36
Figura 23.- Exemple de mallat per proximitat.....	37
Figura 24.- Elements amb una qualitat de 0,88.....	38
Figura 25.- Mallat façana principal	41
Figura 26.- Mallat porxo de premses.....	41
Figura 27.- Mallat façana posterior	42
Figura 28.- Mallat celler gran	42
Figura 29.- Mallat unions entre edificis.....	42
Figura 30.- Mallat com un únic sòlid.....	44
Figura 31.- Recolzaments.....	45
Figura 32.- Carrega de pes propi.....	47
Figura 33.- Acció de neu.....	47
Figura 34.- Acció del vent	48
Figura 35.- Rang de desplaçaments [mm]. Estudi 1.....	49
Figura 36.- Vista superior desplaçaments. Estudi 1	49
Figura 37.- Detall interior dels desplaçaments. Estudi 1.....	49
Figura 38.- Rang de tensions [Pa]. Estudi 1.....	50

Figura 39.- Zones mes sol·licitades del porxo de premses. Estudi 1.....	51
Figura 40.- Zones més sol·licitades del celler gran. Estudi 1	51
Figura 41.- Detall de la façana posterior	52
Figura 42.- Rang de Tensions [Pa] (1a Tensió principal). Estudi 1.....	52
Figura 43.- Zones sol·licitades a tracció. Estudi 1	53
Figura 44.- Rang de tensions [Pa] (3a tensió principal). Estudi 1	53
Figura 45.- Zones sol·licitades a compressió. Estudi 1	54
Figura 46.- Detall de la façana posterior	55
Figura 47.- Recolzaments elàstics	57
Figura 48.-Rang de deformacions [mm]. Porxo de premses. Estudi 2.....	57
Figura 49.- Zones deformades. Porxo de premses. Estudi 2	57
Figura 50.- Rang de deformacions [mm]. Celler gran. Estudi 2	58
Figura 51.- Zones deformades. Celler gran. Estudi 2.....	58
Figura 52.- Rang de tensions [Pa]. Porxo de premses. Estudi 2	59
Figura 53.- Zones a tensió. Porxo de premses Estudi 2.....	59
Figura 54.- Rang de tensions [Pa]. Celler gran. Estudi 2.....	59
Figura 55.- Zones sotmeses a tensió. Celler gran. Estudi 2.....	59
Figura 56.- Rang de tensions [Pa] (1a tensió). Porxo de premses. Estudi 2.....	60
Figura 57.- Zones afectades per la tracció. Porxo de premses. Estudi 2.....	60
Figura 58.- Rang de tensions [Pa] (1a tensió). Celler gran. Estudi 2.....	61
Figura 59.- Zones afectades per la tracció. Celler gran. Estudi 2	61
Figura 60.- Rang de tensions [Pa] (3a tensió). Porxo de premses. Estudi 2.....	61
Figura 61.- Zona a més tensió de compressió. Porxo de premses. Estudi 2.....	62
Figura 62.- Rang de tensions [Pa] (3a tensió). Celler gran. Estudi 2.....	62
Figura 63.- Pilar sol·licitat a compressió. Celler gran. Estudi 2.....	62

LLISTA DE TAULES

Taula 1.- Teories de fallada	21
Taula 2.- Accions del DB-SE	24
Taula 3.- Propietats del material utilitzades a la simulació	34
Taula 4.- Defaults de Malla principal	39
Tabla 5.- Sizing de Malla principal	39
Taula 6.- Inflation de Malla principal.....	39
Taula 7.- Patch conforming option Malla principal.....	40
Taula 8.- Patch independent option Malla principal.....	40
Tabla 9.- Advanced Malla principal	40
Tabla 10.- Defeaturing Malla principal.....	40
Taula 11.- Dades del mallat per sòlids	43
Taula 12.- Planificació de fase posterior	65
Taula 13.- Cost total de l'estudi.....	66

1.- Objectiu

Les caves de Codorniu de Sant Sadurn d'Anoia van ser construïdes sota les ordres de Manuel Raventós (1895-1915), segons el projecte de Josep Puig i Cadafalch. Puig va construir el porxo de premses, el celler gran i el pavelló d'expedicions (1904), i i va refer la masia o Torre de Can Codorniu (1906). En aquell moment Codorniu produïa unes 100.000 ampolles de cava anuals, per això la dimensió dels cellers semblava desproporcionadament gran per a aquesta producció, a més d'estar lluny del ferrocarril. Aquest celler fou nomenat Monument Històric Artístic el 1976 i es pot visitar regularment.

A partir dels plànols sobre paper disponibles al Patrimoni de la Generalitat de Catalunya, l'objectiu del treball és la modelització en CAD del model tridimensional i el posterior anàlisi per elements finits (amb el software ANSYS) del seu comportament estructural enfront les diverses accions que proposa el Codi Tècnic d'Edificació. Finalment es realitzarà un anàlisi exhaustiu dels resultats obtinguts i la seva interpretació.

2.- Abast

El Mas Can Codorniu és un conjunt d'edificis d'estil modernistes projectats per l'arquitecte Puig i Cadafalch, no obstant, l'estudi només constarà de dos edificis que estan situats un al costat de l'altre. Concretament es tracta dels edificis del Porxo de Premses i del Gran Celler.

Com ja s'ha dit amb anterioritat, es realitzarà una modelització amb softwares de CAD, concretament amb el programa CATIA, del model tridimensional, a partir dels plànols obtinguts a al Patrimoni de la Generalitat, i posteriors visites a l'edifici. Un cop finalitzada la modelització, es procedirà al anàlisi de l'edifici per el seu anàlisi utilitzant elements finits en diferents casos d'estudi (estàtic, anàlisi modal) seguint les càrregues i accions proposades en el Codi Tècnic d'Edificació. Finalment es procedirà a la interpretació i anàlisi exhaustius dels resultats obtinguts.

Per altre banda es procurarà obtenir informació sobre els materials emprats en la construcció dels esmentats edificis, així com també un anàlisi dels seu comportament estructural.

3.- Justificació

Les noves tecnologies ofereixen la possibilitat de simular i observar com reacciona un sistema o peça, que no es fa físicament, davant la sol·licitud d'unes accions o forces. El programa ANSYS que s'utilitzarà en el present estudi és una eina molt potent de càlcul i simulació de sistemes, que permet pronosticar, al nivell que es requereixi, com es comportaran les estructures en situacions específiques.

Precisament això és el que es pretén demostrar en aquest estudi, utilitzant com exemple dos edificis del Mas Can Codorniu. Es pretén demostrar la utilitat dels mètodes computacionals i de simulació per pronosticar possibles fallades de una estructura o simplement com es comporta el sistema davant l'acció de forces, en el nostre cas determinades pel DB_SE-AE.

4.- Requeriments

Per l'assoliment dels objectius marcats, es necessitaran coneixements de expressió gràfica, així com també de mecànica del medi continu i de resistència de materials. Per altre banda també es requeriran coneixements de teoria d'estructures i construccions industrials.

Paral·lelament durant la realització del treball es requerirà la obtenció dels plànols originals de l'arquitecte, així com les eines necessàries per a la obtenció dels resultats, en el nostre cas seran els programes de CATIA i ANSYS. També s'haurà d'obtenir el codi tècnic d'edificació necessari per l'aplicació de les càrregues i accions, així com també comparar els resultats obtinguts.

4.1.- Normativa vigent

Existeix una normativa legal i tècnica vigent relacionada amb la realització d'aquest tipus de treballs. Com ja s'ha dit amb anterioritat aquesta és el Codi Tècnic d'Edificació, el qual es seguirà per realitzar l'estudi, concretament el Document Bàsic SE-AE.

5.- Antecedents

Els tècnics que treballen en projectes i obres de habilitació i/o reforma d'edificis ja existents es troben amb les dificultats que planteja projectar o dirigir la intervenció. A nivell mundial existeix poca normativa de referència per aquest tipus d'obres. No obstant, existeixen projectes relatius a anàlisis estructurals d'edificis utilitzant codis d'elements finits que poden ajudar a establir uns antecedents del treball que es realitzarà.

6.- Breu introducció al Mas Can Codorniu

Les caves Codorniu, situades al municipi de Sant Sadurn d'Anoia, constitueixen un important edifici del modernisme català que, a més, té la qualificació de monument historicoartístic nacional.

El conjunt del mas i les caves Codorniu, declarat bé cultural d'interès nacional, fou totalment projectat i construït per l'arquitecte Josep Puig i Cadafalch entre els anys 1902 i 1915. El conjunt està format una sèrie d'edificis entre els quals destaquen: el porxo de premses, el celler gran i el pavelló d'expedicions (1904), a més del Mas o Torre de can Codorniu (1906). La força d'aquests edificis no està en la decoració o riquesa dels materials, sinó en els propis elements estructurals. El material per excel·lència és el maó vist i destaca l'ús d'ampolles de cava per fer el trencadís que decora les façanes. A nivell estructural, destaca l'ús de la volta que tant defensava Puig i Cadafalch i l'assaig de diferents tipus d'arc. En aquest document es treballarà sobre dos dels edificis esmentats: el porxo de premses i el celler gran.

El porxo de premses és un edifici de planta rectangular recobert per successives voltes de maó pla sobre arcs de mig punt que arrenquen de terra. Cada tram de volta s'obre al exterior a través d'un arc apuntat. La façana es corona amb un capcer en el que predomina un trencadís d'ampolles de cava.

A continuació es mostren unes quantes imatges on ens podrem fer una primera impressió de com és el edifici que es pretén estudiar en el present estudi estructural



Figura 1.- Façana porxo de premses



Figura 2.- Detall de la façana

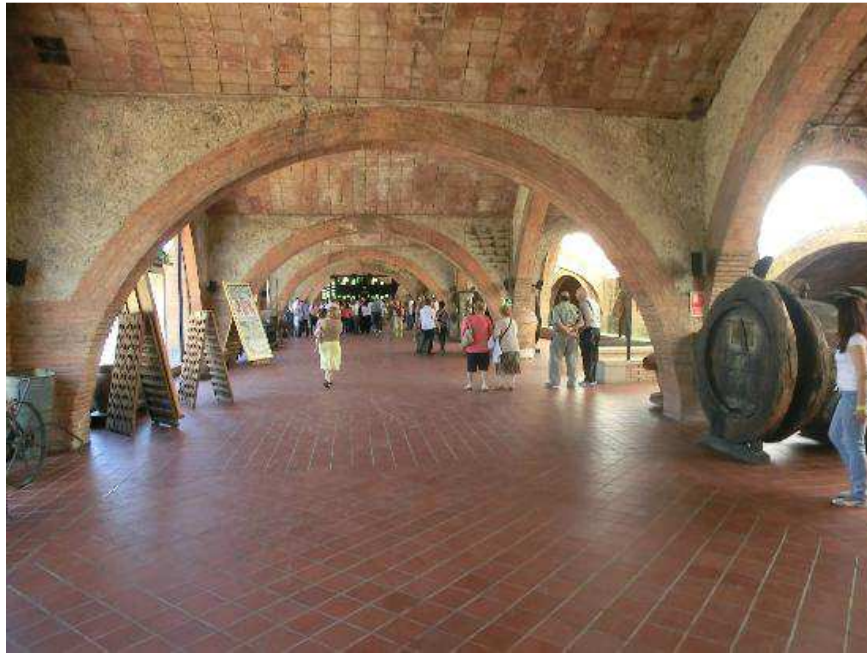


Figura 3.- Porxo de premses

Per sota dels arcs que es veuen a la figura es passaven les cistelles de raïm per ser premsades en grans premses situades al seu interior. Una vegada extret el suc del raïm, mitjançant unes canonades i amb l'acció de la gravetat passaven al gran celler on s'emmagatzemava.

Al seu costat es troba el celler gran, també de planta rectangular, cobert amb successives voltes de maó pla, sustentades per arcs de mig punt que arranquen del pilars cap els quatre costats. La il·luminació es fa a través de finestres de gelosia esglaonades i badalots.



Figura 4.- Interior del celler gran

7.- Coneixements Teòrics

7.1- Mètode d'elements finits (MEF)

A continuació s'explicarà la base matemàtica de resolució dels models d'elements finits (MEF). El MEF permet realitzar un model matemàtic de càlcul del sistema real, més fàcil y econòmic de modificar que un prototip. No deixa de ser un mètode aproximat degut a les hipòtesis bàsiques del mètode, per tant, els prototips segueixen sent necessaris en un a menor mesura.

La Teoria de la Elasticitat estableix per a un problema, les relacions matemàtiques exactes en forma diferencial, i planteja la seva integració tancant el problema amb condicions inicials i de contorn per obtenir les funcions que defineixen les variables representatives del comportament de la estructura. El MEF es tracta d'una simplificació de dites equacions, ja que la seva forma diferencial es substitueix per un conjunt discret de equacions y de les seves respectives condicions de contorn per a la posterior resolució. En funció del nombre d'equacions serà necessari (com en el nostre cas) o no implementar el problema per a una resolució computeritzada.

7.1.1- Hipòtesis de discretització

En una estructura discreta, la seva deformació ve definida per un nombre finit de paràmetres, que junts formen el vector de deformacions Δ , i la estructura te tantes formes de deformar-se com termes tingui el vector. Un medi continu té infinites formes possibles de deformar-se, ja que cada punt pot desplaçar-se mantenint fixes qualsevol nombre finit de punts restants. Per tant la configuració deformada es una funció vectorial (u) amb tres components escalars:

$$u = \begin{pmatrix} u(x, y, z) \\ v(x, y, z) \\ w(x, y, z) \end{pmatrix}$$

Aquesta funció es la solució de la equació diferencial que regeix el problema y compleix les condicions de contorn imposades, però en principi no es pot assegurar que la funció (u) tingui una expressió analítica manejable. Llavors per resoldre el problema, el MEF recorre a la hipòtesis de discretització que es basa en el següent:

- El conjunt es divideix mitjançant línies o superfícies imaginàries en una sèrie de regions contigües i disjunes entre sí, normalitzades, anomenades elements finits.
- Els elements finits s'uneixen entre sí en un nombre finit de punts, anomenats nusos.
- Els desplaçaments dels nusos són les incògnites bàsiques del problema i determinen la configuració deformada de l'estructura.
- El desplaçament de un punt qualsevol ve determinat pels desplaçaments dels nusos de l'element al que pertany el punt. Per això es defineixen per a cada element unes funcions d'interpolació que permeten calcular el valor de qualsevol desplaçament interior per interpolació dels desplaçaments nodals.
- Per a cada element existeixen un sistema de forces concentrades en els nusos, que equilibren les tensions existents en el contorn de l'element, i a les forces exteriors actuant sobre ell.

Per tant, els dos aspectes més importants d'aquesta hipòtesis, sobre els que hem de parar més atenció són:

- La funció solució (u) es aproxima de forma independent en cada element. Per a una estructura discretitzada en diversos elements poden utilitzar-se funcions d'interpolació diferents.
- La funció solució es aproxima dins de cada element, recolzant-se en un nombre finit de paràmetres, que són els valors de dita funció en els nusos que configuren l'element.

7.1.2.- Funcions d'interpolació

Considerant un element finit qualsevol, definit per un nombre de nodes n . Un punt qualsevol del element té un desplaçament definit per un vector (u), que per facilitar la notació té només dos components i es pla:

$$u = \begin{Bmatrix} u(x, y) \\ v(x, y) \end{Bmatrix}$$

Els nusos de l'element tenen una sèrie de graus de llibertat que corresponen als valors en ells els desplaçaments i formen un vector δ . Que en el cas descrit correspon a:

$$\delta = \{U_1 \quad V_1 \quad U_2 \quad V_2 \quad \dots \quad U_n \quad V_n\}^T$$

El camp de deformacions en l'interior de l'element s'aproxima fent ús de la hipòtesis d'interpolació de deformacions:

$$u = \sum N_i U_i \quad v = \sum N_i V_i$$

La matriu de funcions d'interpolació N té tantes files com desplaçaments tingui el punt P i tantes columnes com graus de llibertat hi hagi entre tots els nusos de l'element. Les funcions d'interpolació don habitualment polinomis, que s'han de poder definir utilitzant les deformacions nodals de l'element. Per tant, es podran utilitzar polinomis amb tants termes com graus de llibertat tingui l'element. Aquestes funcions d'interpolació estan definides únicament per a l'element, i són nul·les en l'exterior de dit element.

7.2.- Equacions generals

7.2.1.- Camp de deformacions

El camp de deformacions en un punt qualsevol del domini està definit per un vector (u) que té tantes components com deformacions existeixen en el domini. Per a l cas d'un problema al espai es:

$$u = \begin{Bmatrix} u(x, y, z) \\ v(x, y, z) \\ w(x, y, z) \end{Bmatrix}$$

Si es considera un element finit qualsevol, el camp de deformacions en el seu interior s'aproxima, fent ús de la hipòtesis d'interpolació, com un promig ponderat de les deformacions en cada nus n del element, sent els factors de ponderació les funcions d'interpolació:

$$u = \sum N_i U_i \quad v = \sum N_i V_i \quad w = \sum N_i W_i$$

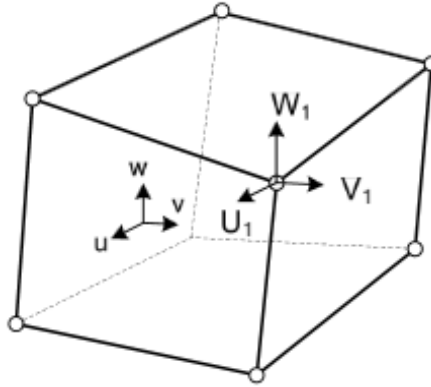


Figura 5.- Deformacions d'un element finit

La matriu de funcions d'interpolació N te tres files y tantes columnes com graus de llibertat hi hagi entre tots els nusos de l'element. L'estructura d'aquesta matriu sempre és del tipus.

$$N = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & 0 \dots N_n & 0 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 \dots 0 & N_n & 0 \\ 0 & 0 & N_1 \dots 0 & 0 & N_n \end{bmatrix}$$

7.2.2.- Deformacions unitàries

Les deformacions unitàries en un punt qualsevol del element, utilitzant la suposició de petites deformacions, son:

$$\varepsilon = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zw} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} = \partial u$$

En aquesta expressió s'identifica l'operador ∂ que permet passar les deformacions des de un punt (u) a les deformacions unitàries ε . Substituint les deformacions (u) en funció de les deformacions nodals utilitzant les funcions de interpolació obtenim:

$$\varepsilon = \partial u = \partial N \delta^\varepsilon \quad \text{on} \quad B = \partial N$$

La matriu B relaciona les deformacions del nusos de l'element amb les deformacions unitàries en un punt interior qualsevol de l'element. Per tant, el camp B representa el camp de deformacions unitàries existent dins de l'element finit.

7.2.3.- Estat de tensions. Equació constitutiva

Les tensions en un punt qualsevol del domini estan definides per tensor de tensions en el punt, el qual la seva expressió general és:

$$\sigma = \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \sigma_{xy} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} \end{Bmatrix}$$

Així mateix es coneix la equació constitutiva del material que forma el conjunt, y que relaciona les tensions amb les deformacions unitàries. Per a un material elàstic lineal aquesta equació constitutiva es pot posar en forma de:

$$\sigma = D(\varepsilon - \varepsilon_0) + \sigma_0$$

Essent:

- D la matriu elàstica que per a un material elàstic lineal es constant i depèn dels paràmetres: E (mòdul de Young) i ν (mòdul de Poisson).
- ε_0 es el vector de deformacions inicials existent en el material, que han de ser conegudes
- σ_0 es el vector de tensions inicials presents al material, que son conegudes.

7.2.4.- Equació d'equilibri d'un element

Una vegada s'han establert les expressions que relacionen els desplaçaments, deformacions unitàries i tensions, en funció dels desplaçaments dels nusos, ja podem passar a calcular les expressions d'equilibri d'un element finit. Les forces més comuns que actuen sobre un element finit són:

- Forces exteriors de volum, aplicades a l'interior de l'element q_v
- Forces exteriors de superfície, aplicades al contorn lliure de l'element q_s .
- Forces interiors aplicades a la superfície del contorn d'unió de l'element amb els veïns q_0 .
- Forces exteriors puntuals aplicades als nusos de l'element P_N .

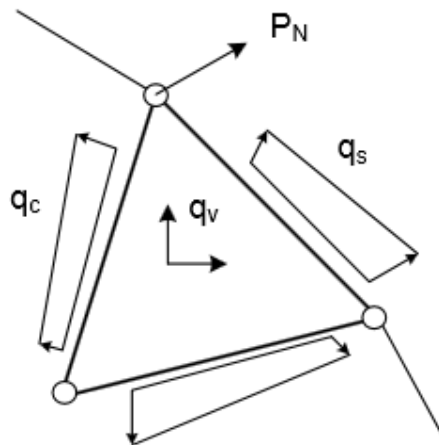


Figura 6.- Forces sobre un element finit

La equació d'equilibri del element es pot escriure de la forma compacta, d'aquesta manera:

$$K^e \cdot \delta^e = P_v^e + P_s^e + P_T^e + P_b^e$$

En aquesta equació podem identificar diferents termes que a continuació passem a enumerar i donar una breu explicació.

- K (matriu de rigidesa del element): es tracta de una matriu quadrada, simètrica de tamany igual al nombre de graus de llibertat de l'element. Aquesta matriu és alhora de diferents paràmetres geomètrics, moments d'inèrcia i els mòduls d'elasticitat longitudinal i transversal.
- δ^e (vector de desplaçaments nodals de l'element)

- P_v^e (vector de forces nodals equivalents degudes a forces que actuen a tot el volum)
- P_s^e (vector de forces nodals equivalents degudes a forces exteriors de superfície)
- P_T^e (vector de forces nodals equivalents degudes a deformacions inicials existents al material)
- P_b^e (vector de forces nodals equivalents degudes a tensions inicials existents al material)

D'una manera encara més simplificada podem escriure aquesta equació de la següent manera:

$$f = K \cdot u$$

Les nostres incògnites, com s'ha dit en apartats anteriors es trobaran en el vector de desplaçaments nodals. La matriu de rigidesa només té en compte aspectes geomètrics i físics del model. Per tant, si canviem paràmetres del model com condicions frontera, mallat... aquesta matriu seguirà essent la mateixa, sense cap tipus de canvi.

7.3.- Criteris de fallada

Es coneixen com teories o criteris de fallada als criteris utilitzats per determinar els esforços estàtics permissibles en estructures o components de màquines. S'utilitzen diferents formulacions en funció del tipus de material que s'utilitza.

Els mecanismes de fallada depenen de la estructura microscòpica del material i de la forma dels seus enllaços atòmics. Per a poder predir la fallada de materials sota l'acció de diferents càrregues estàtiques (considerant càrrega estàtica com aquella que no varia ni de mòdul ni direcció al llarg del temps) o poder fer disseny d'elements, s'han desenvolupat diverses teories per a grups de materials, basant-se en observacions experimentals.

Les teories de fallada es divideixen en dos grups:

Taula1. Teories de fallada

Materials Dúctils	Materials fràgils
<ul style="list-style-type: none"> • Teoria de Tresca • Teoria de Von - Misses • Teoria de Coulomb - Mohr dúctil 	<ul style="list-style-type: none"> • Teoria de Rankine • Teoria de Coulomb – Mohr fràgil

En el actual document es treballa amb un material fràgil com és la pedra, per tant, un material fràgil (aquell en el que a l'assaig de tensió hagi tingut menys d'un 5% de deformació abans de fractura). Dels dos tipus de fallada de materials, treballarem amb el criteri o teoria de Rankine. Aquest capítol l'hauré de tenir en compte alhora de obtenir els resultats en ANSYS, ja que aquest programa no treballa amb aquest tipus de criteris.

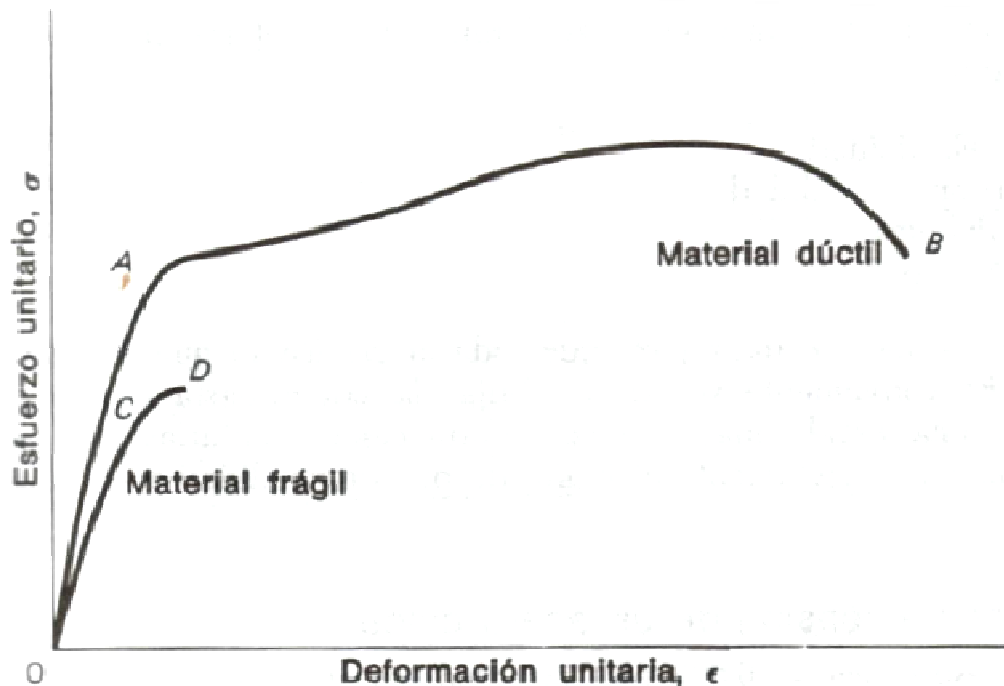


Figura 7.- Diagrama esforç - deformació de materials dúctils i fràgils

La resistència és una propietat intrínseca de cada material i s'avalua mitjançant un assaig de tracció i/o compressió. Aquests assajos es fan sobre provetes normalitzades segons la normativa UNE. A continuació s'explicarà com treballa el criteri Rankine, per tal de després poder treballar amb més comoditat.

7.3.1.- Teoria del màxim esforç normal. Teoria de Rankine

La teoria de Rankine enuncia: “La falla es produirà quan un esforç normal màxim en la peça sigui igual o major al esforç màxim d'una proveta sotmesa a un assaig de tensió en el moment que es produeix la fractura.”

En altres paraules, Rankine ens vol dir que la fallada del material e produeix quan un dels tres esforços principals assoleix el valor màxim de la resistència a tracció o compressió. El criteri de fractura s'especifica les funcions particulars següents:

$$\max(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) = \sigma_{tracció}, \quad \text{quan } |\max(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)| > |\min(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)|$$

$$\min(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) = \sigma_{compressió}, \quad \text{quan } |\min(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)| > |\max(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)|$$

Les variables $\sigma_{tracció}$ i $\sigma_{compressió}$ son les tensions de ruptura del material i $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ son les tensions principals en cada punt del material. Si agafem la resistència a la tracció com S_t i la resistència a la compressió com S_c , segons la teoria de fallada, la fractura es donarà quan:

$$\sigma_1 \leq S_t \quad \text{o bé} \quad \sigma_3 \leq S_c$$

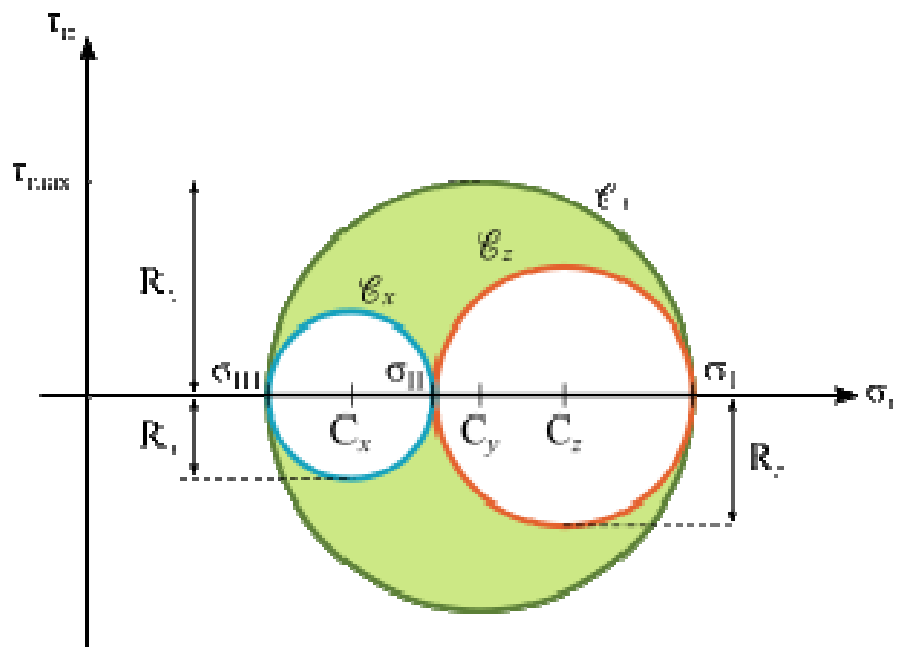


Figura 8.- Cercles de Mohr

Per al cas bidimensional, és a dir, en el pla $\sigma_1 - \sigma_3$, la teoria del màxim esforç normal es representa gràficament de la següent manera:

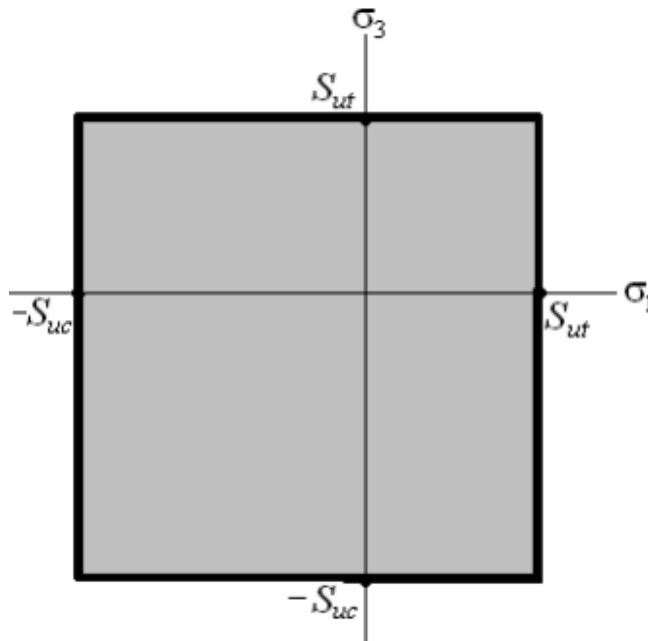


Figura 9.- Representació gràfica de la Teoria Rankine

En la representació anterior, la fallada del material es donarà quan el punt determinat pels esforços principals σ_1 i σ_3 es trobi fora del àrea ombrejada a la figura 9

7.4.- Document Bàsic SE-AE

L'àmbit d'aplicació d'aquest document bàsic és la determinació de les accions sobre edificis, per a verificar el compliment dels requisits de seguretat estructural, en matèria de capacitat portant i estabilitat, establerts en el document bàsic de seguretat estructural (DB-SE). Per això s'estableixen uns criteris funcionals que deuen complir les estructures, assegurant d'aquesta manera els estats límit de servei, amb independència dels materials emprats en la construcció dels edificis. Al aplicar les accions i forces que marca el document haurem de tenir en compte algunes assumpcions:

- Queden fora de l'anàlisi les accions i forces que actuen sobre elements com aparells elevadors o construccions com tancs o dipòsits.

- No es defineixen en aquest Document Bàsic les forces de fregament, ja que es consideren com efectes de les accions establertes.
- Tots els valors de les accions tenen sentit de característics.

Hi ha tres tipus de accions que el codi tècnic de edificació, en el document bàsic de seguretat estructural, estableix que hem d'aplicar als edificis per comprovar la seva estabilitat i la capacitat portant: accions permanents, accions variables i accions accidentals. En el present treball no es tractaran totes les accions, sinó les més comuns, com per exemple vent i neu.

Taula 2. Accions del DB-SE

Accions permanents	Accions variables	Accions accidentals
<ul style="list-style-type: none"> • Pes propi • Pretensat • Accions de terreny 	<ul style="list-style-type: none"> • Sobrecàrrega d'ús <ul style="list-style-type: none"> • Vent • Accions tèrmiques <ul style="list-style-type: none"> • Neu • Accions sobre baranes i element divisoris 	<ul style="list-style-type: none"> • Sisme • Incendi • Impacte

8.- Programes utilitzats

Per a la correcta realització del treball es necessitarà treballar amb un parell de programes, un d'ells per modelitzar l'estructura i un altre per poder simular les accions vistes en l'apartat 4.4., el valor del les quals calcularem mes endavant.

El programa escollit per modelar el sistema és el software CAD, CATIA, degut als coneixements previs que ja es posseeixen del programa. Encara que el software ANSYS té un mòdul de disseny, s'ha optat per utilitzar un programa extern degut a que aprendre a modelar amb el mateix programa de simulació, requeriria d'hores de treball que no es tenen.

8.1.- CATIA

CATIA és un programa informàtic de disseny, fabricació e enginyeria assistida per ordinador comercial realitzat per Dassault Systems. El programa està desenvolupat per proporcionar recolzament des de la concepció del disseny fins a la producció i l'anàlisi del producte. El programa conté molts mòduls com disseny d'estructures, fluids o elèctric que no seran utilitzats en el present treball. Només s'utilitzaran els mòduls de Design (part i assembler).

La correcta manipulació del programa CATIA és força complexa, es recomana realitzar algun tipus de curs preparatori per familiaritzar-se amb la 'interface' del programa. Això ajudarà a agilitzar el procés de modelització del sistema.



Figura 10.- Logotip DSS CATIA

8.2.- ANSYS

ANSYS, Inc va ser fundada l'any 1970 (Swanson Analysis Systems, Inc.) utilitzant aproximadament 1700 treballadors. La majoria d'ells amb experiència en elements finits i dinàmica del flux computacional.



Figura 11.- Mòduls de ANSYS

ANSYS desenvolupa, comercialitza i ajuda a la enginyeria a través del software de simulació per predir com funcionarà, reaccionarà o es comportarà un determinat producte sota un entorn real. ANSYS contínuament desenvolupa tecnologia enfocada a la simulació i al llarg del temps ha adquirit altres softwares per oferir un paquet de simulació que poden ser unificades per a problemes mes complexos.

El procés típic de realització d'un càlcul està dividit en tres parts: pre-procés, procés i post-procés. A continuació es descriuen aquest tres passos de una manera més detallada.

- Pre-procés:
 1. Estableix el model, es construeix la geometria del problema. Sobre aquest model s'establirà la malla de elements. (Aquest procés es realitzarà amb el programa descrit en l'apartat 9.1)
 2. Es defineixen els materials a ser utilitzats en base a les seves constants. Tot element ha de ser assignat a un material
 3. Generació de la malla, realitzant una aproximació discreta del problema en base a punts o nodes. Aquests nodes es connecten per formar elements finits que junts formen el volum del material. La malla pot es por generar a mà o utilitzant una eina de generació automàtica.

- Procés
 1. Aplicació de les càrregues. S'apliquen condicions de contorn en els nodes i elements. Es poden manejar valors de força, tracció, desplaçament, moment o torsió.
 2. Obtenció de la solució, una vegada els valors del problema son coneguts

- Post-procés
 1. Visualització de resultats, com per exemple la geometria deformada del sistema
 2. Llista de resultats.

De igual manera, es recomanable realitzar algun curs previ per tal de familiaritzar-se amb el programa. No és el cas del present treball així que ens

haurem d'anar familiaritzant amb la 'interface' a mesura que anem avançant en la realització del treball.

9.- Implementació de l'estudi

9.1.- Modelat de l'edifici en CAT (CATIA)

El pas previ a començar a estudiar el comportament de l'edifici sota les accions proposades en el DB-SE, és modelar l'edifici. Encara que ANSYS compta amb un motor de disseny (Design Manager), s'ha decidit utilitzar un altre software més potent en disseny com és CATIA, degut als coneixements previs que es tenen sobre el programa.

Una vegada escollit el programa a utilitzar s'ha passat a buscar i trobar la informació necessària per poder obtenir un bon model. En aquest sentit quanta més informació es tingui, sobre la geometria, millor serà el model dissenyat, i per tant, els resultats que s'obtinguin en les simulacions posteriors seran més pròxims a la realitat.

Si no s'aconseguís trobar tota la informació que es necessita per a modelitzar l'edifici s'haurien de fer una sèrie de hipòtesis i suposicions que ens allunyarien de la realitat. En el estudi que estem tractant s'ha aconseguit trobar la informació suficient com per a poder obtenir un bon model. Per això, hem recorregut a plànols de l'edifici i a visites guiades al propi edifici.

9.1.1.- Plànols de l'edifici

El primer pas per modelar un edifici és buscar els plànols de dit edifici. Aquests han servit en gran part a fer-nos una idea general de com és l'edifici, a més de per obtenir totes les cotes.

El conjunt de plànols els hem trobat a l'arxiu històric del Col·legi d'Arquitectes de Catalunya (COAC), en format digital en la secció de plànols històrics. En aquest arxiu es mostren un conjunt de plànols que corresponen a diferents edificis del propi Mas Can Codorniu, per tant, s'ha tingut que procedir a seleccionar els que realment eren propis de l'edifici d'estudi.

Com és un arxiu històric, aquest plànols es poden descarregar de manera lliure del dipòsit digital del Departament de Cultura de la Generalitat de Catalunya. En el conjunt dels 10 arxius que trobem dins del dipòsit, s'han seleccionat els tres que corresponen a les façanes principals i posterior; i un plànol de secció dels dos edificis. A continuació és mostren els plànols utilitzats:

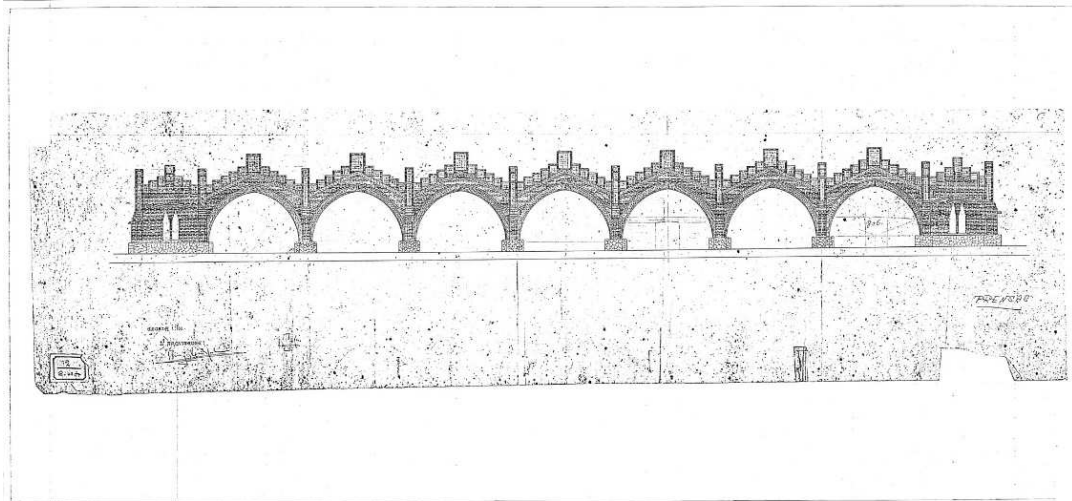


Figura 12.- Alçat de la façana principal

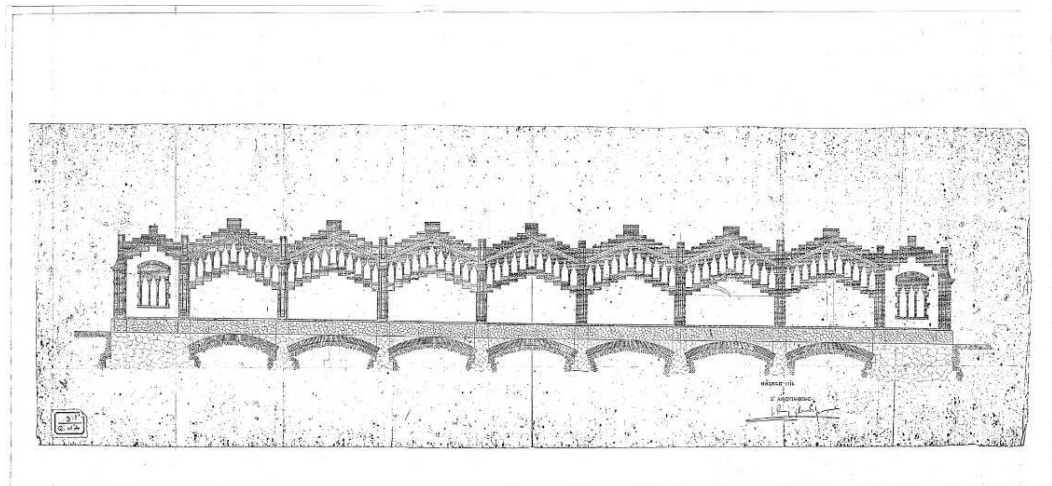


Figura 13.- Alçat de la façana posterior

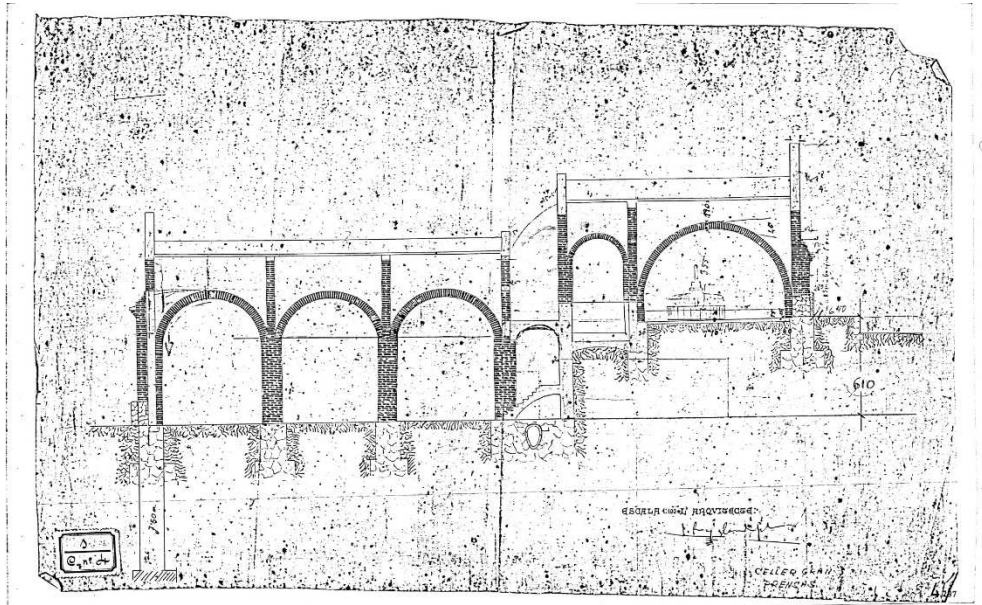


Figura 14.- Secció transversal dels dos edificis

La presa de dades per a realitzar el model té una precisió molt baixa, ja que son els plànols originals que va realitzar l'arquitecte Puig i Cadafalch, entre els anys 1901 i 1915, amb una escala de 1:100 en un full DIN A-1 i amb un tipus de línia molt gruixuda.

Amb totes aquestes consideracions, hem de tenir en compte que l'error al prendre les dades sobre paper és molt gran (exemple: una desviació de 1mm al paper provoca un error de 10cm a la realitat) i que, per tant, les cotes utilitzades no seran reals, però que estaran pròximes a la realitat.

El present estudi no es basa en la obtenció de un model perfecte sinó en l'estudi estructural del mateix i, per tant, obtenint una bona aproximació del model serà suficient per obtenir un bon resultat. A continuació es mostra el modelat final resultant, el model a estat tractat i renderitzat, amb una edició lliure del programa SolidWorks, per a obtenir un millor resultat visual.

En apartats posterior s'explica com s'ha estructurat el desenvolupament del modelat tridimensional de l'estructura analitzada.

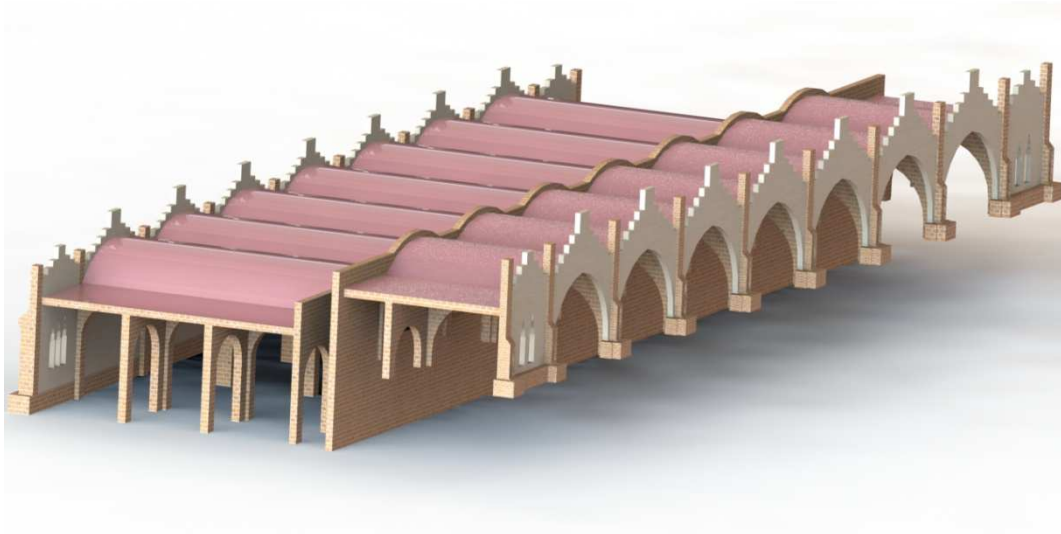


Figura 15.- Modelat final de l'edifici

Com es pot intuir, només amb els plànols trobats al arxiu de la Generalitat no es pot obtenir un model sencer de l'edifici degut a que hi ha diferents zones, com per exemple les naus laterals o també el sostre, que no estan representats en els plànols, de manera que s'ha recorregut a una visita guiada a l'edifici.

9.1.2.- Visita guiada al Mas Can Codorniu.

Com ja s'ha comentat anteriorment, per aconseguir finalitzar la representació gràfica del edifici d'estudi es va fer necessària una visita guiada a les instal·lacions del Mas Can Codorniu. Durant la visita vam haver de tenir molt de compte a l'hora de prendre les mesures, ja que en el edifici s'han fet diverses modificacions i habilitacions posteriors, i l'estudi es centra en la obra inicial de l'arquitecte Puig i Cadafalch.

Hi havia diverses zones que no estaven clares alhora de representar l'edifici. Les zones de conflicte que interessaven eren les naus laterals, tant del porxo de premses com del celler gran, els elements d'unió entre ambdós edificis i també els arcs de mig punt que arrenquen a meitat de pilar en el celler gran. Tots aquest punts indicats, van ser fotografiats i posteriorment modelitzats de la següent manera:



Figura 16.- Fotografia dels pilars i modelat posterior

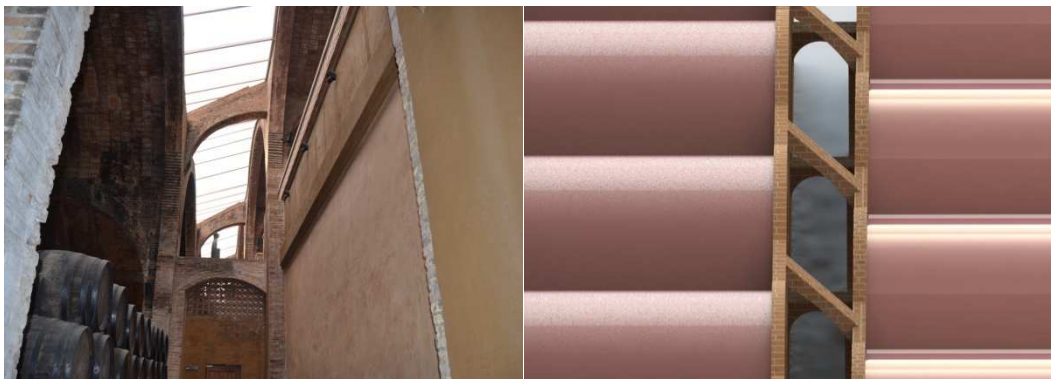


Figura 17.- Fotografia dels elements d'unió i modelat posterior

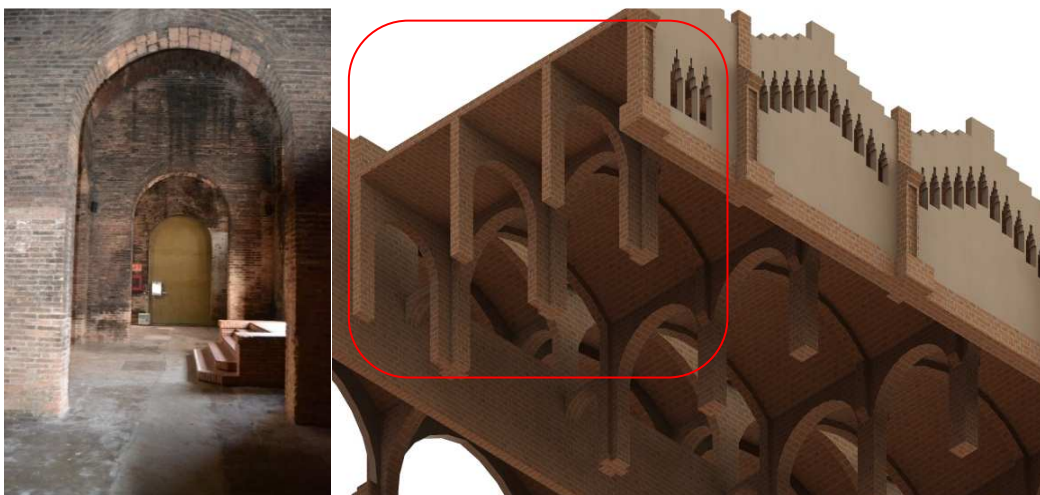


Figura 18.- Fotografia i modelat de la nau lateral

Podem observar que aquesta zona seleccionada no la podem representar de cap altre manera que no fos fent una visita a l'edifici, i amb un

metre làser obtenir l'alçada total de l'arc. De igual manera es va fer amb la nau lateral del porxo de premses.

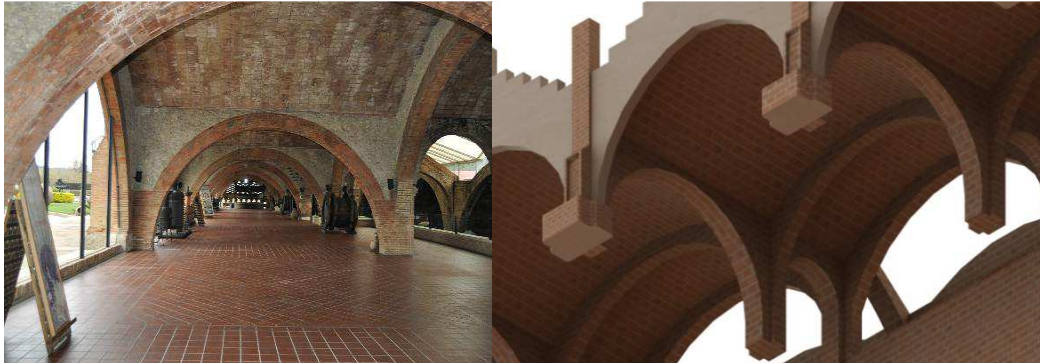


Figura 19.- Fotografia i model del porxo de premses

Veiem també que els pilars interiors del porxo de premses no tenen la mateixa secció que els que parteixen horitzontalment, de manera que també es va tenir que prendre mesures en aquesta zona de les instal·lacions.

Per altre banda, l'edifici està acoblat lateralment amb un altre edifici, el qual no serà representat per motius obvis, ja que només s'està treballant amb els dos prèviament explicats. I per la seva esquerra té una façana, que no serà representada ja que no hi ha cap plànol que el representés i, per tant, prendre mesures allà seria una feina que duria un temps que no tenim. De tota manera, aquest parell d'aspectes, seran tinguts en compte a l'hora de especificar recolzaments laterals en el programa ANSYS.

A continuació veiem una fotografia que demostra, la dificultat de la geometria que hauríem d'haver mesurat si s'hagués tingut en compte:



Figura 20.- Façana lateral

Per finalitzar aquest apartat, veurem com hem format tot l'edifici. S'ha modelat l'edifici seguint les següents parts: façana principal, porxo de premses, façana posterior del porxo de premses, unions entre edificis, celler gran i façana posterior. La imatge següent mostra les parts esmentades:

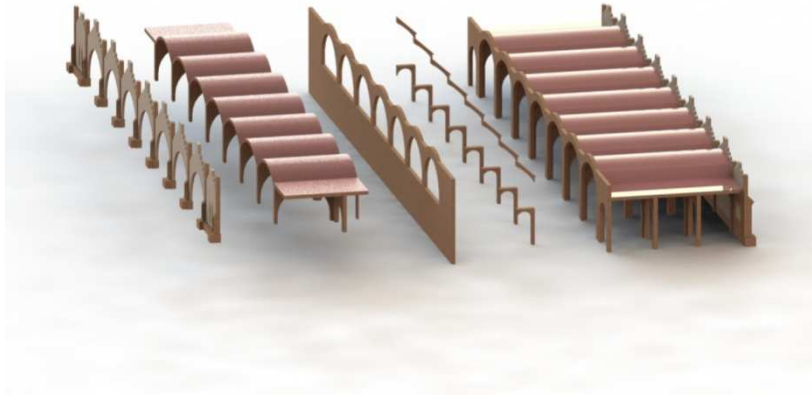


Figura 21.- Edifici explosionat

9.2.- Hipòtesis generals

En el present punt s'exposaran les hipòtesis i simplificacions, així com també les limitacions, que s'han realitzat en les diferents etapes de l'estudi. El fet de realitzar aquestes hipòtesis es degut a la falta d'informació en termes de geometria, materials, cimentació... a part de la limitació que ofereix el càlcul numèric del que es disposa.

Evidentment aquestes simplificacions es veuran reflectides en la solució final, però si sabem interpretar els resultats obtinguts en les diferents simulacions, aquests seran de gran ajuda per interpretar-los correctament. Les hipòtesis sobre les quals treballarem son les següents: condicions geomètriques, materials constructius, condicions de contorn i càrregues exteriors.

9.2.2.- Materials constructius

El material constructiu utilitzat en la construcció de l'edifici és la obra de fàbrica, combinació de totxo amb morter. Els valor de les propietats del material constructiu, que estan reflectides a la taula, han estat obtinguts de les taules del DB_SE - F per aquest tipus de materials.

El document ens dona les pautes per calcular el valor de mòdul de young així com també la resistència a compressió i tracció.

9.2.2.1.- Càlcul de propietats del material constructiu

Per calcular la resistència a tracció i a compressió que utilitzarem per comparar els resultats obtinguts en les simulacions hem d'anar a un altre apartat del codi tècnic. Concretament anirem al Document Bàsic de Seguretat Estructural: Fabriques (DB_SE-F).

El camp d'aplicació de dit document és la verificació de la seguretat estructural de murs en la edificació, realitzats a partir de peces relativament petites, comparades amb la totalitat del elements constructius. A més estaran unides amb morter. El nostre objectiu serà trobar la resistència a tracció i a compressió dels elements constructius que utilitzem, en el nostre cas serà la obra de fàbrica, situada a l'apartat 4.6 de dit document.

El valor de la resistència a compressió de la obra de fàbrica és 4,43MPa i el de la resistència a tracció 0,443MPa, que hem trobat seguint els passos establerts dins del DB_SE-F.

Els càlculs necessaris per arribar a aquest valors de resistència els trobarem en la seva totalitat a l'annex I.

Taula 3. Propietats del material utilitzades a la simulació

Propietat	Valor
Densitat aparent (kg/m ³)	2300
Mòdul de Young (MPa)	3573
Coeficient de Poisson	0,2
Resistència a tracció (MPa)	0,443
Resistència a compressió (MPa)	4,43

Se sap que en els edificis d'estudi hi ha hagut diverses rehabilitacions amb ús d'altres materials de reforç i, per tant, els valors que hem adoptat

anteriorment variaran una mica respecte la realitat. Així doncs, hem considerat que els edificis estan construïts com una única obra de fàbrica.

Per altre banda, considerarem que morter i maó es deformen de igual manera, encara que sabem que no és així. Prendrem les propietats del maó com les pròpies de tota la obra de fàbrica, així com també, suposarem que les propietats necessàries son isotròpiques. Aquesta hipòtesis és una de les més importants, ja farà variar més els resultats, però hem de tenir en compte que:

- No es possible conèixer les dimensions de tots els maons utilitzats en la construcció del Mas Can Codorniu.
- És impossible conèixer, amb els medis que es disposen, els diferents materials d'unió que s'han utilitzat.

9.2.3.- Condicions de contorn

Com ja s'ha comentat anteriorment, l'edifici està acoblat lateralment a un altre, per la seva dreta, i té una façana lateral a la seva esquerra que no està representada. Per solucionar aquests inconvenients hem recorregut als diferents tipus de recolzaments que ofereix el programa ANSYS. Més concretament, imposarem que son recolzaments elàstics. De tota manera aquests recolzaments els podríem obviar, ja que com veurem més endavant, les zones de conflicte no son les parts laterals.

Ja hem parlat de les condicions de contorn laterals, però encara queda parlar sobre els contactes inferiors. Hauria sigut una bona opció dibuixar els ciments dels edificis però, degut als plànols amb els que contàvem, ha sigut impossible tenir-los en compte. De manera que s'ha optat per col·locar recolzaments fixes en totes les connexions amb el terra.

9.2.4.- Càrregues exteriors

Com hem dit en l'apartat 6.4, on es comenta el DB-SE, s'estudiaran alguns casos segons el CTE. Aquests casos seran la sobrecàrrega per neu, l'acció del vent i l'acció del propi pes. Les hipòtesis d'aquestes càrregues son les esmentades a continuació:

- L'acció del vent es considerarà perpendicular i longitudinal a les dos façanes (principal i posterior).
- El pes de la neu serà considerat perpendicular a totes les superfícies que formen el sostre, sense tenir en compte que el vent pot fer acumular la neu en diferents zones.

Els càlculs del valor de pressió que actuarà sobre les diferents superfícies seran explicats amb més deteniment en apartats posteriors, i totes les dades relatives al valor numèric obtingut seran obtingudes del propi DB-SE.

9.3.- Importació del model a ANSYS

Encara que com sa dit anteriorment, el programa ANSYS conté un editor de models, s'ha decidit modelar l'edifici en un editor alternatiu com es CATIA i després importar l'arxiu al propi ANSYS. Inicialment es va modelar com una única peça, però per motius de simetria i poder fer submòduls de l'edifici es va decidir estructurar l'edifici en les diferents parts, esmentades en l'apartat 9.1.2.A continuació podem veure una imatge de les parts importades al programa (en diferents colors), tallades amb el programa de modelat CATIA.

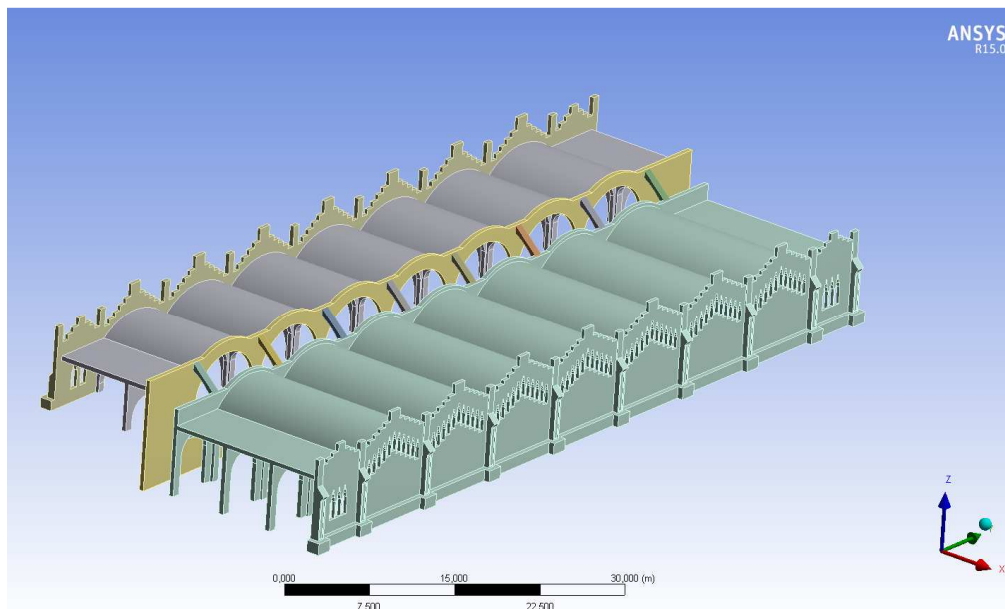


Figura 22.- Model importat a ANSYS

El programa ANSYS permet fer un mallat selectiu de les diferents parts del model de una manera independent, per poder elaborar les simulacions com si fos només una única geometria. Això ho poder aconseguir establint connexions entre les cares de contacte entre les diferents parts de l'edifici, concretament, establint que les cares tenen el mateix desplaçament, de manera que nosaltres interpretarem els resultats obtinguts, com si d'una única peça es tractés.

En els pròxims apartats veurem les formes en les que podem mallar l'edifici, tant com un únic sòlid com per diferents parts. Més endavant trobarem les diferències que comporten ambdós tipus de mallats.

9.4.- Mallat de l'edifici

El següent pas és mallat l'estructura. Mallar una estructura amb el software ANSYS és relativament senzill, ja que el programa té preestablertes unes condicions generals bàsiques de mallat. El problema recau en que ANSYS et dona diverses opcions de mallat, depenent de les nostres necessitats, retocant diverses característiques, formes dels elements, grandària i nombre d'elements, així com també altres paràmetres.

Com acabem de dir hi ha diversos tipus de mallat, entre ells: per defecte, proximitat, curvatura, proximitat i curvatura i, finalment fixa. Tots ells tenen diferents formes d'organitzar els elements i grandària d'aquests. En el present estudi s'utilitza un mallat tetraèdric avançat de proximitat, ja que és l'òptim en figures de grans dimensions, que combinen regions geomètriques de diferent tamany. Bàsicament ANSYS, amb aquesta configuració, realitza un mallat més fi a zones on hi ha un vèrtex o un canvi de geometria.

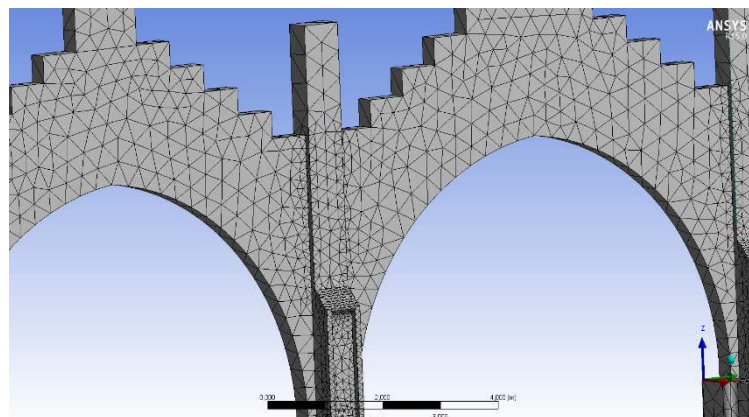


Figura 23.- Exemple de mallat per proximitat

Per altre banda també avaluem la qualitat de la malla representada per ANSYS. El software pot implementar diferents mètodes per avaluar la malla, com per exemple: element quality, aspect ratio, jacobian ratio, orthogonal quality... concretament n'hi ha 8. Per defecte el programa no analitza la malla, així que haurem de seleccionar el criteri que més ens convingui.

Per al present anàlisi utilitzarem el criteri de qualitat de element. Aquest mètode permet avaluar els elements amb una nota entre el 0 i 1, essent el 1 com a màxima valoració i, per tant, de major qualitat (un 1 representa un tetraedre perfecte i un 0 té un valor de volum nul). A més al seleccionar aquest criteri, ANSYS permet veure una representació gràfica dels elements agrupats per qualitat.

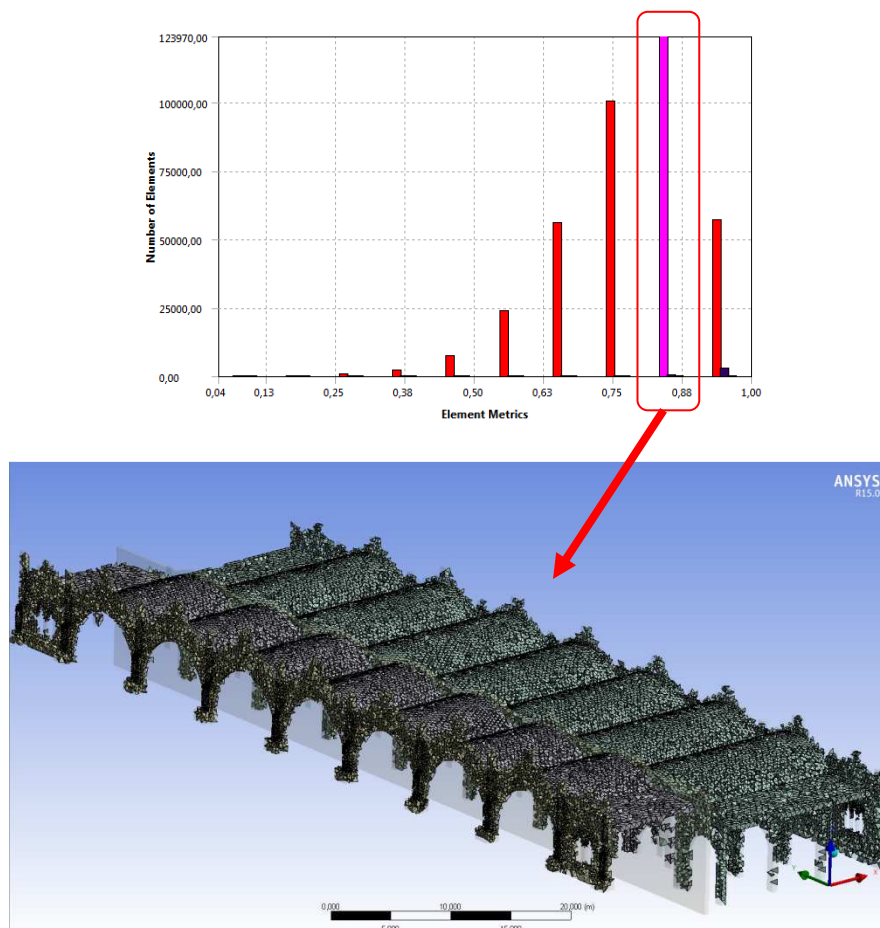


Figura 24.- Elements amb una qualitat de 0,88

A continuació s'han realitzat els mallats de l'edifici com a un únic sòlid i per parts, utilitzant les següents característiques de mallat:

Taula 4.- Defaults de Malla principal

DEFAULTS	
Physics Preference	Mechanical
Relevance	0

Tabla 5.- Sizing de Malla principal

SIZING	
Use Advanced Size Function	On: Proximity
Relevance Center	Coarse
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	Medium
Transition	Fast
Span Angle Center	Coarse
Num Cells Across Gap	Default (1)
Proximity Min Size	Default (9,7317 e-002 m)
Max Face Size	Default (9,73170 m)
Max Size	Default (19,4630 m)
Growth Rate	Default(2,50)
Minimum Edge Length	3,641e-002 m

Taula 6.- Inflation de Malla principal

INFLATION	
Use Automatic Inflation	None
Inflation Option	Smooth Transition
Transition Ratio	0,272
Maximum Layers	5
Growth Rate	1,2
Inflation Algorithm	Pre
View Advanced Option	No

Taula 7.- Patch conforming option Malla principal

PATCH CONFORMING OPTION	
Triangle Surface Mesher	Program Controlled

Taula 8.- Patch independent option Malla principal

PATCH INDEPENDENT OPTION	
Topology Checking	Yes

Tabla 9.- Advanced Malla principal

ADVANCED	
Number of CPU for Parallel Part Mesh	Program Controlled
Shape Checking	Smooth Transition
Element Midside Nodes	Program Controlled
Staright Sided Elements	No
Number of Retries	0
Extra Retries For Assembly	Yes
Rigid Body Behaviour	Dimensionally Reduced
Mesh Morphing	Disabled

Tabla 10.- Defeaturing Malla principal

DEFEATURING	
Pinch Tolerance	Default (8,785 e-002 m)
Generate Pinch on Refresh	No
Authomatic Mesh Based Defeaturing	On
Defeaturing Tolerance	Default (4,8659 e-002 m)

Cal dir que aquest mallat és un primer contacte amb el programa, on premem la velocitat de resolució que no la precisió. Els resultats obtinguts durant la primera simulació ens donaran una idea de les zones més afectades per les forces o pressions que apliquem, i que, per tant, seran les zones crítiques que hauran de determinar o no el col·lapse de l'estructura. Per a un futur projecte, en

zones s'hauria de fer un mallat molt més fi i les condicions de contorn necessàries per obtenir uns resultats que s'assemblin més a la realitat.

9.4.1.- Mallat per parts

A continuació veurem el mallat de cada sòlid per separat així com també les estadístiques de la qualitat de malla per a cadascun d'ells, per a després poder comparar-les amb el mallat de l'edifici en la seva totalitat i veure com canvien els paràmetres de qualitat de malla.

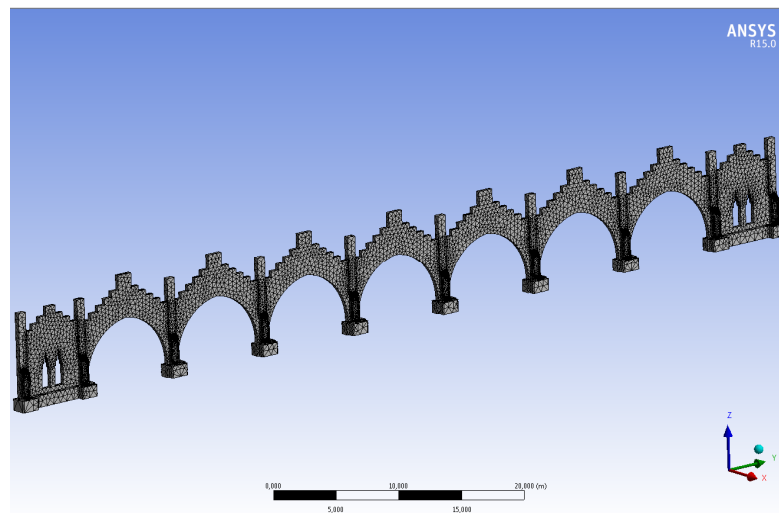


Figura 25.- Mallat façana principal

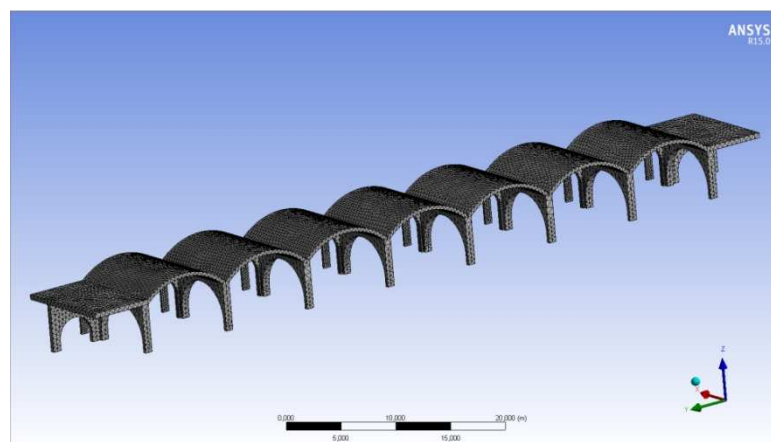


Figura 26.- Mallat porxo de premses

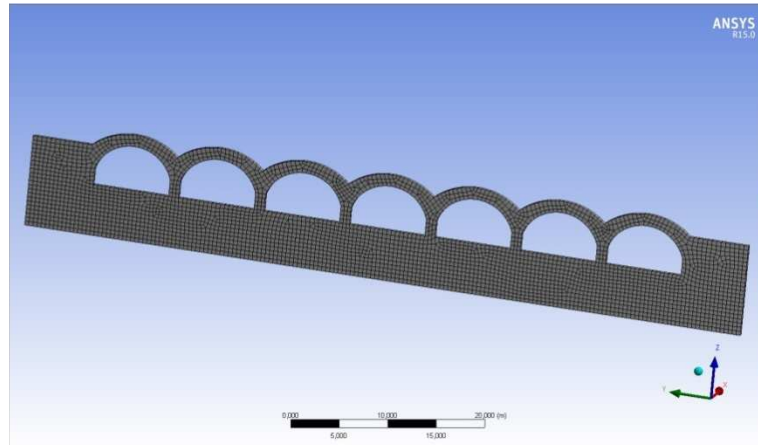


Figura 27.- Mallat façana posterior

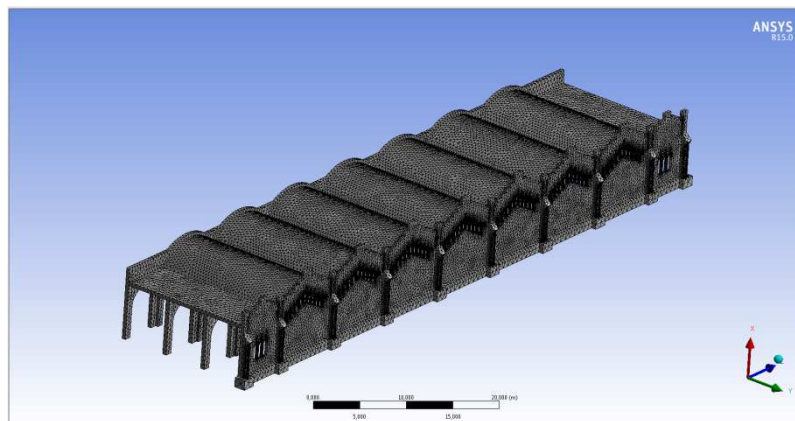


Figura 28.- Mallat celler gran

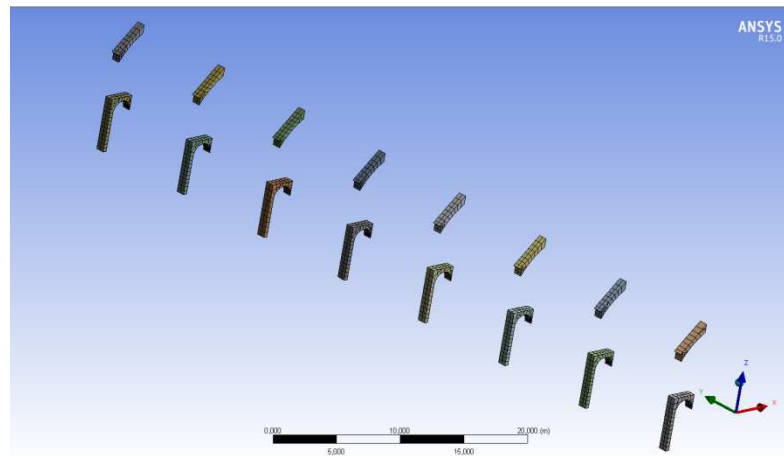


Figura 29.- Mallat unions entre edificis

A continuació es presenta una taula amb les estadístiques del mallat de cada sòlid. Concretament les estadístiques es donen segons el criteri de qualitat d'element, vist anteriorment. Els paràmetres que aquest criteri avalua són els següents: nodes, elements, desviació estàndard i mesura mitjana.

Les dades de la taula corresponen respectivament (de dalt a baix) als sòlids: façana principal, porxo de premses, façana posterior, unions entre edificis i finalment el celler gran:

Taula 11.- Dades del mallat per sòlids

Nodes	Elements	Mitjana	Desviació
97607	54297	0,749803119552536	0,127862921309422
112767	58615	0,815453953380625	0,113674621471331
24081	3182	0,983751752793437	2,77142000477124E-02
6314	739	0,700603709768716	0,278771795171253
449702	244819	0,782493830457762	0,118012025099705
TOTAL			
690471	361652	0,80642127	0,13320711

9.4.2.- Mallar com a únic sòlid

Seguidament es mallarà l'edifici utilitzant els mateixos paràmetres que per cadascuna de les parts de l'apartat 9.4.1, també mirarem les estadístiques segons el criteri de qualitat de element i ho compararem amb el global de les característiques del conjunt de parts.

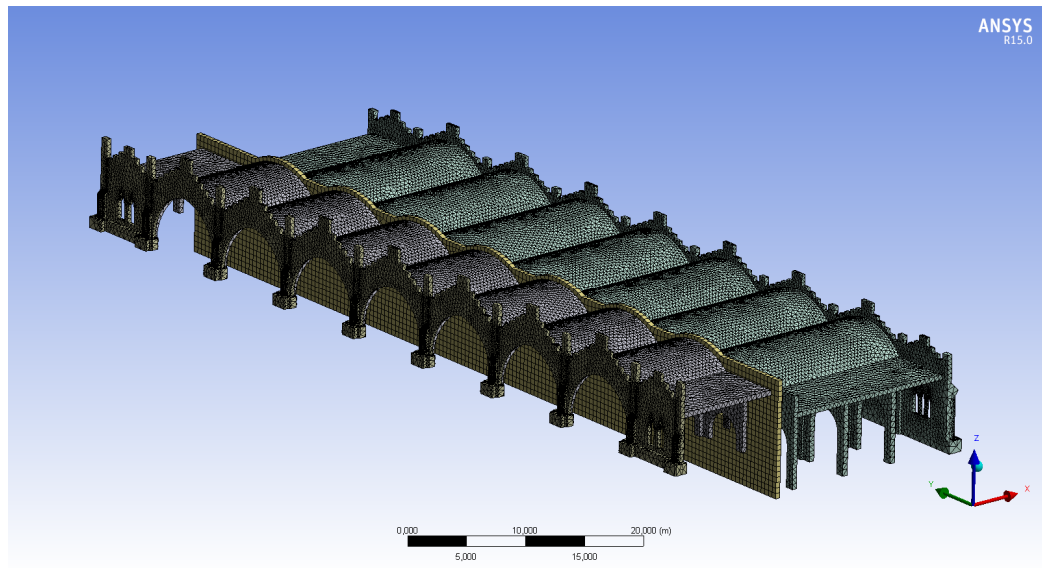


Figura 30.- Mallat com un únic sòlid

Les dades que hem obtingut del mallat de l'edifici son les representades en la següent taula:

Taula 7.- Dades del mallat com únic sòlid

Nodes	Elements	Mitjana	Desviació
708389	374103	0,786794262669878	0,119585585207523

Podem observar que el nombre de nodes i elements a augmentat lleugerament, i de manera contraria la mitjana i la desviació han disminuït molt lleument. De manera que depenent el que vulguem podrem escollir una configuració o una altre. En el present estudi escollirem la configuració de un únic sòlid, encara que la decisió podrà variar en funció de les zones de estudi que es vegin afectades i que, per tant, necessitem enfocar-nos més.

Val a dir que els mallats utilitzats son molt grollers buscant una rapidesa de mallat en comptes de qualitat. Com hem dit anteriorment, quan trobem les zones de conflicte utilitzarem un mallat més refinat, amb mes qualitat, que permeti un millor anàlisis dels resultats.

9.5.- Aplicació de les hipòtesis

9.5.1.- Aplicació de recolzaments

Com ja hem comentat en l'apartat 9.2.3., hem de aplicar una sèrie de idealitzacions a la estructura per tal de poder simular. En l'apartat que estem tractant, diem que l'edifici reposa sobre una superfície que no es deforma (cosa que es completament falsa). Això es degut a que en cap plànol dels que es disposa, estan reflectits els ciments i, per tant, és completament impossible saber com es deformarà l'edifici en aquests punts.

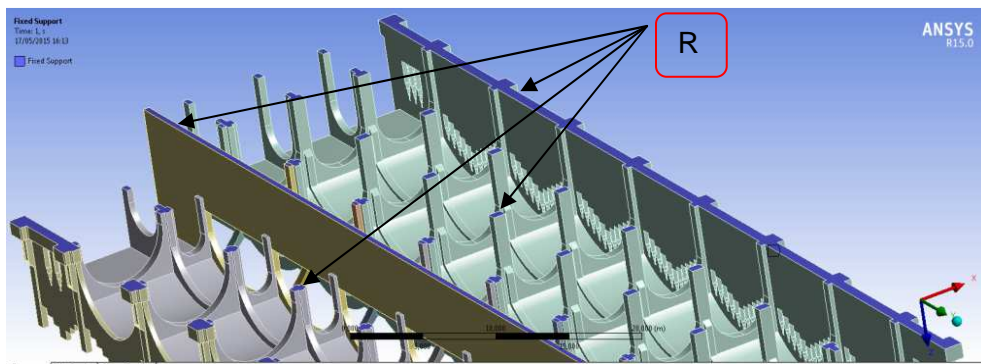


Figura 31.- Recolzaments

De manera que, una vegada importat el fitxer a ANSYS, aplicarem la condició de suports fixes en les superfícies de contacte amb el terra.

9.5.2.- Aplicació de càrregues externes

Amb l'objectiu de veure com es comporta l'edifici en certes situacions, hem de procedir a l'aplicació càrregues (variables o no) sobre el nostre sistema d'estudi. Les càrregues exteriors que a aplicarem a l'edifici seran les que corresponen a un temporal de neu i vent. Estudiarem l'aplicació de les càrregues en el pitjor escenari possible, és a dir, les dues aplicades alhora. Els valors que utilitzarem per realitzar les nostres simulacions amb el programa CATIA estan estipulats al CTE en l'apartat de SE - AE

9.5.2.1.- Càrregues de neu

El valor de la càrrega de neu associada a la zona d'estudi la trobarem en l'apartat 3.5 (accions variables) del DB_SE-AE d'abril de 2009. Dit nombre variarà segons el clima del lloc, els efectes del vent, la forma de l'edifici o coberta i altres aspectes. Per altre banda els models de càrrega d'aquest apartat només cobreixen els casos de deposició natural de la neu.

El valor de la càrrega de neu total seguint els les recomanacions i passos del DB_SE-AE és: $0,8 \text{ kN/m}^2$

Els càlculs necessaris per arribar a aquest valors de pressió els trobarem en la seva totalitat a l'annex I.

9.5.2.2.- Càrregues de vent

El valor de les càrregues degudes al vent es troben a l'apartat 3.3. (accions variables) del DB_SE – AE d'abril de 2009. Dit nombre no es aplicable a edificis situats a més de 2000 m d'altitud. La distribució i valor de les pressions que exerceix el vent sobre un edifici i les forces resultants depenen de la forma i dimensions de la construcció, així com també la direcció i la intensitat del vent. L'acció del vent, a més, genera forces tangencials paral·leles a la superfície.

Després de realitzar els càlculs pertinents ens surt el següent valor de la pressió dinàmica: $0,94848 \text{ kN/m}^2$ i de forces tangencials degudes a la pressió dinàmica: $0,0189696 \text{ kN/m}^2$.

Els càlculs necessaris per arribar a aquest valors de pressió els trobarem en la seva totalitat a l'annex I.

9.6.- Estudi amb accions de vent i neu

9.6.1.- Pre procés

9.6.1.1.- Aplicació de les càrregues fixes

Com és evident hi ha algunes càrregues permanents en tots els casos de estudi. Aquestes forces son les sobrecàrrega d'ús (que no s'estudiarà ja que el sostre no es transitable i el terra no és deformable) i el pes propi de l'edifici.

A continuació veiem una imatge de l'actuació del pes propi.

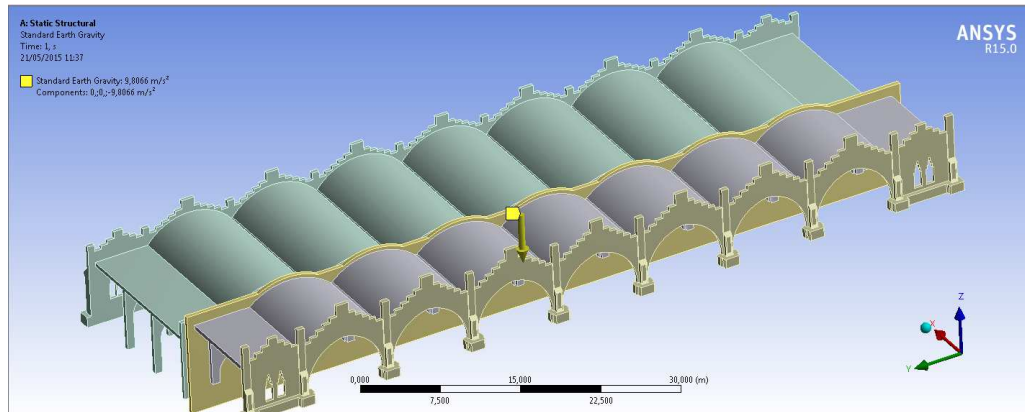


Figura 32.- Càrrega de pes propi

El pes propi de l'edifici el calcula el processador d'ANSYS abans de començar les simulacions, utilitzant els paràmetres de material constructiu introduïts amb anterioritat i el volum del model. Com s'han utilitzat coordenades globals el valor que ANSYS obtingui actuarà en la direcció (-Z).

9.6.1.2.- Aplicació de les càrregues variables

Una vegada calculats els valors de les accions que actuaran en l'edifici, és hora d'aplicar-les al sistema. En les fotografies següents es mostren les superfícies on actuen les accions:

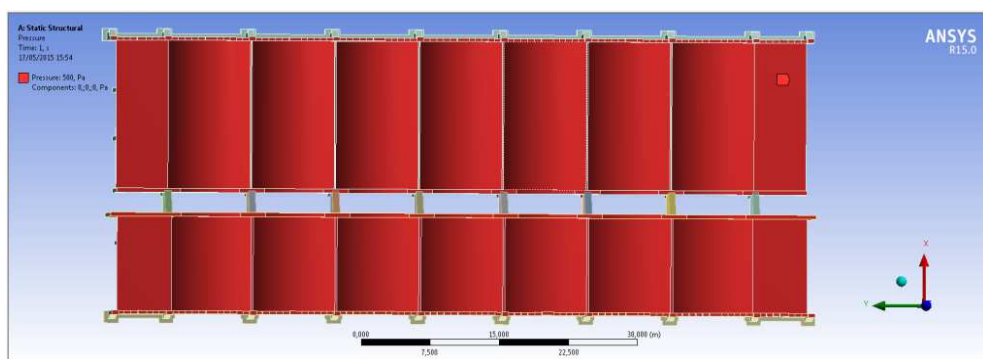


Figura 33.- Acció de neu

El valor de les accions produïdes per la neu està estipulat al CTE DB_SE, i hem calculat el seu valor a l'apartat 9.5.2.1. Aquesta pressió deguda a la neu, igual que el pes propi actuarà a l'eix vertical en sentit negatiu (-Z) del sistema de coordenades global.

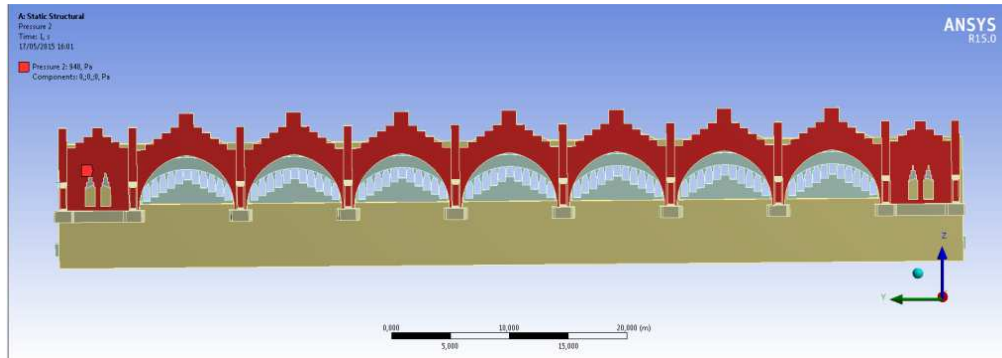


Figura 34.- Acció del vent

El valor de les forces produïdes per el vent son força difícils de calcular, ja que depèn de molts factors, tanmateix seguint les indicacions del DB_SE hem pogut obtenir el vector característic del vent de la zona, calculat a l'apartat 9.5.2.2.

Es farà una simulació de tot el conjunt de l'edifici, d'aquesta manera podrem saber d'una forma global quines son les zones que mes pateixen en el edifici. Analitzarem les deformacions que pateix el sistema així com també els esforços normals màxims segons la Teoria Rankine de l'apartat 6.3.1.

9.6.2.- Post procés

9.6.2.1.- Deformacions

S'ha realitzat un estudi de deformacions amb l'objectiu de tenir una primera impressió de com es comporta l'edifici en la seva globalitat, i tenir en compte aquelles zones més afectades per les accions que hem aplicat al sistema.

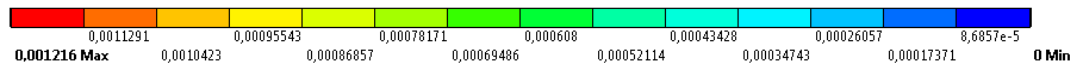


Figura 35.- Rang de desplaçaments [mm]. Estudi 1

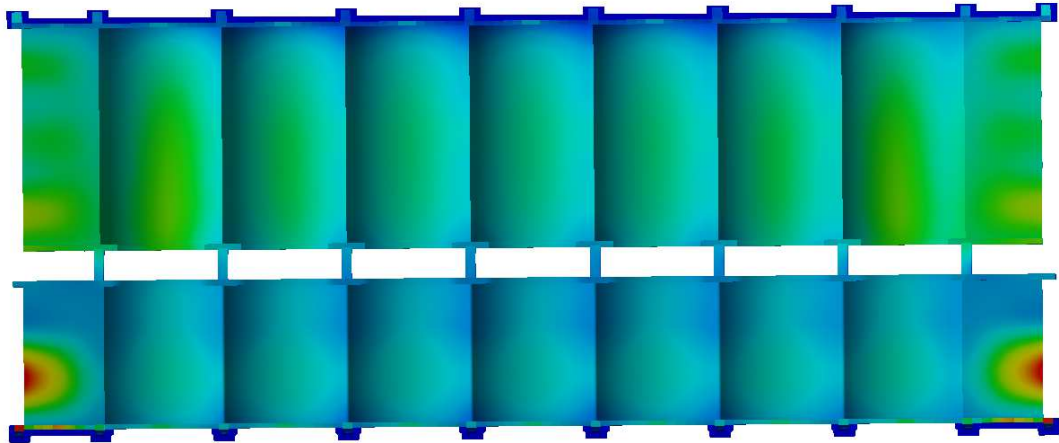


Figura 36.- Vista superior desplaçaments. Estudi 1

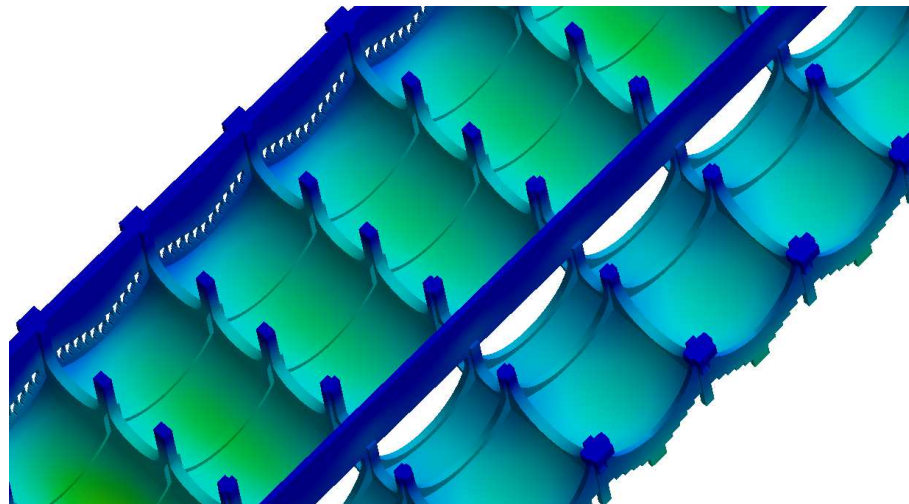


Figura 37.- Detall interior dels desplaçaments. Estudi 1

Els valors màxims de desplaçament es troben a la part superior de l'edifici, concretament en la zona on les naus són més altes. Aquest valors oscil·len entre els 0,2mm i els 0,7mm, uns valors molt acceptables.

Això es degut al fet de que tots els recolzaments amb el terra són sense desplaçament. Si tinguéssim paràmetres de la cimentació o del material utilitzat per fer-la, podríem utilitzar un recolzament elàstic. Posteriorment farem una simulació de fallada on utilitzarem aquest concepte i veurem com es comporta

l'edifici. D'aquesta manera tindrem uns desplaçaments en la zona dels pilars amb un valor més elevat, com veurem mes endavant.

Per altre banda podem observar que hi ha dues zones als laterals, on el desplaçament està al voltant del 1,2mm. Aquest valor el podríem obviar ja que els laterals del edifici estan enganxat a un altre edifici i una façana respectivament i, per tant, no tindríem aquests valors de desplaçaments

9.6.2.2.- Teoria del màxim esforç normal. Teoria Rankine

De igual manera s'ha aplicat el criteri del màxim esforç normal al sistema, amb l'objectiu de obtenir les zones del edifici més sol·licitades. El programa ANSYS no conté, per defecte, aquest criteri així que l'haurem d'introduir nosaltres a mà, utilitzant la següent fórmula:

$$= \max (abs(s1 - s2); abs(s2 - s3); abs(s3 - s1))$$

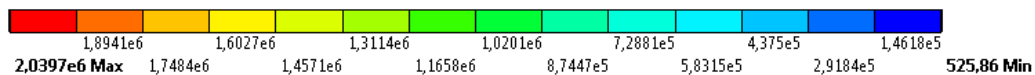
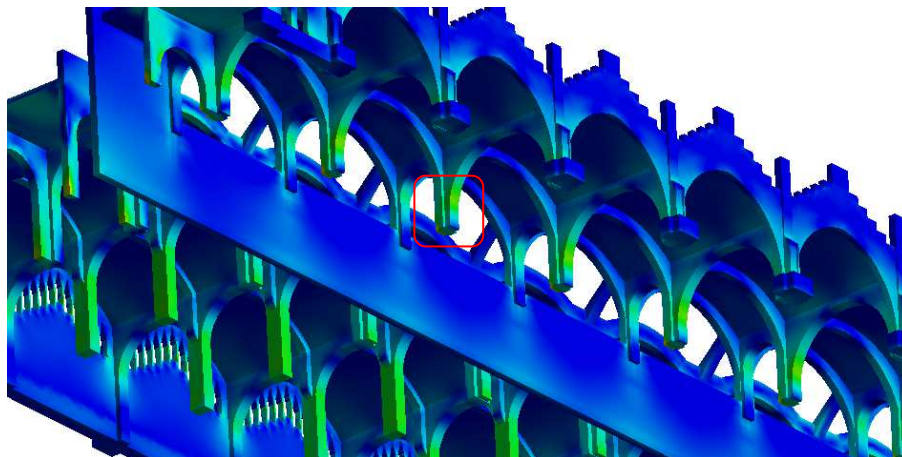


Figura 38.- Rang de tensions [Pa]. Estudi 1

Ens fixarem de manera especial en la zona marcada en vermell, ja que és on es situen les tensions més importants.



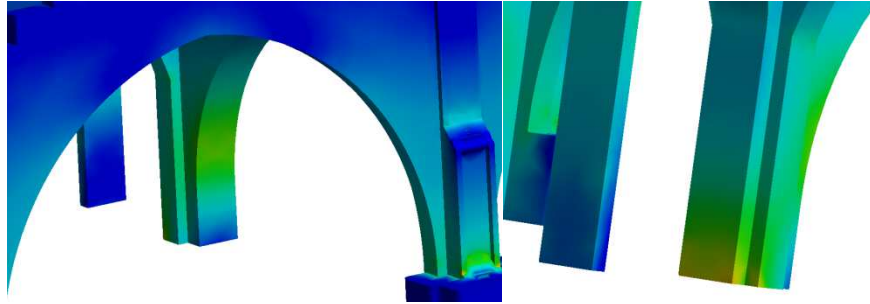


Figura 39.- Zones més sol·licitades del porxo de premses. Estudi 1

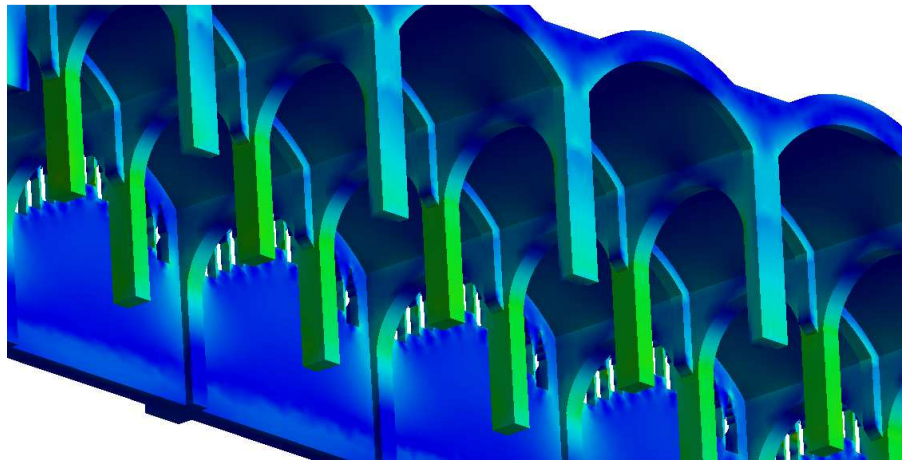


Figura 40.- Zones més sol·licitades del celler gran. Estudi 1

Com podem observar les zones més sol·licitades són les bases dels pilars, tant del celler gran com del porxo de premses. Les tensions tenen un valor més gran en el porxo de premses ja que la llum entre pilars és més gran.

Evidentment el valor obtingut aquí no és un valor fiable, ja que la Teoria de la màxima tensió normal ens dona el valor màxim de les tensions i no discrimina entre primera, segona o tercera tensió principal (només valors quantitius). Per tant, haurem de fer un anàlisi de la 1a tensió principal, que ens donarà les zones que treballen a tracció, i de la 3a tensió principal, que ens dirà les zones que treballen a compressió.

Pot passar desapercebut però hi ha una zona en la qual els valors de tensió superen la mitja. Aquests punts són els situats entre els elements decoratius de la façana posterior del celler gran. Com hi ha una separació tan petita són una zona on s'acumulen tensions.

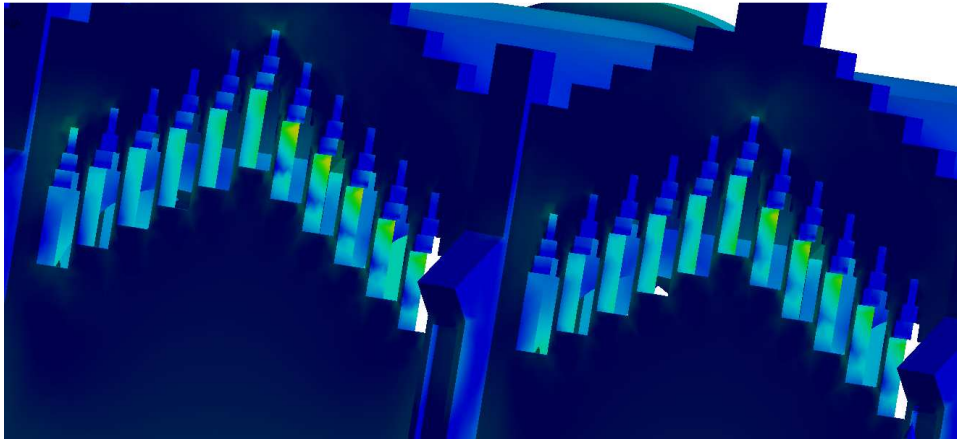


Figura 41.- Detall de la façana posterior

A continuació farem un anàlisi de la primera i tercera tensions principals per poder veure les zones que més treballen a tracció i quines a compressió.

9.6.2.1.1.- Tensions principals.

En aquest apartat estudiarem els valor de les tensions principals que actuen al sistema. La primera tensió principal mostra totes aquelles zones que treballen a tracció i, per tant, amb les que haurem d'estar més alerta ja que la obra de fàbrica te una resistència a la tracció força baixa.

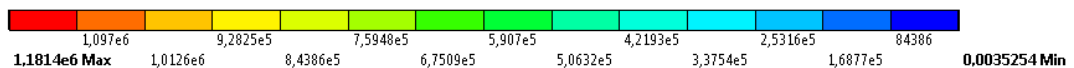
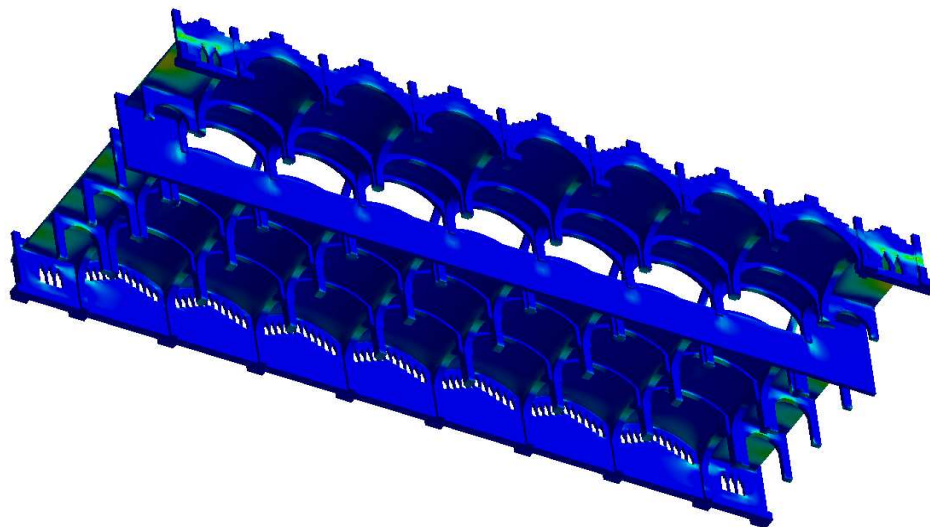


Figura 42.- Rang de Tensions [Pa] (1a Tensió principal). Estudi 1



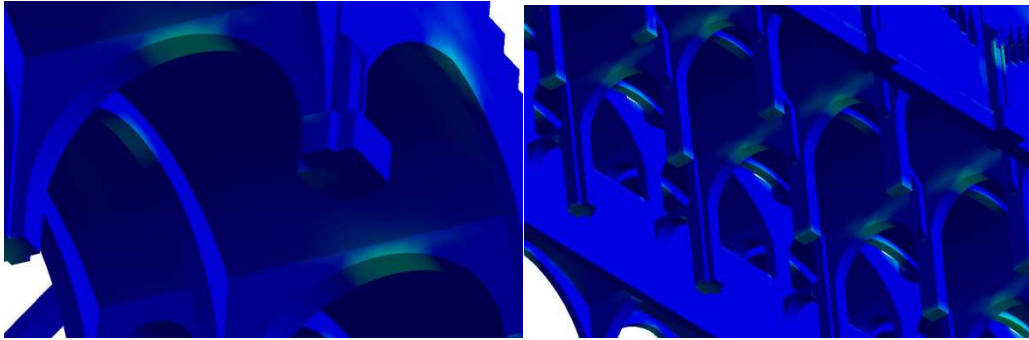


Figura 43.- Zones sol·licitades a tracció. Estudi 1

Com podem observar en totes les imatges que es presenten, els valors màxims de les primeres tensions principals es troben en les claus de tots els arcs que formen els edificis.

Novament, obviarem les tensions tant altes que apareixen en les naus laterals, per les raons prèviament esmentades. Els valors de les tensions a tracció que apareixen en el edifici arriben gairebé a la resistència màxima de tracció trobada en el apartat 9.2.2.1 que és de 0,4MPa. En el nostre cas els valors arriben als 0,337MPa, per tant els arcs estan patint a tracció, cosa no gaire desitjada. De qualsevol manera, les tensions que s'assoleixen no son suficients per fer perillar la seguretat estructural de l'edifici.

Per altre banda també hem d'analitzar la tercera tensió principal, que ens mostra totes les zones que estan sol·licitades a una tensió de compressió. Val a dir que la resistència a compressió de la obra de fàbrica és substancialment més gran que la de tracció. A continuació observem unes imatges que demostren on es troben aquestes:

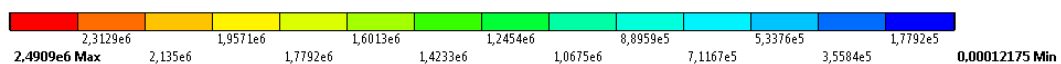


Figura 44.- Rang de tensions [Pa] (3a tensió principal). Estudi 1

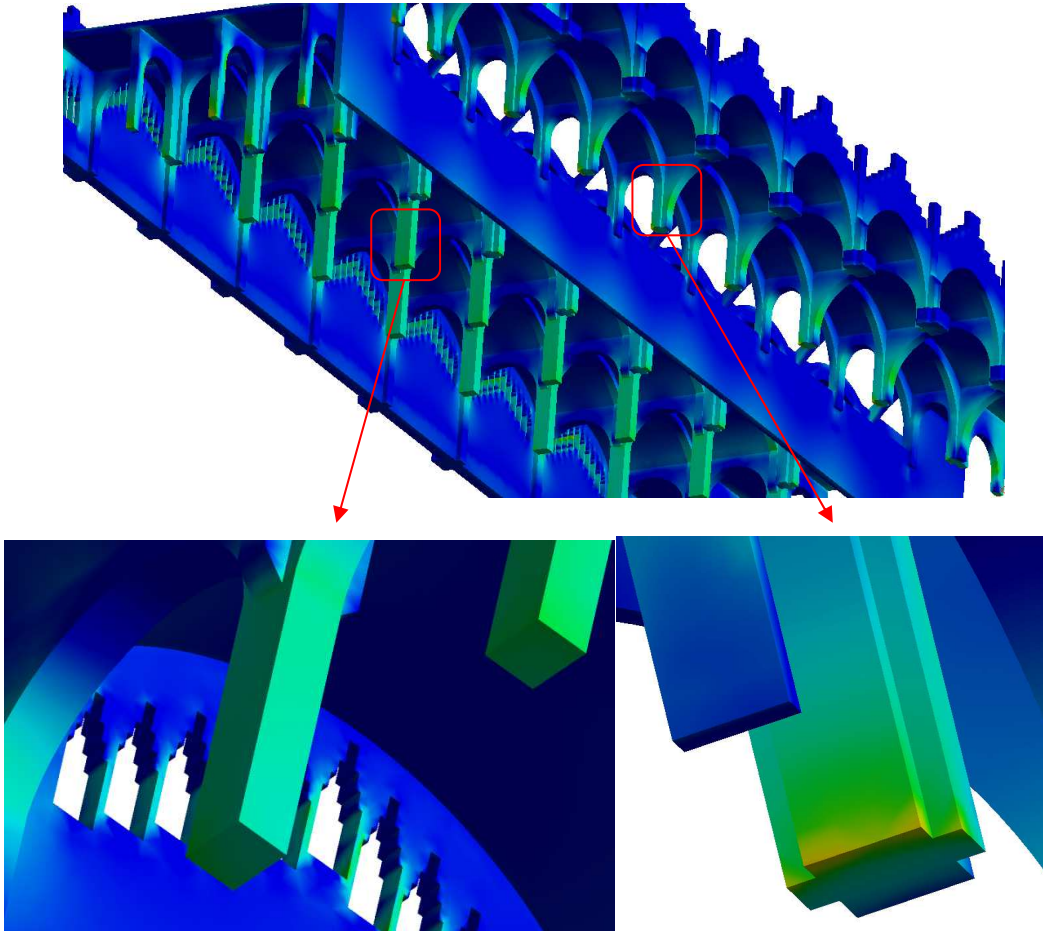


Figura 45.- Zones sol·licitades a compressió. Estudi 1

Com es pot veure a les imatges, les zones més sol·licitades a compressió en l'edifici són les bases dels pilars, que arriben a uns valors de 2,3MPa en el porxo de premses. Aquest valor està molt per sota de la resistència màxima a compressió de la obra de fàbrica que està al voltant del 4MPa, de manera que una la compressió dels materials estructurals no serà la causa a la hora de que l'edifici pateixi un col·lapse. De igual manera, al celler gran també trobem tensions de compressió a la base dels pilars però aquestes de un valor lleugerament menors. Arriben a valors de entre 1,6 i 1,7MPa. Concretament el valor s'assoleix al pilar central els tres que formen el conjunt del celler gran.

Aquesta diferència de valors és deguda a la llum existent entre pilars. Com la llum entre pilars del porxo de premses és major, els pilars es veuen forçats a suportar més pes entre ells dos. Mentre que si observem el celler gran, hi ha un successió de 3 arcs amb una menor llum entre pilars, de manera que a la hora de repartir-ne el pes de la estructura, provoca que hagin d'aguantar menys pes cadascun.

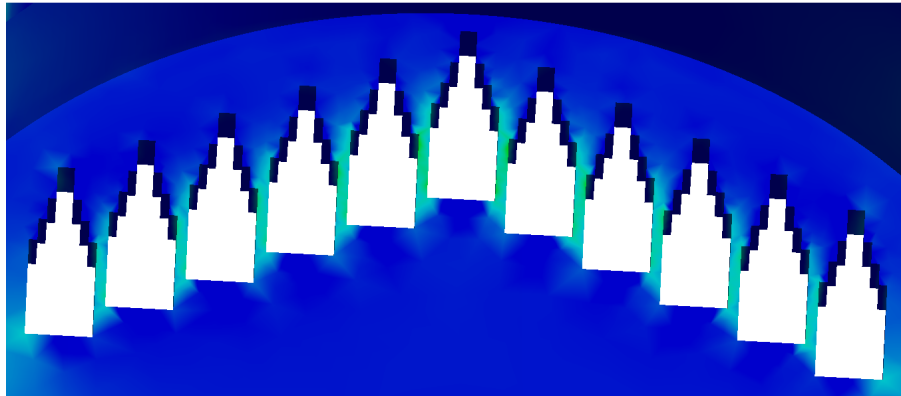


Figura 46.- Detall de la façana posterior

Una altra part que requeria de un anàlisi era la decoració de la façana posterior, ja que degut a la seva configuració podia actuar com acumulador de tensions. Com podem observar si que acumula tensions, encara que no prou altes com per provocar una fallada degut a la compressió. Només arriba fins a un valor de 1,7MPa.

9.6.3.- Anàlisi dels resultats

Com a conclusió general d'aquest primer cas d'estudi, podem dir que hem necessitat de fer un anàlisi amb més profunditat del criteri de Rankine, ja que un únic anàlisi, no el podem considerar complert. Llavors hem hagut de recórrer a analitzar les tensions principals, concretament la primera (que ens mostrarà les zones que treballen a tracció) i la tercera (que seran les zones sol·licitades a compressió). També s'ha tingut en compte un anàlisi de deformacions per tenir una primera impressió de com es comportarà el edifici a la sol·licitud de forces establertes en el DB_SE-AE.

Podem observar que les tensions que apareixen en la estructura van des de 2,5MPa, a la tracció, fins a 1,18MPa, de compressió. Realment, els valors de la tracció arriben fins a 0,34MPa, que es troben per sota del límit de resistència a compressió. Podem obviar els valors superiors al esmentat ja que apareixen a la superfície superior de les naus laterals. Això es degut a que l'edifici està situat al costat d'un altre i té una façana lateral que no s'han tingut en compte.

Podem concloure que l'edifici no supera en cap moment les tensions principals de compressió i tracció, i per tant, podem garantir la seguretat estructural davant les accions que determina el DB_SE-AE.

9.7.- Estudi de fallada

Un altre interessant punt d'estudi de l'edifici és el cas de fallada d'algun dels punts de recolzament. Aquest estudi el podem explicar com el cas de que alguna de les cimentacions estigués en mal estat i que, per tant, pogués donar lloc al col·lapse parcial de l'edifici, façana, nau o alguna altre part del mateix. En el present estudi, només veurem com evoluciona l'edifici si fallessin un parell de cimentacions, no les dues de cop sinó una per separat de l'altre.

En un futur, es podria fer un anàlisi més detallat de aquest tipus d'estudi, utilitzant més pilars i combinació d'aquests. Això podria ser útil a la hora de detectar patologies en les cimentacions de l'edifici i tenir el temps necessari per poder solucionar el problema.

9.7.1.- Pre - procés

En el estudi de fallada també tindrem en compte que l'edifici es troba en un temporal de vent i neu, així podrem estudiar com respondria l'edifici amb un problema de cimentació en el cas més desfavorable. Per tal de poder portar a terme l'estudi haurem de canviar un recolzament de la façana i del celler gran, de tipus recolzament rígid a recolzament elàstic.

La introducció d'aquest recolzament comportarà la introducció de la variable de mòdul d'elasticitat del terreny sobre el que està sostingut. Haurem d'introduir un paràmetre que requereix el software ansys: *foundation stiffness*, és una manera d'especificar una rigidesa per unitat d'àrea que només actua en la direcció normal a la cara de l'element. Haurem d'establir un valor de mòdul d'elasticitat força baix per representar que la cimentació pot fallar en qualsevol moment.

En el nostre cas utilitzarem un paràmetre de 200N/m^3

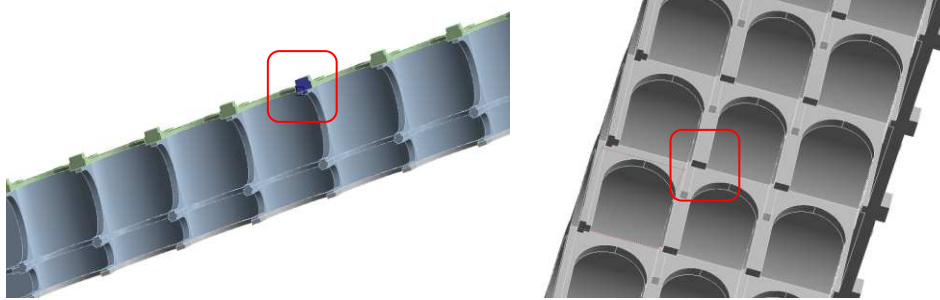


Figura 47.- Recolzaments elàstics

Com a primera impressió, i sense mirar els resultats que sortiran posteriorment, podem dir que apareixeran tensions de tracció a les vores de la clau de l'arc degut al desplaçament dels pilars. Estudiarem els edificis per separat i d'aquesta manera podrem obtenir diferents conclusions en funció de l'edifici que estiguem.

9.7.2.- Post procés

9.7.2.1.- Estudi de deformacions

La primera cosa que mirarem seran les deformacions que pateix el edifici, per poder fer-nos una primera idea de com es comportarà l'edifici i on possiblement es localitzaran les tensions de tracció i compressió.

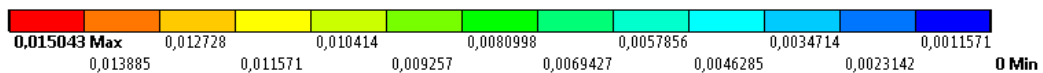


Figura 48.-Rang de deformacions [mm]. Porxo de premses. Estudi 2

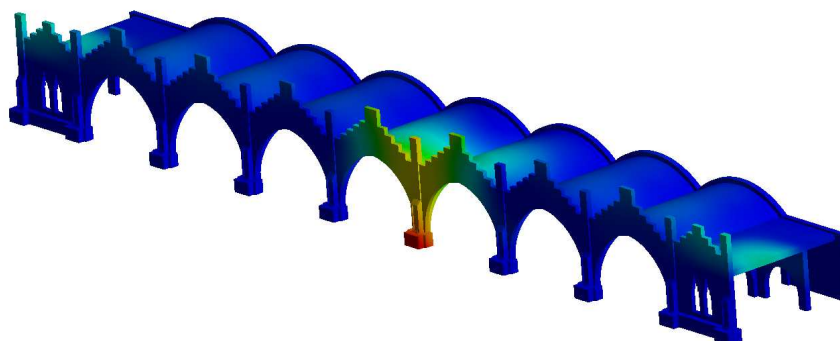


Figura 49.- Zones deformades. Porxo de premses. Estudi 2

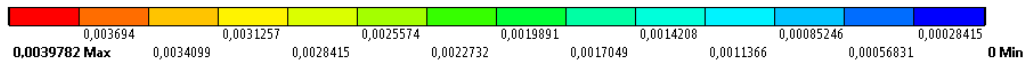


Figura 50.- Rang de deformacions [mm]. Celler gran. Estudi 2

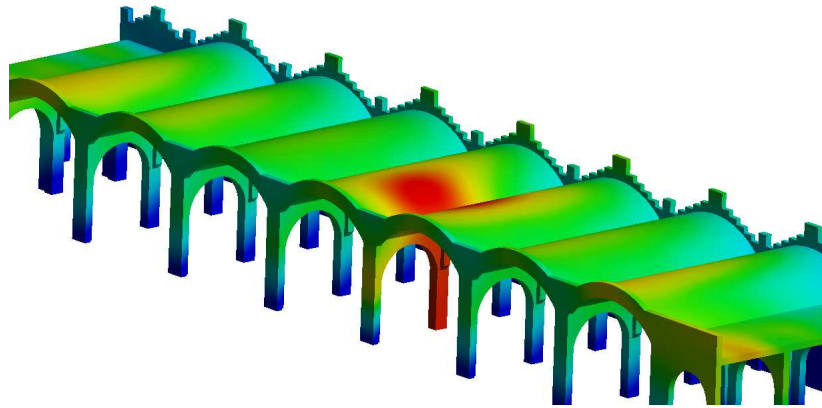


Figura 51.-Zones deformades. Celler gran. Estudi 2

Com era evident, la zona on hi haurà més desplaçament és el propi recolzament elàstic. Podem observar que els valors que s'assoleixen en el porxo de premses van des de els 1,1mm als 15mm. En una primera impressió pot semblar poc, però pot ser suficient per fer col·lapsar l'edifici. Igualment els valors del celler gran son força elevats, encara que no tants comparats amb els anteriors, ja que només arriben fins als 4mm aproximadament. A continuació analitzarem les tensions i podrem confirmar si l'edifici col·lapsarà parcialment o no.

9.7.2.2.- Teoria del màxim esforç normal. Teoria Rankine

De igual manera que en el estudi anterior veurem les tensions a les que està sol·licitada la nostra estructura. Com també hem comentat anteriorment no podrem saber quines zones treballaran a compressió o quines a tracció, ja que aquest criteri només dona el valor màxim i no el tipus de tensió.

A continuació veurem les zones més sol·licitades.

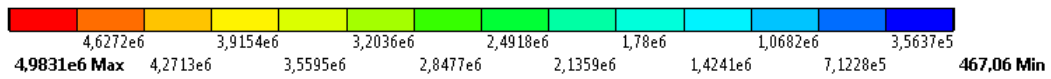


Figura 52.- Rang de tensions [Pa]. Porxo de premses. Estudi 2

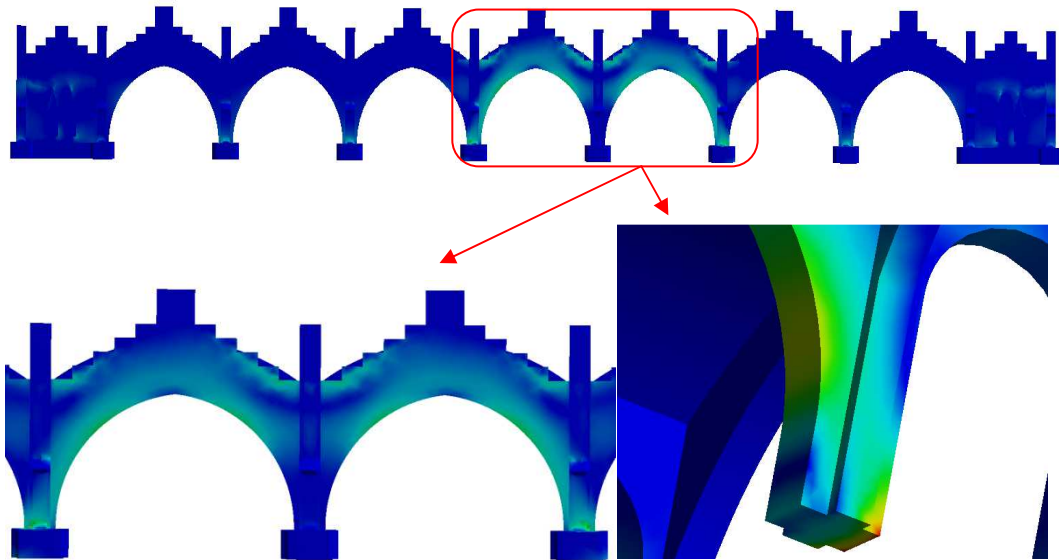


Figura 53.- Zones a tensió. Porxo de premses Estudi 2

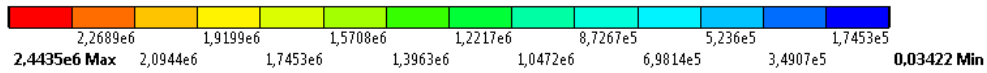


Figura 54.- Rang de tensions [Pa]. Celler gran. Estudi 2

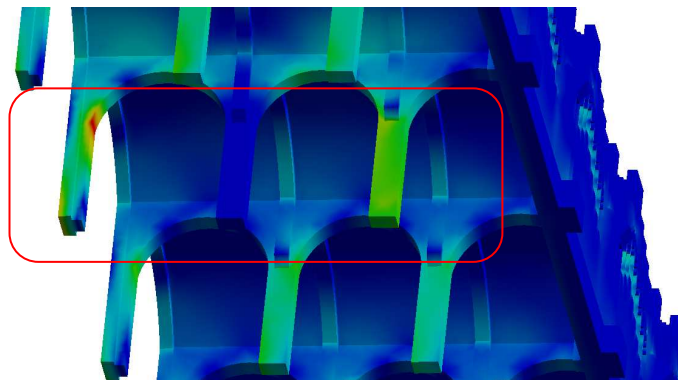


Figura 55.- Zones sotmeses a tensió. Celler gran. Estudi 2

Com podem veure hi ha zones en els dos edificis que superen clarament les resistències màximes a tracció o compressió. Com no sabem quina zona correspon a tracció i a compressió, realitzarem el mateix estudi que per al estudi anterior (de primera tensió principal i tercera tensió principal)

9.7.2.1.1.- Tensions principals.

La primera tensió principal ens mostrarà les zones afectades per la tracció i podrem determinar si la tensió màxima que assolix és suficient per fer col·lapsar l'edifici o no.

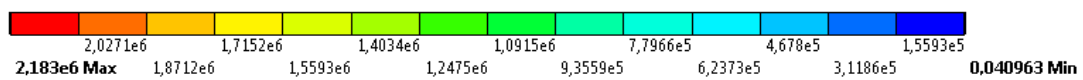


Figura 56.- Rang de tensions [Pa] (1a tensió). Porxo de premses. Estudi 2

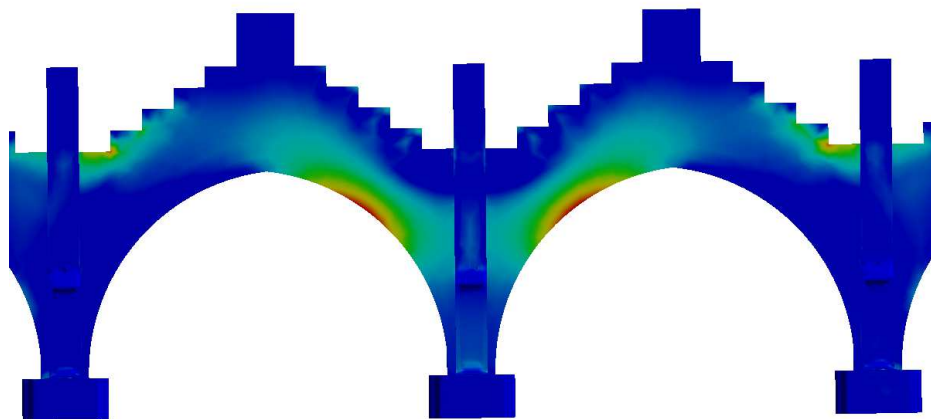


Figura 57.- Zones afectades per la tracció. Porxo de premses. Estudi 2

Les úniques zones afectades per la tracció, a part de les claus dels arcs interiors, que no superen la resistència límit a tracció de la obra de fàbrica, són les parts que veiem marcades en vermell a la imatge de la façana principal, on el valor que assolixen, superen en molt els límits establerts, arribant a valors de 2,18MPa, mentre que la resistència màxima de tracció és de 0,4MPa.

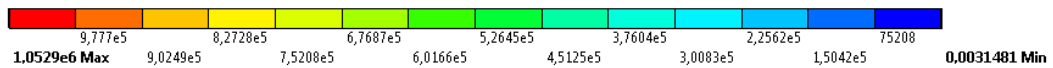


Figura 58.- Rang de tensions [Pa] (1a tensió). Celler gran. Estudi 2

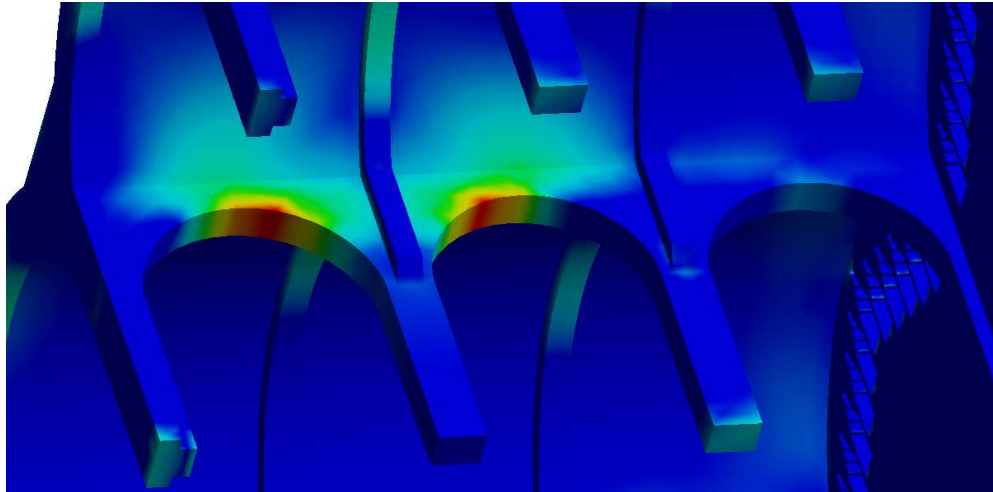


Figura 59.-Zones afectades per la tracció. Celler gran. Estudi 2

En el cas del porxo de premses, la estructura també col·lapsarà per la zona marcada en vermell. La única diferència que trobem és que el valor de les tensions a tracció que apareixen tenen un mòdul més petit, només superant en 0,6MPa la tensió límit de tracció.

Per tant, la estructura col·lapsarà per les zones que veiem en vermell i un primer indicatiu de fallada serà la aparició de esquerdes en la superfície de la façana principal o les cares del pilar del celler gran. Les zones sol·licitades a compressió les veurem en la tercera tensió principal. De igual manera que en l'anterior anàlisi:

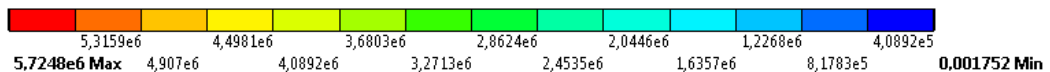


Figura 60.- Rang de tensions [Pa] (3a tensió). Porxo de premses. Estudi 2

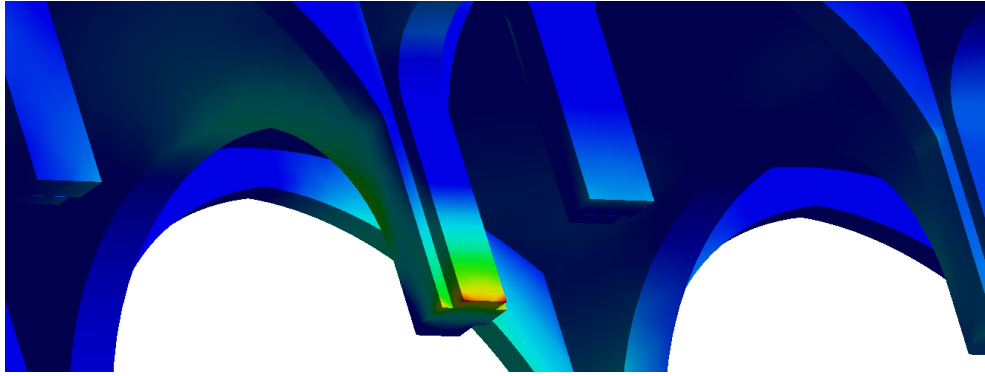


Figura 61.- Zona a més tensió de compressió. Porxo de premses. Estudi 2

Les tensions de compressió les trobem a les mateixes zones que en l'estudi anterior. L'única diferència substancial la trobem en la base del pilar del porxo de premses, que adopta valors al voltant de 5MPa, fins a un màxim de 5,72MPa, majors que els de la resistència màxima a compressió que en el cas d'estudi és 4,43MPa. Per tant, el edifici podrà col·lapsar també per aquí.

Realitzant les mateixes simulacions en l'altre edifici d'estudi obtenim uns resultats força sorprenent, ja que com veurem a continuació la estructura no fallarà per compressió.

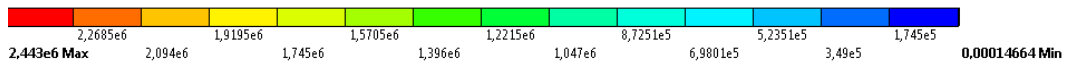


Figura 62.- Rang de tensions [Pa] (3a tensió). Celler gran. Estudi 2

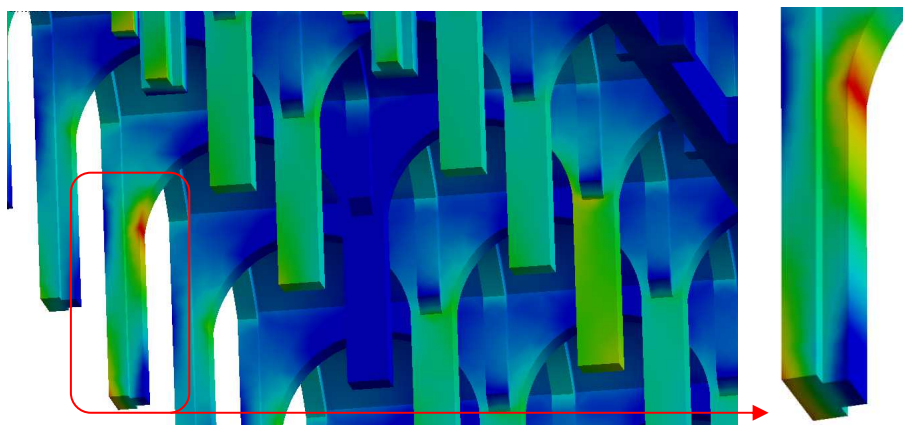


Figura 63.- Pilar sol·licitat a compressió. Celler gran. Estudi 2

Com ja hem avançat en l'anterior paràgraf, aquesta part de l'edifici no col·lapsarà degut a la compressió ja que el valor màxim que assoleixen les

tensions és de 2,443MPa, molt per sota del límit a compressió de la obra de fàbrica.

Com a conclusió final de aquest anàlisi, podem dir que es pot utilitzar una simulació d'aquest perfil per a poder fer un anàlisi preventiu davant de possibles fallades en la cimentació de l'edifici. Serviria com eina de diagnòstic davant una patologia com la descrita en aquest apartat. Hauríem de fer més estudis com aquest al llarg de tots els pilars per veure com es comporten cadascun d'ells davant d'una possible fallada.

9.7.3.- Anàlisi del resultats

Com a conclusió general d'aquest segon cas d'estudi, podem dir que igualment hem hagut de fer un anàlisi amb més profunditat del criteri de Rankine, ja que un únic anàlisi, no el podem considerar complert. Igualment, com en el cas anterior, hem hagut de recórrer a analitzar les tensions principals, la primera (zones a tracció) i la tercera (zones a compressió). També s'ha tingut en compte un anàlisi de deformacions per tenir una primera impressió de com es comportarà el edifici a la sol·licitud de forces establertes en el DB_SE-AE.

Les tensions obtingudes en l'estudi mostren tensions de tracció superiors al límit obtingut a partir del DB_SE-F. Concretament superen en: 1,8MPa en la tracció del porxo de premses i en 0,6MPa la del celler gran. Les dues les trobem en les zones de les claus de l'arc, ja que al baixar el pilar son aquestes zones les que es desplacen cap avall, provocant la tracció de la zona.

En segon lloc, la compressió la trobem en uns petits punts en la base dels pilars interiors del porxo de premses i a la part mitja inferior del pilar estudiat al celler gran. Podríem dir que, en el porxo de premses, no son gaire preocupants ja que son zones molt petites i es pot deure a un error del programa. No obstant, haurem d'estar alerta, al hora de buscar alguna patologia a les cimentacions provocades per les compressions, a les zones esmentades. En canvi en el celler gran no tenim res de que preocupar-nos ja que, com la llum entre pilars és més petita les tensions a compressió no superen el límit.

Podem concloure, que en una situació de temporal de vent i neu, problemes en les cimentacions del edifici, poden fer col·lapsar parcialment la estructura d'estudi. S'hauria de fer un examen exhaustiu de les zones afectades per poder emetre un diagnòstic que pogués resoldre la problemàtica.

10.- Conclusions generals

En aquest apartat es presenta algunes aportacions i coneixements que s'ha adoptat i adquirit durant la realització del present estudi:

- Amb aquest estudi es demostra la gran utilitat que tenen els mètodes d'anàlisi computacional a la hora de resoldre problemes d'aquest tipus, així com també en l'anàlisi i disseny de nous productes.
- El primer pas, com s'ha explicat en els primers apartats del treball, és la realització de un bon model. La realització del model ha de ser el més senzill possible, prenent les mesures necessàries per a que les variacions geomètriques no afectin els resultats posteriors.
- Sens dubte, quan realitzem una simulació d'aquest tipus, hem de tenir en compte el nivell de la CPU que utilitzarem. Per tant, és bo utilitzar simplificacions geomètriques si el nostre ordinador no disposa de un bon processador.
- Durant la realització de totes les simulacions s'han establert certes hipòtesis que simplifiquen els resultats i que fan variar la precisió dels resultats. Aquest estudi, per tant, té una base molt qualitativa i s'ha d'interpretar com un primer pas per conèixer el comportament estructural del Mas Can Codorniu.

11.- Continuacions de l'estudi

En el present apartat es proposen diferents idees per a ampliar l'estudi i obtenir resultats més precisos de cara a futurs projectes.

- Sens dubte la primera idea, seria eliminar la simplificació del material constructiu. Consistiria en realitzar l'estudi utilitzant un model més real del material de construcció, ja que hem considerat la obra de fàbrica com un material ininterromput que es deforma de manera igual en totes les seves fases. De manera que el futur projecte, contemplés un comportament no lineal del material de construcció.

- Seguint amb les hipòtesis de materials, seria interessant saber amb exactitud el valor dels paràmetres de densitat, mòdul de Young, coeficient de Poisson i les resistències del material de manera experimental. Així s'obtindrien resultats encara més pròxims a la realitat.
- Una altra proposta, seria utilitzar el mòdul d'ANSYS, d'estudi de sub-models per obtenir resultats encara més curosos de les zones més conflictives de l'estructura.
- Es podria utilitzar el mòdul de Fluent per obtenir un resultat molt més precís de l'acció del vent, sobre la estructura i no haver de recórrer a utilitzar una força de pressió sobre una superfície. Prèviament s'hauria de fer un estudi de la dinàmica de l'aire present a la zona per tal de tenir resultats òptims.

A continuació es presenta una possible planificació de les tasques futures que haurà de tenir la continuació del treball, es parteix de la base que molts del paràmetres que es requereixen, es poden obtenir del present estudi.

Taula 12.- Planificació de fase posterior

TASCA	DURACIÓ (dies)
Millora de model tridimensional amb software CAD	10
Estudi del comportament real de la obra de fàbrica	10
Definició dels casos d'estudi segons el CTE	5
Refinament de malla	5
Post - procés de resultats	10

12.- Impacte mediambiental

El present estudi no ha provocat cap impacte mediambiental més enllà de la energia necessària per fer funcionar l'ordinador així com també els materials necessaris per construir-lo.

Si no haguéssim comptat amb un ordinador capaç de fer anar un programa d'elements finits, s'hauria d'haver procedit a la obtenció de dades de

manera experimental, procedint amb la realització d'una maqueta a escala de l'edifici d'estudi, construcció d'un túnel de vent i pesos per simular les accions de pluja i neu. A part hauríem de comptar amb alguna nau on poder recollir tot el material prèviament descrit. Com podem observar la introducció de les computadores per l'anàlisi d'elements finits ha aconseguit rebaixar el impacte ambiental d'aquest tipus d'estudis.

D'aquesta manera, reduint el impacte ambiental del projecte, en concepte de materials i energia s'aconsegueix una considerable rebaixa del cost total del projecte.

13.- Pressupost

A continuació es presenta una descripció de cadascun dels costos que forma el pressupost de l'estudi realitzat. Dividirem el pressupost en dos grans blocs. Es dividirà el pressupost en dos grups: mà d'obra i recursos materials.

- **Recursos Humans:** S'ha considerat (en quant a salari es refereix) que el treball ha estat realitzat per un enginyer graduat en Tecnologies Industrials a 20€/hora.
- **Recursos Materials:** Degut a que s'han utilitzats programes de mètodes computacional que no es troben de manera lliure, hauréem d'introduir el preu de la llicència del programa.

En la taula següent veiem el cost dels recursos que s'han utilitzat durant la realització de l'estudi, de una manera global. En el document pressupost es mostra de una manera més detallada de que està format cada recurs.

Taula 13.- Cost total de l'estudi

Recurs	Preu (€)
Recursos humans	6.000,00
Recursos materials	37.645,00
COST TOTAL	43.645,00

El cost estimat del projecte és de: quaranta-tres mil sis-cents cinquanta-quatre (43.654,00) €

Com podem observar la gran part del cost prové de les llicències del programes necessaris per realitzar l'estudi, que son: Microsoft Office 2007, CATIA P3 V5R17 i ANSYS Workbench 15.0. Hem pogut abaratir una mica el pressupost utilitzant un lloguer per un any del programa ANSYS .

14.- Bibliografia

- [1] *Adrián Martín Rodríguez* (Novembre 2010). Simulación mediante el método de los elementos finitos de una estructura metálica. Obtingut de: http://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/11571/PFC_Adrian_Martin_Rodriguez.pdf?sequence=1
- [2] *Afanador García, Nelson, Guerrero Gómez, Gustavo, Monroy Sepúlveda, Richard*. PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LADRILLOS MACIZOS CERÁMICOS PARA MAMPOSTERÍA. Ciencia e Ingeniería Neogranadina [en línea]
- [3] ANSYS. Inc (Novembre de 2009). Structural Analysis Guide. Obtingut de: http://orange.engr.ucdavis.edu/Documentation12.1/121/ans_str.pdf
- [4] ANSYS. Inc (Novembre de 2009). User Defined Results, Part 2. Obtingut de: http://www.edr.no/blogg/ansys_bloggen/ansys_tutorial_user_defined_results_part_2
- [5] ANSYS. Inc (Novembre de 2009). Introduction to ANSYS Meshing. Obtingut de: <http://qaansys.ansys.com/staticassets/site/4A70CF7C14214B4CA0B4D6E9BE0B76C2/files/bc509c880517460c8710b1bb5dd1d80b.pdf>
- [6] *Carlos Armando De Castro P.* (Sense data). Teoría de falla bajo cargas estáticas. Obtingut de: <http://dim.usal.es/eps/im/roberto/cmm/Teorasdefallabajocargasestticas.pdf>

- [7] Catalunya. Servei del Patrimoni Arquitectònic (sense data). Mas Can Codorniu. Plànols històrics. Arxiu COAC. 2.- Alçat. Obtingut de: <http://calaix.gencat.cat/handle/10687/34957>
- [8] Catalunya. Servei del Patrimoni Arquitectònic (sense data). Mas Can Codorniu. Plànols històrics. Arxiu COAC. 3.- Alçat. Obtingut de: <http://calaix.gencat.cat/handle/10687/34956>
- [9] Catalunya. Servei del Patrimoni Arquitectònic (sense data). Mas Can Codorniu. Plànols històrics. Arxiu COAC. 4.- Alçat. Obtingut de: <http://calaix.gencat.cat/handle/10687/34955>
- [10] Codorniu. (Maig 2015), Obtingut de: <http://es.wikipedia.org/wiki/Codorn%C3%ADu>
- [11] Dirección General de Arquitectura, (Abril 2009). Documento Básico SE-AE. Obtenido en la base de datos del Ministerio de Fomento: http://www.codigotecnico.org/cte/export/sites/default/web/galerias/archivos/DB_SE-F_abril_2009.pdf
- [12] Dirección General de Arquitectura, (Abril 2009). Documento Básico SE-AE. Obtenido en la base de datos del Ministerio de Fomento: http://www.codigotecnico.org/cte/export/sites/default/web/galerias/archivos/DB_SE-AE_abril_2009.pdf
- [13] *Griselda Aixelà*. Caves Codorniu fitxa de Documentació (sense data). Pla d'ordenació urbanística municipal. Catàleg del patrimoni arquitectònic de Sant Sadurní d'Anoia. Obtingut de: <http://oslo.geodata.es/stsadurnia/textos/arquitectonic/2.pdf>
- [14] *J.López, S.Oller, E.Oñate*. (Desembre 1998). Calculo del Comportamiento de la Mampostería Mediante Elementos Finitos. <http://www.cimne.com/personales/eo/publicaciones/files/M46.pdf>
- [15] *Juan Tomás Celigüeta Lizarza, Dr. Ingeniero Industrial. Profesor de Análisis Estructural de la Escuela Superior de Ingenieros de San Sebastián* (2008). Méthode de los Elementos Finitos para Análisis Estructural. Obtingut de: <http://www.unav.es/adi/UserFiles/File/80980339/Elementos%20Finitos%281%29.pdf>

- [16] *Santiago Huerta* (Desembre 2004). Arcos, bóvedas y cúpulas. Geometría y equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica.
http://oa.upm.es/1136/1/Huerta_2004_Arcos_bovedas_y_cupulas.pdf