Escola de Camins
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

Anàlisi de la vulnerabilitat sísmica d'esglésies romàniques a Catalunya

TREBALL FINAL DE GRAU

Treball realitzat per:

Ana Lledó Wolkowicz

Dirigit per:

Pere Roca

Grau en:

Enginyeria Civil

Barcelona, 27/01/2021

Departament d'Enginyeria Civil i Ambiental

Agraïments

En primer lloc, a Pere Roca, el meu tutor, per la paciència i per la confiança.

Als meus pares, per tenir sempre més fe que jo mateixa.

A Guille, pels consells, a Lucía, per aguantar-me amb dèficit de son.

I Joan Carles, per l'empenta a l'esprint final.

TAULA DE CONTINGUTS

2 INTRODUCCIÓ 7

3 estat de l'art 8

3.1 ESTUDI DE LA VULNERABILITAT SÍSMICA 8

3.2 la maçoneria com a material de construcció 9

3.3 mètode dels índex de vulnerabilitat 10

3.3.1 Antecedents i concepte general 10

3.3.2 Metodologia d'aplicació del mètode dels índex de vulnerabilitat 11

3.4 ANÀLISI LÍMIT CINEMÀTICA 18

3.4.1 Antecedents i concepte general 18

3.4.2 Metodologia d'aplicació del l'anàlisi límit cinemàtica 18

4 Aproximació als casos estudiats 29

4.1 EL ROMÀNIC A CATALUNYA 29

4.1.1 Preromànic (finals del segle IX a inicis del segle XI) 29

4.1.2 El primer romànic (segle XI) 30

4.1.3 Romànic ple (segle XII) 31

4.1.4 Romànic tardà (des del segle XII als segles XIV i XV) 32

4.2 sismicitat a catalunya 33

4.2.1 Context geodinàmic 33

4.2.2 Terratrèmols històrics 34

4.3 ESGLÉSIA DEL MONESTIR DE SANTA MARIA DE POBLET 35

4.3.1 Situació 35

4.3.2 Tipus de sòl 36

4.3.3 Història 36

4.3.4 Geometria 38

4.3.5 Estat de conservació 40

4.4 CATEDRAL DE SANTA MARIA DE LA SEU D'URGELL 41

4.4.1 Situació 41

4.4.2 Tipus de sòl 41

4.4.3 Història 42

4.4.4 Geometria 43

4.4.5 Estat de conservació 44

4.5 CANÒNICA DE SANTA MARIA DE VILABERTRAN 45

4.5.1 Situació 45

4.5.2 Tipus de sòl 46
4.5.3 Història 46
4.5.4 Geometria 48
4.5.5 Estat de conservació 50
5 APLICACIÓ DELS MÈTODES ALS CASOS PROPOSATS 52
5.1 METODOLOGIA DE CÀLCUL 52
5.1.1 Càlcul de la càrrega de les voltes 52
5.1.2 Efectes del desplaçament del mur en l'estabilitat de les voltes 53
5.2 CÀLCULS APLICATS A POBLET 57
5.2.1 Mètode dels índex de vulnerabilitat 57
5.2.2 Corbes de fragilitat 61
5.2.3 Mètode de l'anàlisi límit cinemàtic 62
5.2.4 Anàlisi de resultats 67
5.3 SANTA MARIA DE LA SEU D'URGELL 73
5.3.1 Mètode dels índex de vulnerabilitat 73
5.3.2 Mètode de l'anàlisi límit cinemàtic 78
5.3.3 Anàlisi de resultats 80
5.4 SANT MARIA DE VILABERTRAN 84
5.4.1 Mètode dels índex de vulnerabilitat 84
5.4.2 Mètode de l'anàlisi límit cinemàtic 88
6 CONCLUSIONS 93
ANNEXE I: TAULES DELS ÍNDEX DE VULNERABILITAT
ANNEXE II: TAULES DE DEFORMACIÓ LÍMIT DE VOLTES APUNTADES

1 INTRODUCCIÓ

Al llarg dels segles, innombrables monuments històrics han patit danys, sovint irreparables, a causa de terratrèmols. Per preservar la seva integritat o al menys protegir-los de danys irreversibles cal intervenir i anticipar-se als efectes de l'activitat sísmica.

Tot i que hi ha diverses tipologies d'edificis històrics (per exemple: palaus, esglésies, monestirs, torres, etc) i que la seva resposta varia davant de sisme, hi ha elements singulars que augmenten la vulnerabilitat dels edificis: voltes fines, grans obertures o torres esveltes.

L'avaluació de la vulnerabilitat després d'un sisme permet, a més de prendre les accions necessàries, establir les prioritats a l'hora d'intervenir i fins i tot, anticipar-se i fer accions de protecció preventives.

Aquesta última és l'opció més efectiva més efectiva en la conservació dels monuments històrics . Avaluar la seva vulnerabilitat permet predir el seu comportament durant un terratrèmol hipotètic, detectar els punts febles i així anticipar-se als possibles danys.

I aquest és precisament l'objectiu de la present tesi. Analitzar la vulnerabilitat de tres esglésies amb l'objectiu de detectar les possibles debilitats de les seves estructures davant l'activitat sísmica pròpia de la regió en la qual estan ubicades i determinar quin és el seu nivell de resistència davant un terratrèmol.

Es tracta d' tres tresors artístics i històrics, tres esglésies romàniques situades a Catalunya: Santa Maria de la Seu d'Urgell, Santa Maria de Vilabertran i l'església del Monestir de Santa Maria de Poblet.

Encara que la regió de Catalunya es caracteritza per una sismicitat moderada, les dues esglésies primeres es troben en la falla dels Pirineus, la zona de Catalunya amb més activitat sísmica i major risc de danys.

Fins i tot en una primera apreciació visual s'observen alguns danys indicadors dels punts febles, cosa que urgeix un estudi en profunditat.

L'anàlisi complet consta de dues parts: a la primera es calcula l'índex de vulnerabilitat, en la segona s'analitza el límit cinemàtic.

2 ESTAT DE L'ART

2.1 ESTUDI DE LA VULNERABILITAT SÍSMICA

La vulnerabilitat sísmica és una propietat intrínseca de l'estructura, una característica del seu comportament davant de l'acció del sisme. L'estudi de la vulnerabilitat sísmica, està condicionat pel tipus de dany que es vol avaluar i del nivell d'amenaça existent. El dany que resultant dependrà de la capacitat sismoresistent de l'estructura i de l'acció sísmica a que estarà sotmesa. La vulnerabilitat dependrà doncs de com es defineixin aquests dos conceptes. (9)

Es tracta d'esbrinar, a partir del coneixement de l'estructura, quin serà el seu comportament davant del succés. En aquest sentit calen, d'una banda, un coneixement previ de les condicions: l'edifici, els materials, el terreny i les condicions sísmiques de la zona, i de l'altra, un mètode que permeti deduir quina serà la seva resposta.

Hi ha diversos mètodes per dur a terme aquests estudis, i diferents classificacions. La classificació de Corsanero i Petrini divideix els mètodes segons els resultats que produeixen, però la que es farà servir i que s'adapta millor als mètodes emprats és la de Kappos, que els divideix segons la font d'informació en la que es basen els estudis. (9)

- Mètodes empírics: Es basen en l'experiència prèvia d'observació i estudi del comportament de diferents edificacions davant de sisme i en la caracterització de les seves deficiències potencials. Es caracteritzen per un alt grau de subjectivitat i es fan servir per avaluacions preliminars o quan el resultat que es busca es poc exigent.
    - Mètodes de categorització o caracterització: Segons la tipologia d'edifici, es classifiquen en classes de vulnerabilitat a partir de l'experiència en l'observació de com s'han comportat edificis similars davant de sisme. Un exemple d'aquest mètode és el proposat per la EMS-98 (10).
    - Mètodes d'inspecció i puntuació: Permeten arribar a caracteritzar les potencials deficiències sísmiques d'una edificació a partir dels diferents elements que la composen, atribuint valors numèrics a cadascun i ponderant-los després segons la seva importància relativa. Amb això s'obtenen els anomenats índex de vulnerabilitat. Com a mètode empíric, la seva eficàcia millora quan ha estat ajustat per a la zona i el tipus d'edifici que es vol estudiar. Un exemple és el mètode desenvolupat a la Guia per a l'avaluació i mitigació del

risc sísmic al patrimoni cultural, desenvolupada pel Ministeri de Cultura italià. (11)

- Mètodes analítics: A partir de les característiques de l'estructura, s'estima la resistència d'aquesta mitjançant models mecànics de resposta. Depenen per tant del grau de coneixement de l'estructura, de la sofisticació del model i de la precisió a l'hora de definir el possible esdeveniment sísmic. És un enfoc més complet i més costós de dur a terme, però permet una anàlisi més acurada.
- Mètodes experimentals: Les propietats de l'estructura es determinen a partir d'assajos dinàmics, generalment in situ. Permeten conèixer millor les característiques no només de l'edifici, sinó altres aspectes fonamentals com la interacció amb el sòl. Els resultats poden donar informació sobre l'estat de l'estructura després del sisme. Aquest tipus d'estudi es pot emprar com a complement dels anteriors, per millorar-ne la fiabilitat. (9)

2.2 LA MAÇONERIA COM A MATERIAL DE CONSTRUCCIÓ

Les tres esglésies analitzades estan fetes de maçoneria, amb diferències que s'assenyalaran en particular.

La maçoneria és un material compost, es tracta d'estructures de carreus de mides variables, units entre ells, en alguns casos, per morter. L'equilibri d'aquestes estructures s'assoleix per l'actuació de les forces de gravetat, tant de la pròpia estructura com aquelles derivades dels elements que s'hi recolzen.

La resistència a tracció és, en qualsevol cas, molt petita, i és donada principalment per la fricció entre els blocs de pedra (únicament, en el cas d'absència de morter); l'angle de fricció es troba entre els 30 i els 35º. És a dir, la interacció entre els diferents elements serà a través de forces de compressió, els elements de l'edifici estaran recolzats uns sobre els altres.

D'altra banda, i tot i que pugui semblar sorprenent tenint en compte la mida d'alguns dels edificis, aquestes forces de compressió no son massa grans, no massa en comparació a la resistència de la pedra, que acostuma a estar un ordre de magnitud per sobre de la compressió màxima a la que arriba a estar sotmesa, fins i tot a la base de l'estructura. (8)

En el cas de sotmetre aquest tipus d'estructures, el problema sorgeix en que es veuen exposades a acceleracions horitzontals que fan que hagin de respondre fora dels mecanismes per gravetat per als que van ser construïdes.

A més, en el cas de les esglésies, els murs acostumen a ser molt diàfans i no tenen els arriostraments laterals que proporcionarien els forjats de les plantes d'un edifici. I en el cas de les esglésies romàniques en particular, no compten amb elements de reforç exteriors com els arcbotants, que apareixeran més tard.

La Guia italiana assenyala dues dificultats més que presenten aquests tipus d'estructures: La impossibilitat de conèixer exactament les dades de disseny originals i els canvis que han anat patint, tant naturals com entròpics, i que la realització d'assajos per avaluar les característiques actuals és molt costosa i pot arribar a ser tan invasiva que no es pugui dur a terme. (1)

En qualsevol cas, a l'hora de calcular estructures de maçoneria, seguint la metodologia de la Guia que no considera les propietats específiques dels materials, i d'acord amb la bibliografia consultada, es compleixen les següents hipòtesis:

- La resistència a compressió dels elements individuals, és a dir, dels carreus, és infinita.
- La resistència a tracció és nul·la
- No hi ha lliscament entre els carreus

2.3 MÈTODE DELS ÍNDEX DE VULNERABILITAT

2.3.1 Antecedents i concepte general

Segons la classificació explicada, el mètode dels índex de vulnerabilitat és un mètode empíric d'inspecció i puntuació. En particular, el mètode que s'aplica és el de la Guia per a l'avaluació i mitigació del risc sísmic al patrimoni cultural, del Ministeri de Cultura italià (d'ara en endavant, la Guia). (1)

Aquesta Guia ha estat desenvolupada a partir de dos realitats que els ha permès acumular una gran quantitat d'informació: l'existència d'activitat sísmica continuada i el gran volum de patrimoni de què disposen, i respon a la necessitat de protegir-lo.

La ideal fonamental de la que parteix la metodologia és l'observació de que les esglésies presenten certs elements comuns i, plegades, tenen una resposta semblant davant de sisme. El seu desenvolupament, aleshores, en aquests conceptes: El comportament global de l'església es pot predir a partir de l'estudi del comportament dels diferents macroelements que la formen,

i a més, aquests macroelements son comuns entre les diferents esglésies i, per tant, es pot tabular un sistema que les engloba.

Com el mètode ha estat ajustat per a una situació molt concreta, presenta certes particularitats: Es refereix exclusivament a edificis de maçoneria, amb les seves característiques estructurals específiques, i contempla que en aquests edificis no només es important garantir la seguretat de les persones (estat límit últim) i la funcionalitat (estat límit de dany), sinó que considera el valor artístic del mateix edifici i del patrimoni que pugui contenir.

Un cop establert el sistema que permet l'estudi de la vulnerabilitat sísmica, hi ha una secció específica que ofereix una guia de possibles actuacions de reforç que es poden dur a terme si s'escau.

2.3.2 Metodologia d'aplicació del mètode dels índex de vulnerabilitat

2.3.2.1 Caracterització de l'acció sísmica

Per poder aplicar el mètode, en primer lloc cal definir l'esdeveniment sísmic. La guia es refereix als mateixos procediments que s'utilitzen a la normativa italiana, i remet a aquesta a l'hora de caracteritzar l'acció sísmica. Aquest pas s'explicarà amb detall al Capítol 2, seguint les normatives espanyola i europea.

A més de l'acció sísmica, és necessari conèixer el tipus de sòl. La propagació del sisme dependrà del substrat sobre el que estigui construïda l'església.

2.3.2.2 Coneixement de l'edifici

El grau de fiabilitat del model dependrà directament del grau de coneixement de l'edifici, és a dir, de la informació disponible sobre les dades de l'edifici i dels resultats de la recerca que es pugui dur a terme.

El procediment es divideix en les següents fases, tot i que s'ha d'entendre que son s'han d'aplicar cronològicament, sinó que ajuden a tenir un coneixement integral de l'estructura a estudiar:

- Identificació de l'edifici: Localització respecte d'àrees de risc, context urbà, identificació de condicionants que puguin alterar el nivell de risc, per exemple, la presència d'objectes de valor a l'interior.

- Caracterització geomètrica de l'edifici en l'estat actual: La descripció ha d'incloure la presència d'esquerdes i deformacions.
- Evolució de l'edifici a nivell constructiu: Des de la primera obra passant per les successives reformes fins arribar a l'estat actual
- Identificació dels elements resistents: Amb atenció particular a les tècniques constructives, detalls constructius i connexió entre els diferents elements.
- Identificació dels materials: Estat de decaïment i propietats mecàniques
- Coneixement de les fonamentacions: Possibles variacions que hagin esdevingut amb el temps i inestabilitats que hagin pogut sorgir

Un cop s'ha dut a terme aquest reconeixement, s'assigna un factor de confiança, que estima la fiabilitat de l'anàlisi estructural i de l'índex de vulnerabilitat.

Aquest factor pren valors entre 1 i 1,35, i es calcula depenent del tipus de model emprat a l'hora de fer l'anàlisi de vulnerabilitat:

- Per a models que tenen en compte la deformabilitat dels materials i dels elements estructurals, el factor de confiança s'aplica a les propietats dels materials.
- Per a models que consideren els elements de maçoneria com a sòlids rígids sense resistència a tracció, el factor de confiança s'aplica directament a la capacitat de l'estructura.

$$F_C = 1 + \sum_{k=1}^{4} F_{Ck} \qquad \text{Eq. 2.1}$$

On F_C és el factor de confiança i F_{Ck} són els factors de confiança parcials.

Geometric Survey	Material and Construction Survey	Mechanical Properties of the Materials	Terrain and Foundations
The Geometric survey has been completed $F_{C1} = 0.05$	limited survey of materials and constructive elements $F_{C2} = 0.12$	mechanical parameters deduced from available data $F_{C3} = 0.12$	limited survey of terrain and foundations, in absence of Geological data or availability of information about the foundation $F_{C4} = 0.06$
The Geometric survey has been completed along with the graphic rendering of cracking and deformities $F_{C1} = 0$	extensive survey of materials and constructive elements $F_{C2} = 0.06$	limited research of mechanical parameters of materials $F_{C3} = 0.06$	Geological data and information regarding the foundation structures is available; limited research on terrain and foundation $F_{C4} = 0.03$
	exhaustive survey of materials and constructive elements $F_{C2} = 0$	extensive research of mechanical parameters of materials $F_{C3} = 0$	extensive or exhaustive research on the terrain and foundation $F_{C4} = 0$

Figura 2.1 Valors dels factors de confiança parcials

2.3.2.3 Obtenció dels índex de vulnerabilitat i acceleracions dels estats límit

A diferència d'altres edificis amb més regularitat estructural, no és gaire significatiu assumir un comportament unitari a partir de certs paràmetres.

El sistema adoptat, doncs, per obtenir les acceleracions dels estats límit, és el dels índex de vulnerabilitat. A partir de dades recopilades en més de 4000 esglésies, s'estableix una relació entre els esdeveniments sísmics i els paràmetres de vulnerabilitat de les esglésies. Aquesta relació és purament estadística, i la mateixa guia recomana fer un estudi més detallat amb mètodes analítics per arribar a conclusions més acurades. Tot i així, destaca el valor de l'anàlisi amb índex de vulnerabilitat com a primera aproximació, a l'hora de definir quins poden ser els elements més sensibles i sobre els que s'hauria d'actuar primer, i com a mètode de comparació entre esglésies, per estimar quines tenen més risc.

Cada església s'estudia segons els macroelements que la formen, i, referits a aquests macroelements, als possibles mecanismes de fallida que s'hi poden donar.

Com a macroelements, la guia contempla els següents: façana, nàrtex, nau central, naus laterals, transsepte, cúpula, llanterna, absis i presbiteri, capelles, espadanya i campanar. No tots els elements han d'estar presents. Els 28 possibles mecanismes es poden observar a la Figura 2.2.

Per a cada mecanisme hi ha una llista d'indicadors de vulnerabilitat i de mesures antisísimiques. A l'hora d'avaluar l'estat actual, es tenen en compte les mesures que ja hi ha implementades, però la llista dona una idea de les possibles mesures que es podrien prendre, i una primera aproximació a com aquestes mesures millorarien la resistència local i global de l'edifici.

A més, i seguint les indicacions de la Taula 2.1, cadascun dels indicadors de vulnerabilitat i de les mesures antisísmiques han de ser valorats, segons quants n'hi hagi i la seva efectivitat.

Nombre d'indicadors de vuulnerabilitat/Nombre de mesures antisísmiques	**Efectivitat**	**v_{ki}/v_{kp}**
0	0	0
1≤	1	1
	2	2
	3	3
2≤	1	2
	2	3
	3	

Taula 2.1 Valoració dels indicadors de vulnerabilitat i de les mesures antisísmiques

Figura 2.2 Relació dels possibles mecanismes de fallida d'acord amb la Guia

El comportament sísmic del conjunt de l'església es representa, d'acord amb l'equació 2.2, a través d'un índex de vulnerabilitat, que pren valors entre 0 i 1, i que es defineix com el comportament ponderat de les seves parts.

$$i_v = \frac{1}{6}\frac{\sum_{k=1}^{28}\rho_k\left(v_{ki} - v_{kp}\right)}{\rho_k} \qquad \text{Eq. 2.2}$$

On i_v és l'índex de vulnerabilitat, v_{ki} és el valor dels indicadors de vulnerabilitat i v_{kp} és el valor de de l'indicador de mesures antisísmiques, d'acord amb la Taula 1. El valor de ρ_k és el pes atribuït al mecanisme. El valor de ρ varia entre 0 i 1: 0 és el valor quan el macroelement no està present, 1 és el valor per als macroelements que tenen una importància essencial en l'estructura principal de l'edifici, la guia especifica quins son, la resta de macroelements tenen un pes entre 0,5 i 1, el criteri que s'ha seguit per a assignar un valor és la possibilitat d'afectar a l'estructura principal en cas de fallida.

A partir de l'observació de l'estat de l'edifici, i considerant el mateix per a cada element que a l'hora de calcular l'índex de vulnerabilitat, es pot obtenir un índex de dany, que dona una idea de l'afectació actual que ja ha patit l'edifici. L'equació 2.3 també és empírica i ha estat obtinguda a partir de l'observació d'un gran nombre d'esglésies que han patit danys per sisme.

$$i_d = \frac{1}{5}\frac{\sum_{k=1}^{28}\rho_k d_k}{\rho_k} \qquad \text{Eq. 2.3}$$

On d_k és el dany que presenta cada element.

El criteri que s'ha seguit a l'hora d'avaluar el nivell de dany ha estat, d'acord amb (12) i com es veu a la Figura 2.3.

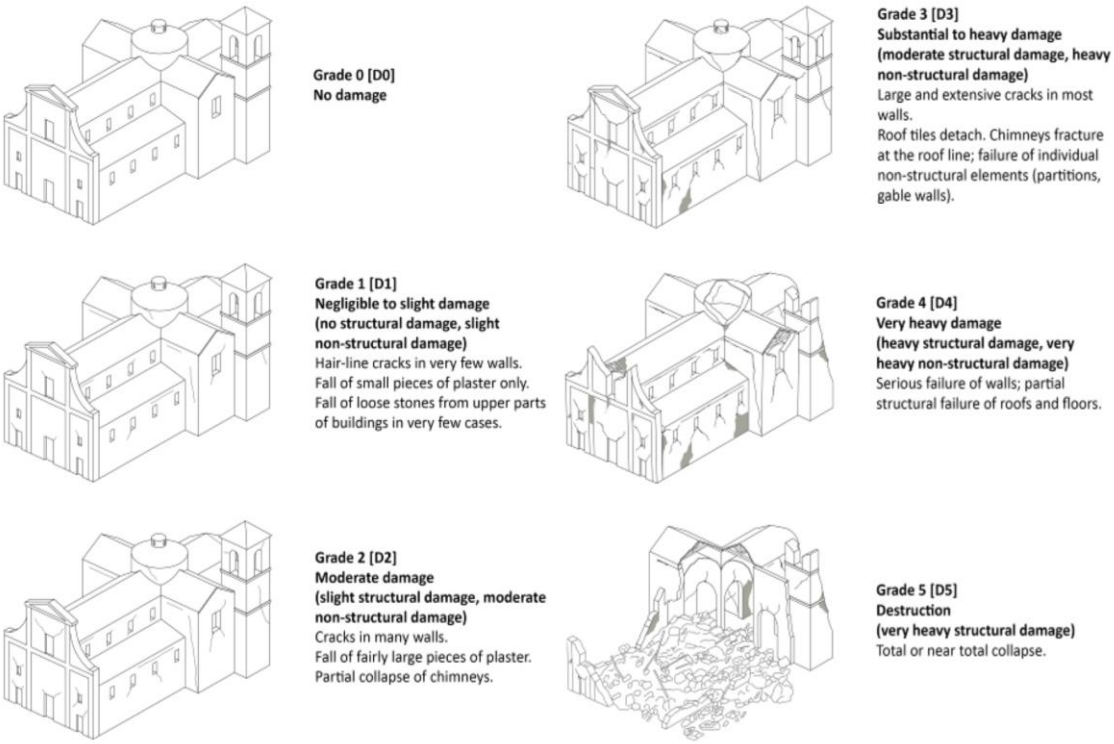


Figura 2.3 Valoració dels índex de dany

En particular, el criteri que s'ha seguit en aquest treball, donat que el dany no arribava a ser extens en cap cas, ha estat el següent:

0: en perfecte estat, sense esquerdes

1: esquerdes fines, sense afectació estructural

2: Esquerdes importants, poder afectar a l'estructura, però està en bon estat

3: Esquerdes importants, estructura afectada

A partir de l'anàlisi estadística és possible establir una correlació entre la vulnerabilitat de l'edifici i la magnitud de l'esdeveniment sísmic, és a dir, es poden calcular les acceleracions dels estats límit a partir dels índex de vulnerabilitat obtinguts.

$$a_{SLD} = 0{,}025 \cdot 1{,}8^{2{,}75-3{,}44 i_v} \qquad \text{Eq. 2.4}$$

$$a_{SLU} = 0{,}025 \cdot 1{,}8^{5{,}1-3{,}44 i_v} \qquad \text{Eq. 2.5}$$

On a_{SLD} és l'acceleració per a la qual s'assoliria l'estat límit de dany i a_{SLU} és l'acceleració per a la qual s'assoleix l'estat límit últim. L'estat límit últim correspon a l'acceleració a partir de la qual l'estructura col·lapsa o ofereix només una resistència residual molt feble i està en risc de col·lapsar. L'estat límit de servei és aquell que s'assoleix amb intensitats de sisme més baixes i que pot arribar a afectar la funcionalitat de l'edifici degut a les deformacions, o, en el cas del patrimoni, a malmetre elements de valor històric i artístic.

2.3.2.4 Corbes de fragilitat

Les corbes de densitat són un mètode que pot ajudar a predir què passaria en cas de sisme a partir de l'estudi fet amb els índex de vulnerabilitat i de dany. D'acord amb Matteis, Brando (13), i a partir de l'observació d'un gran nombre de mostres, el dany que pateixen tant els macroelements per separat com el conjunt de l'església, segueix una distribució binomial.

$$p_k = \frac{5!}{5!\,(5-k)!}\left(\frac{\mu_D}{5}\right)^k \left(1-\frac{\mu_D}{5}\right)^{5-k} \qquad \text{Eq. 2.6}$$

$$\mu_D = \frac{\sum_{j=1}^{n}\left[\frac{\sum_{i=1}^{m} d_{k,i}\rho_i}{\sum_{i=1}^{m}\rho_i}\right]}{n} \qquad \text{Eq. 2.7}$$

On p_k és la probabilitat de que el dany sigui igual a μ_D, i μ_D es calcula a partir dels valors del mètode dels índex.

Si el que volem es veure quina probabilitat d'ocórrer té un determinat nivell d'intensitat de sisme, es pot aplicar l'expressió obtinguda per Langomarsino (14), per a l'escala d'intensitat EMS08 (41).

$$\mu_D = 2{,}5\left[1 + tanh\left(\frac{I + 3{,}4375 i_v - 8{,}9125}{3}\right)\right] \qquad \text{Eq. 2.8}$$

On el valor i_v és el que s'ha obtingut amb el càlcul dels índex de vulnerabilitat.

Amb aquestes equacions es poden crear les corbes de fragilitat, en les que es pot observar la probabilitat d'assolir un cert nivell de dany per a un esdeveniment donat, o a l'inrevés, veure la intensitat sísmica necessària per arribar a un determinat nivell de dany.

Aquestes corbes faciliten la tasca de comparació entre esglésies proposada per la Guia, o permeten observar fàcilment com disminueix la vulnerabilitat de l'edifici amb una certa actuació.

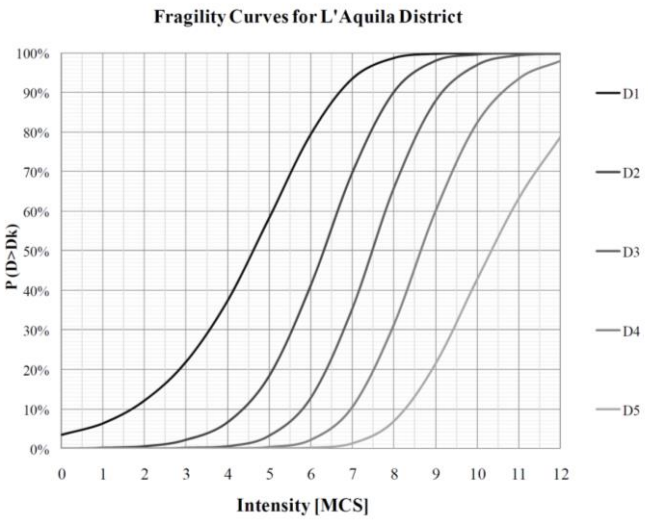


Figura 2.4 Exemple de corbes de fragilitat

2.4 ANÀLISI LÍMIT CINEMÀTICA

2.4.1 Antecedents i concepte general

En aquest cas, la guia que es segueix és la norma Tècnica de Construcció italiana, en la seva versió de 2019, que en el seu capítol setè s'ocupa específicament de la protecció davant l'acció sísmica. L'anàlisi estàtic no lineal es tracta en particular a la secció C 7.3.4.2 de la Circolare (en endavant, les referències a aquesta norma s'anomenaran Circolare). (15)

Aquest procediment es pot veure com el següent pas un cop s'ha fet un primer estudi a través del mètode dels índex de vulnerabilitat. Amb aquest s'han pogut determinar quins son els macroelements més sensibles a sisme de l'església.

Ara es tracta d'analitzar amb més detall aquests macroelements i d'esbrinar quin dels mecanismes serà el que primer li pot provocar la fallida. Amb aquest objectiu, s'analitzen els diversos macroelements de l'església: façana, campanar, capelles... I per a cada macroelement, els diferents mecanismes a través dels quals pot patir fallida. Per a cada macroelement, el mecanisme que li provocarà la fallida serà aquell amb l'acceleració d'activació més baixa.

Com s'ha dit, l'objectiu és arribar a obtenir l'acceleració d'activació dels diferents mecanismes, per poder-los comparar entre ells, i com a eina d'estudi de la vulnerabilitat sísmica.

Serà necessari triar els mecanismes a estudiar i disposar de mètodes que permetin caracteritzar l'acció sísmica i la capacitat de l'estructura. Els mecanismes a estudiar son els que proposa la Guia (Figura 2.2), que son els que s'ha observat en milers d'esglésies que poden provocar fallida. La caracterització de l'acció sísmica s'anomena espectre de resposta, la capacitat de l'estructura es modelitza amb les anomenades corbes de capacitat.

Un cop obtingudes les dues gràfiques es calcula el punt d'acompliment. El punt d'acompliment donarà el desplaçament al que arribarà el macroelement davant d'un esdeveniment sísmic donat.

Els mètodes per calcular els espectres de resposta, la corba de capacitat i el punt d'acompliment s'expliquen a continuació.

2.4.2 Metodologia d'aplicació del l'anàlisi límit cinemàtica

2.4.2.1 Espectre de resposta

En primer lloc, es caracteritza l'acció sísmica. Per a això, es disposa de dos normatives que ofereixen diferents mètodes de càlcul: La Norma sismoresistente espanyola, NCSE-02 i l'Eurocode 8. (16)(17)

Al NCSE02 es proposa la següent formulació:

L'espectre de resposta elàstica es calcula amb l'equació

$$S_a = \alpha(T) \cdot a_c \cdot \eta \qquad \text{Eq. 2.9}$$

On els valors a_c i α(T) es calculen amb les equacions 2.10 a 2.13. η és el factor d'amortiment, que s'explicarà amb detall més endavant. Per a un índex d'amortiment viscós del 5%, val 1.

$$a_c = S \cdot \rho \cdot a_b \qquad \text{Eq. 2.10}$$

$$Si\ T < T_A \rightarrow \alpha(T) = 1 + 1{,}5\frac{T}{T_A} \qquad \text{Eq. 2.11}$$

$$Si\ T_A \leq T \leq T_B \rightarrow \alpha(T) = 2{,}5 \qquad \text{Eq. 2.12}$$

$$Si\ T > T_B \rightarrow \alpha(T) = K \cdot \frac{C}{T} \qquad \text{Eq. 2.13}$$

On ρ és el coeficient d'importància de l'estructura, S és el coeficient d'amplificació del terreny (Annexe 1 i Secció 2.2, respectivament). K és el coeficient de contribució segons els sismes esperats (Annexe 1) i T_A i T_B son els períodes característics, que es calculen segons la Secció 2.4.

El codi europeu dona una formulació en quatre trams, definida a les equacions 2.14 a 2.18

$$a_g = \gamma_I \cdot a_{g,R} \qquad \text{Eq. 2.14}$$

$$Si\ 0 \leq T \leq T_B \rightarrow S_a(T) = a_g \cdot S \cdot \left[1 + \frac{T}{T_B}(2{,}5\eta) - 1\right] \qquad \text{Eq.2.15}$$

$$Si \rightarrow S_a(T) = a_g \cdot S \cdot 2{,}5 \cdot \eta \qquad \text{Eq. 2.16}$$

$$Si\ T_C \leq T \leq T_D \rightarrow S_a(T) = a_g \cdot S \cdot 2{,}5 \cdot \eta \cdot \frac{T_C}{T} \qquad \text{Eq. 2.17}$$

$$Si\ T_D \leq T \leq 4s \rightarrow S_a(T) = a_g \cdot S \cdot 2{,}5 \cdot \eta \cdot \frac{T_C \cdot T_D}{T^2} \qquad \text{Eq. 2.18}$$

Υ_1 , $a_{g,R}$ i S es troben a l'Anexe d'Espanya d'EC08, T_B, T_C i T_D son els períodes característics de resposta i es calculen també segons l'Annexe d'Espanya d'EC08.

Els resultats seran dues corbes en el pla Sa-T.

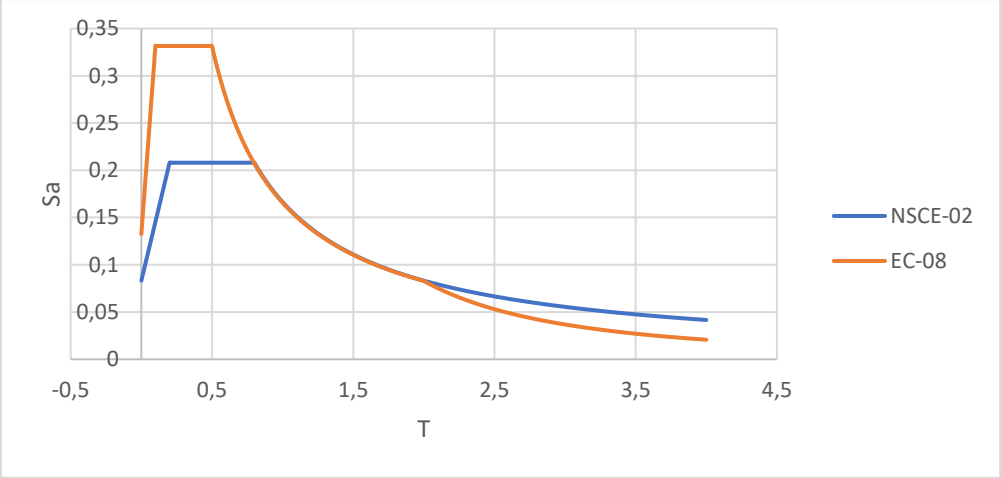


Figura 2.5 Corbes dels espectres de resposta segons NCSE-02 i EC08

Per transformar aquestes corbes a coordenades espectrals, és a dir, al pla Sa-Se, on Se son els desplaçaments espectrals, es fa servir l'equació 2.19. Els resultats es veuen a la Figura 2.6

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{d}{a}} \qquad \text{Eq. 2.19}$$

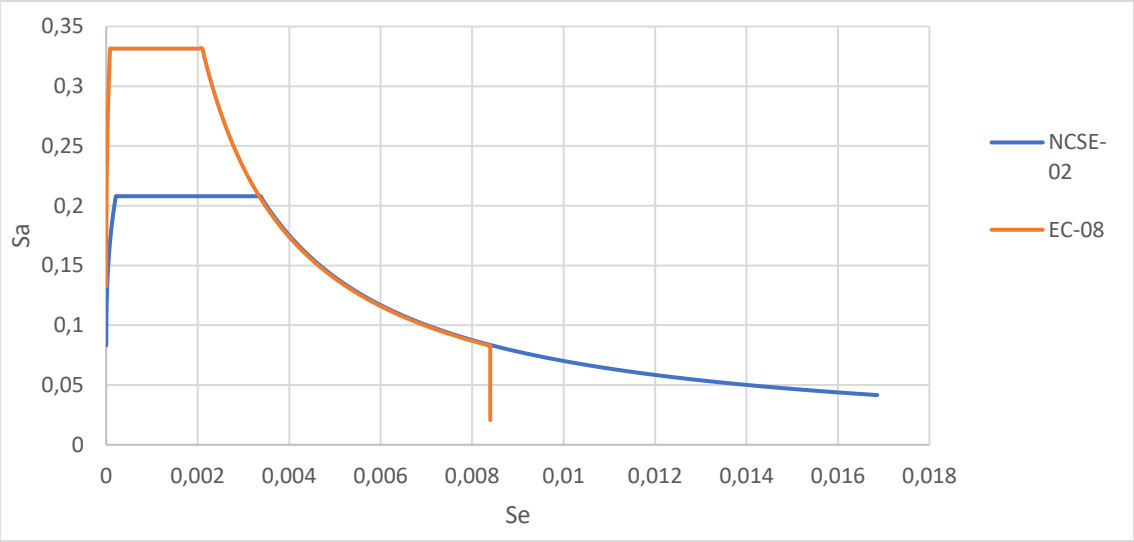


Figura 2.6 Espectres de resposta en coordenades espectrals

2.4.2.2 Corba de capacitat

La corba de capacitat mostra el comportament d'un macroelement davant d'un esdeveniment sísmic.

En condicions normals, l'element està sotmès a les càrregues habituals: el pes propi i aquelles que introdueixi la resta de l'estructura (pes propi d'altres elements que s'hi recolzin, tensions, desplaçaments diferencials, etc.). En cas de sisme, però, apareixeran una sèrie de forces degudes a l'acceleració horitzontal a la base de l'edifici que s'han de tenir en compte.

La idealització d'aquestes forces per poder introduir-les a l'esquema d'equilibri de l'element es fa de la següent manera: son forces horitzontals que actuen sobre cada massa considerada al macroelement, proporcionals a la càrrega introduïda per aquesta massa segons un factor α.

Amb aquest model es poden dibuixar corbes de capacitat per a qualsevol element d'una estructura: murs, arcs, voltes, etc., així com dibuixar la corba de capacitat de l'edifici sencer.

A la Figura 2.7 es mostra un esquema molt senzill de forces, on es veu el pes propi i com es considera l'actuació de la força sísmica sobre ell. La fletxa indica el sentit del bolcament. Es trobaran les expressions de la corba de capacitat per aquest exemple bàsic. La corba emprada als càlculs posteriors s'ha trobat de la mateixa manera, tot i que amb esquemes de forces més sofisticats, considerant per exemple la càrrega de la coberta a sobre del mur, o les forces horitzontals i verticals introduïdes per les voltes.

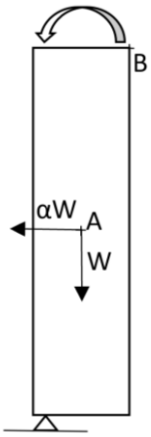


Figura 2.7 Esquema de forces amb pes propi i força sísmica

En un primer moment, quan el sisme comença, l'element té un comportament elàstic: El desplaçament de l'element és proporcional a l'acceleració i el període de vibració és contant.

En el cas dels murs, considerant la idealització de que puguin vibrar lliurement, el seu període de vibració es calcula com un oscil·lador lliure, segons l'equació 2.20.

$$T_0 = kH\lambda\sqrt{\frac{W}{Eg}} \qquad \text{Eq. 2.20}$$

On k és el coeficient de forma de l'element, que val 1 per a elements encastats i 6 per a voladissos. Els murs que vibren lliurement es considera que tenen un valor k=6. H és l'alçada del mur, λ l'esveltesa, W el pes propi, E el mòdul de Young del material i g la gravetat.

Un cop esgotat el comportament elàstic, comença el comportament no lineal. Apareixerà una ròtula sobre la que l'element començarà a girar, formant un mecanisme (Figura 2.7). El període de vibració de l'element deixa de ser constant i la relació entre acceleració horitzontal i desplaçament canvia: a mida que l'element gira sobre la ròtula les forces que afavoreixen el bolcament augmenten la distància a la ròtula i, per tant, el moment que generen, mentre que les forces que contraresten el gir generen menys moment. Llavors, l'acceleració necessària per a produir el desplaçament disminueix.

La ròtula no es trobarà a la làmina exterior de l'element sinó a una distància Δb d'aquesta, segons l'Eq. 2.21.

$$\Delta b = \frac{2N}{\sigma_C L} \qquad \text{Eq. 2.21}$$

On N son totes les forces verticals que actuen al mecanisme, σ_c és la resistència a compressió del material i L la longitud de l'element.

Si imposem igualtat de moments respecte a aquesta ròtula, es compleix l'Eq.2.22. s'arriba al mateix resultat si s'aplica el teorema dels treballs virtuals. Quan comença la rotació, els punts A i B es desplacen cap a munt i cap a l'esquerra, anomenem d_A i d_b als desplaçaments de cada punt, i t a l'espessor de l'element.

$$\alpha W\left(\frac{H}{2}+d_{Ay}\right)=W(\frac{t}{2}-\Delta b-d_{Ax}) \qquad \text{Eq. 2.22}$$

El desplaçament màxim de l'element serà sempre el del punt més elevat (B a la Figura 2.7), ja que la ròtula es troba a la base, és aquest punt el que es pren com a referència a l'hora de fer els càlculs. Els desplaçaments de cada punt del mur, A, per exemple, quan aquest gira sobre la ròtula, es poden expressar com a funció del desplaçament de B segons dos principis geomètrics: per semblança de triangles (Eq.2.2) i pel teorema de Pitàgores (Eq.24 i 2.25).

$$\frac{d_{Ax}}{d_{Ay}}=\frac{d_{Bx}}{d_{By}} \qquad \text{Eq. 2.23}$$

$$\sqrt{A_x^2+A_y^2}=\sqrt{(A_x-d_{Ax})^2+\left(A_y+d_{Ay}\right)^2} \qquad \text{Eq. 2.24}$$

$$\sqrt{B_x^2+B_y^2}=\sqrt{(B_x-d_{Bx})^2+\left(A_y+d_{By}\right)^2} \qquad \text{Eq. 2.25}$$

Operant amb les equacions 2.22 a 2.25 α en funció del desplaçament màxim de l'element (el del punt més alt). Ara és necessari transformar aquesta gràfica per poder comparar-la amb les dels espectres de resposta. La Circolare proposa les expressions per transformar la gràfica a coordenades espectrals per a un oscil·lador amb un sol grau de llibertat (15).

$$a=\frac{\alpha(d_B)}{e^{*}FC}$$

$$d=d_B\frac{\sum_{k=1}^{N}(W_k+Q_k)d_{WQx,k}^2}{d_{Bx}\sum_{k=1}^{N}(W_k+Q_k)d_{WQx,k}}$$

$$e^* = \frac{\left(\sum_{k=1}^{N}(W_k + Q_k)d_{WQx,k}\right)^2}{\left(\sum_{k=1}^{N}(W_k + Q_k)\right)\left(\sum_{k=1}^{N}(W_k + Q_k)d_{WQx,k}^2\right)}$$

On Q és el pes d'elements que actuen sobre el que s'ha considerat i FC és el factor de confiança del coneixement de l'estructura (Eq. 2.1).

La corba de capacitat resultant té l'aspecte de la Figura 2.8. L'acceleració que activa el mecanisme és la intersecció entre les branques elàstica i no lineal. Pot semblar que la branca descendent també és lineal a la Figura 2.8, això és degut a les idealitzacions que s'han fet i al comportament rígid de l'element, una corba de capacitat calculada amb més realista tindria l'aspecte de les corbes de les figures 9 i 10.

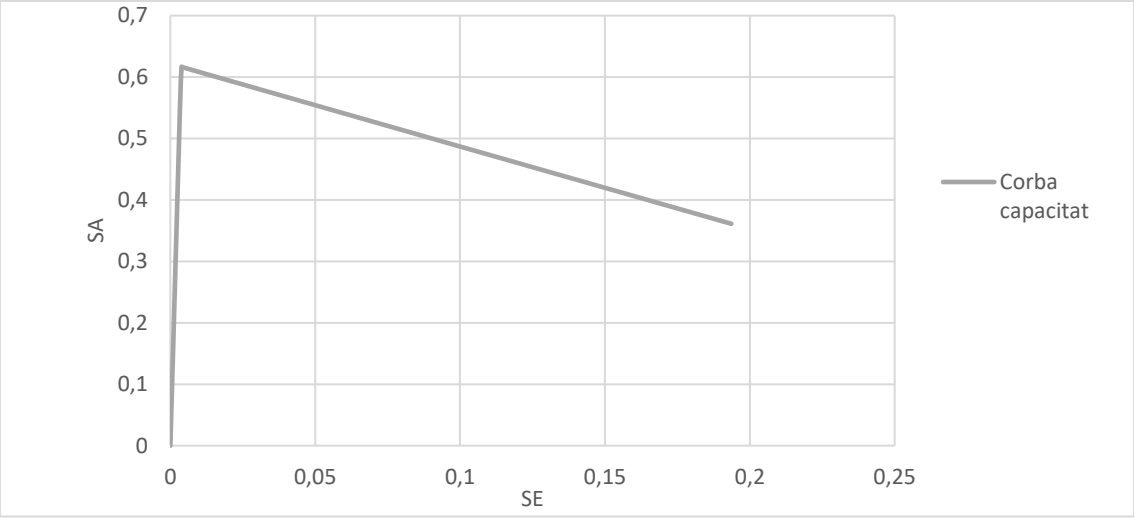


Figura 2.8 Exemple de corba de capacitat

2.4.2.3 Punt d'acompliment

El punt d'acompliment es defineix com l'acceleració i desplaçament que pateix un macroelement quan es sotmès a una determinada acció sísmica.

L'obtenció d'aquest punt depèn de si es troba a la branca elàstica o a la branca no lineal de la corba de capacitat.

A la branca elàstica, la resistència de l'element i l'acció sísmica son independents, i per tant, el punt d'acompliment serà la intersecció entre les dues corbes. En canvi, un cop activat el mecanisme, el període de vibració de l'element augmenta, dissipa part de l'energia sísmica i es produeix un amortiment, és a dir, hi ha dependència entre els dos successos i el punt d'acompliment ja no és la intersecció de les corbes sinó que es calcula amb els mètodes

específics. La Circolare proposa dos mètodes per calcular aquest punt. Els mètodes consisteixen a substituir una de les corbes, l'espectre de resposta o la corba de capacitat, per una corba modificada que considera l'efecte d'amortiment, i trobar la intersecció amb l'altra corba, que roman igual.

Mètode A: Igualtat d'energia

En aquest cas la que es modifica és la corba de capacitat. La corba original es substitueix per una corba bilineal que compleix el següent: la diferència entre les àrees compreses per sobre de la corba original i la corba bilineal i les àrees compreses per sota és zero (Figura 2.9).

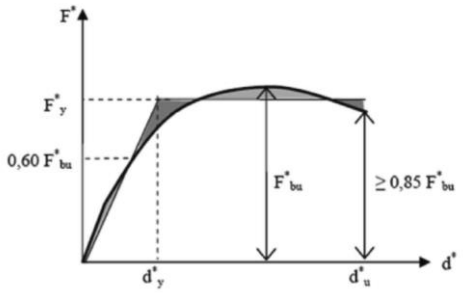


Figura 2.9 Transformació de la corba de capacitat

En funció del valor del període de vibració en la branca elàstica, T_0, ens trobarem en un d'aquests casos (Figura 2.10)

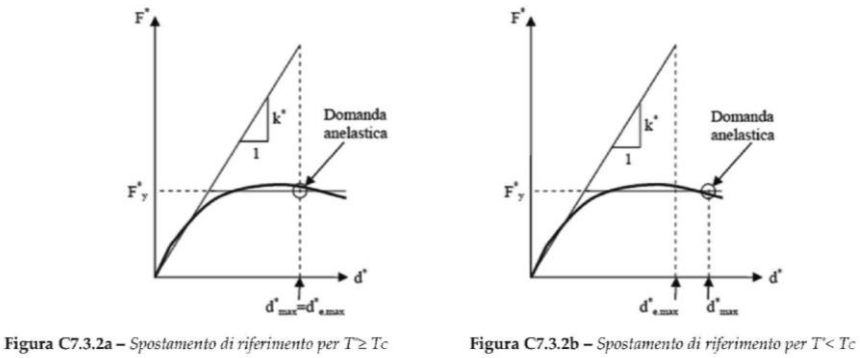


Figura 2.10 Possibles punts d'acompliment segons el valor de T_0

El desplaçament del punt d'acompliment es troba segons les expressions 2.26 a 2.28.

$$Si\ T_0 > T_C \rightarrow d_{max} = d_y \qquad \text{Eq. 2.26}$$

$$d_{max} = \frac{dy}{q}\left[1 + (q-1)\frac{T_C}{T_0}\right] \qquad \text{Eq. 2.27}$$

$$q = \frac{S_{amax}}{a_y} \qquad \text{Eq. 2.28}$$

On T_c és el període característic del límit de la branca constant de l'espectre de resposta i d_y és el desplaçament que activa el mecanisme de la corba de capacitat.

Mètode B: Mètode de l'espectre de capacitat

En aquest cas, és la corba de l'espectre de resposta la que es modifica. El punt d'acompliment es trobarà com a la intersecció entre la corba de capacitat original, i l'espectre de resposta reduït.

Per a trobar aquest espectre reduït es segueix un procés iteratiu, que es continuarà fins a assolir la tolerància desitjada.

Per trobar les iteracions, es tracta de trobar el paràmetre ξ d'amortiment corresponent al desplaçament del punt d'acompliment. Per a la primera iteració, es pot prendre el desplaçament del punt d'intersecció entre l'espectre de resposta original i la corba de capacitat, i la seva acceleració corresponent (2.29 i 2.30)

$$\xi^1 = k\frac{63{,}7\left(a_y d_0 - a_0 d_y\right)}{a_0 d_0} + 5 \qquad \text{Eq.2.29}$$

$$\eta^1 = \sqrt{\frac{10}{\xi^1 + 5}} \qquad \text{Eq.2.20}$$

On els números dels coeficients indiquen el nombre de la iteració. L'espectre de resposta reduït es troba quan es multiplica per η

Aquesta nova corba proporcionarà un nou punt d'acompliment en la seva intersecció amb la corba de capacitat. Es seguirà aquest procés successivament fins que es s'arribi a la tolerància desitjada.

$$|d_{max}^{n} - d_{max}^{n-1}| \leq tol_d \qquad \text{Eq. 2.21}$$

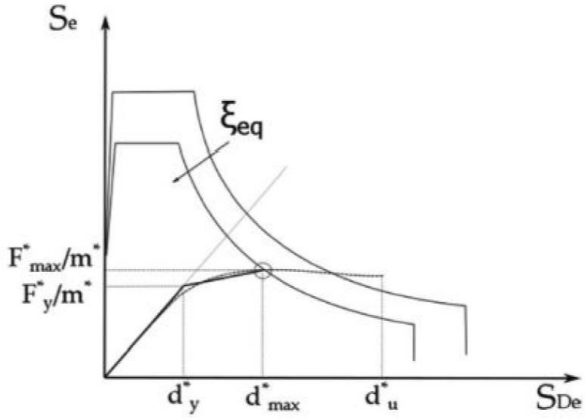


Figura 2.11 Mètode B per obtenir el punt d'acompliment

2.4.2.4 Nivells de dany

Un cop realitzats els càlculs amb els procediments que s'han explicat, és interessant veure quins seran els nivells de dany assolits per cada element si se'l sotmet a l'esdeveniment sísmic que hem representat amb els espectres de resposta.

El codi italià recomana interrompre la corba de capacitat per a una acceleració última igual a 0,85 vegades l'acceleració que activa el mecanisme, a_y (equació X). Aquesta acceleració última es trobarà a la branca no lineal i es considera que és l'acceleració que provocaria el col·lapse de l'element.

$$a_u = 0{,}85 a_y \qquad \text{Eq. 2.22}$$

Observant la corba de capacitat, podem obtenir el desplaçament últim corresponent a aquesta acceleració, és a dir, obtenir el desplaçament del límit de col·lapse o límit últim (D_4, D_u). Per analitzar els nivells de dany que assolirà l'element, es pot situar el punt d'acompliment dins dels rangs que proposa el projecte Risk-UE. (18)

Displacement Demand	Damage Grade	Damage Description
$S_d < 0,7D_y$	D_{s0}	No Damage
$S_d \geq 0,7D_y$	D_{s1}	Slight Damage
$S_d \geq D_y$	D_{s2}	Moderate Damage
$S_d \geq D_y + 0,25(D_u - D_y)$	D_{s3}	Severe Damage
$S_d \geq D_u$	D_{s4}	Extensive Damage to Collapse

Figura 2.12 Nivells de dany assolits segons Risk UE

A la Figura 2.12, D_y es refereix al desplaçament d'activació del mecanisme i D_u al desplaçament a l'acceleració última de l'Eq. 2.22.

A la taula podem observar que el dany comença abans que l'activació del mecanisme, quan aquest encara es troba a la branca elàstica. És remarcable que un cop activat el mecanisme el dany és com a mínim, moderat.

3 APROXIMACIÓ ALS CASOS ESTUDIATS

3.1 EL ROMÀNIC A CATALUNYA

3.1.1 Preromànic (finals del segle IX a inicis del segle XI)

En aquesta època, els comptats del nord de Catalunya formaven part de l'Imperi Carolingi, amb el qual van compartir desenvolupament i context històric, i és d'aquí d'on ve la influència artística. En un primer moment, però, l'imperi es va enfrontar a una dura resistència local, tot i que amb el temps, les seves estructures de poder es van anar assimilant i fusionant amb el poder local.

Se sap poc de la tradició arquitectònica anterior al segle X, tot i que a la resta d'Europa sí que es conserven edificis monumentals de l'època. A la segona mitad del segle X, però, els comptats catalans gaudeixen d'estabilitat i creixement econòmic que fomenten el primer impuls constructiu.

Aquesta etapa es caracteritza per l'ús de tècniques que es venien emprant, de tradició romanovisigòtica (sostres de fusta, murs encofrats, arcs ultrapassats, etc) i la introducció de tipologies i estils d'origen carolingi.

Figura 3.1 Carreuons de petites dimensions i arcs ultrapassats, Sant Miquel de Cuixà

Les principals novetats introduïdes son, d'una banda, una de caire estilístic: el creixement del sector oriental de l'església i l'evolució monumental dels altars, i de l'altra, una de caire tecnològic: la utilització del carreu de pedra de petites dimensions com a element base de la construcció. Aquesta última permet l'ús de pedres dúctils, fàcils de tallar, no requereixen grans especialistes ni processos complexos, no és necessari importar els materials ni explotar grans pedreres. Tot i així, amb aquests carreus es poden aixecar grans edificis de manera ràpida i barata. El resultat son edificis harmònics i homogenis, murs uniformes i voltes de pedra. (5)(6)

3.1.2 El primer romànic (segle XI)

Un dels principals impulsors d'aquest nou model és el bisbe abat Oliba, de la família comtal de la Cerdanya. Aquest primer romànic presenta una gran diversitat tipològica i riquesa de matisos, malgrat les característiques comunes de l'ús del carreu petit com a element fonamental i de certs recursos decoratius.

Obres vinculades a l'abat Oliba son l'església del Monestir de Sant Miquel de Cuixà, l'església del Monestir de Santa Maria de Ripoll i la catedral de Vic, de la que es conserven el campanar i la cripta. Son també d'aquest període les antigues catedrals de Girona, de la qual es conserva només la torre, i de Barcelona, consagrada l'any 1058, de la que no en queda pràcticament cap resta. Altra de les grans catedrals catalanes del moment degué ser la de la Seu d'Urgell, promoguda per bisbe Sant Ermengol, i substituïda després al segle XII per l'edifici que ens ha arribat fins avui. D'aquest conjunt només queda l'església actualment dedicada a Sant Miquel, al costat meridional del claustre.

Figura 3.2 Campanar romànic de la catedral de Vic

Com s'ha dit, les característiques son variables, però generalitzant, presenten àmplies naus, en general úniques, però en els cas de conjunts monumentals importants, n'hi ha tres, i planta pràcticament quadrada, amb voltes de pedra. Sovint estan rematades per grans torres de campanar. A més, es va refinant el nivell de decoració dels murs, primer amb talles i després amb decoració pictòrica.

Aquesta diversitat en les formes i les solucions anirà donant pas, cap a la segona meitat del segle XI, a construccions més compactes. En l'àmbit territorial, aquest model es va extenent cap al sud i comencen a aparèixer mostres a la zona del Penedès. Les noves tècniques no només es fan servir en edificis religiosos, també en castells i palaus. (5)(6)(7)

3.1.3 Romànic ple (segle XII)

A finals del segle XI l'evolució del romànic es coneix en diferents aspectes: d'una banda, la importància que ha assolit la decoració mural, i de l'altra, l'adopció del carreu escairat com a element constructiu base, gràcies a la progressiva especialització del picapedrers, i com ja es venia fent a la resta d'Europa.

Figura 3.3 Exemple de mur de carreu escairat. La Seu d'Urgell

Un bon exemple d'aquesta evolució és precisament l'església canònica de Vilabertran: presenta una gran torre i està majorment construïda amb carreuó, però comença a tenir elements, com la pròpia torre, construïts amb carreu escairat. Aquesta pràctica de les grans torres es manté durant el segle XII i és una de les característiques de les famoses esglésies de la Vall de Boí.

Altre aspecte destacat de l'evolució és la homogeneïtzació de les plantes: en forma de creu llatina, amb grans transseptes i absis triples. A les cobertes predomina la volta de canó de pedra.

L'altra innovació és la introducció de l'escultura com a principal element decoratiu. No només a les noves construccions, s'afegeixen portades esculpides a esglésies ja existents.

Figura 3.4 Detall de decoració escultòrica. Sant Pere de Besalú

Potser l'edifici més emblemàtic d'aquesta època és la catedral de Santa Maria de la Seu d'Urgell. Substitueix a una catedral anterior del segle XI. Presenta les característiques que s'han comentat: planta de creu llatina i cobertes de pedra, però conté també elements únics d'influència italiana, com són la façana occidental i la galeria oberta de l'absis. (5)(6)(7)

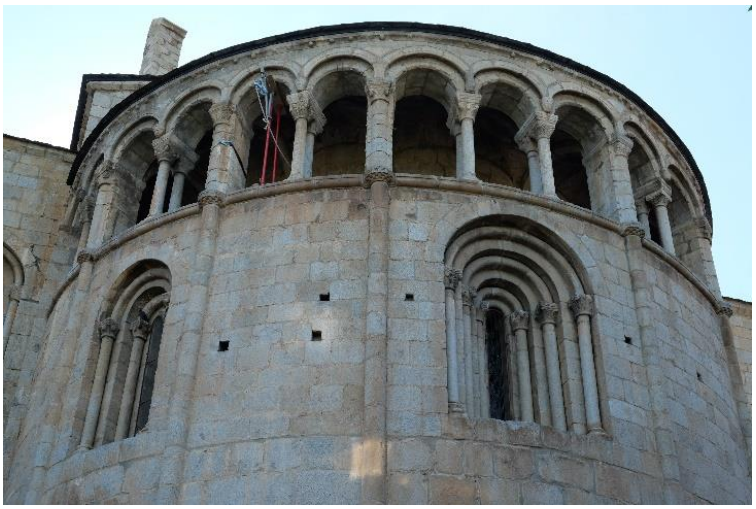


Figura 3.5 Galeria de l'absis de Santa Maria de la Seu d'Urgell

3.1.4 Romànic tardà (des del segle XII als segles XIV i XV)

Aquesta àpoca es caracteritza per un manteniment de les formes i estructures del romànic, a sobre de les quals es van introduint elements del gòtic, més que haver-hi un estil de transició.

Com a evolució del romànic anterior, s'utilitza la volta de canó apuntat, tot i que encara no és l'arc apuntat pròpiament gòtic.

Geogràficament, les obres es van desplaçant cap al sud, a la Catalunya Nova, a mida que es conquereixen territoris abans dominats pels musulmans.

Les grans construccions d'aquest període son les catedrals de Tarragona i Lleida i els grans conjunts cistercens del segle XIII: Santes Creus, Vallbona de les Monges i sobre tot, Santa Maria de Poblet.

La Seu Vella de Lleida és un exemple paradigmàtic d'aquest moviment: la planta és romànica amb tres naus en forma de creu llatina i un transsepte espaiós, però les voltes son gòtiques de creueria. A Poblet també es pot observar aquesta dualitat: planta llatina i volta de canó apuntat, romànics, i volta de creueria gòtica a les naus laterals. (5)(6)

Figura 3.6 Volta de creueria a les naus laterals, arc de mig punt al transepte, Poblet

3.2 SISMICITAT A CATALUNYA

3.2.1 Context geodinàmic

L'activitat sísmica a Catalunya és deguda a la col·lisió de les plaques Euroasiàtica i Africana, que limiten al Mediterrani occidental. Aquest fenomen, on acumula matèria, és responsable de l'origen dels Pirineus, i on l'escorça s'aprima, de l'obertura del solc de València. És una zona d'activitat sísmica difosa i moderada. (2)

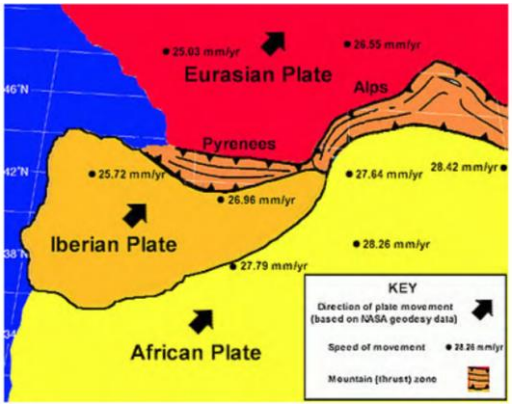


Figura 3.7. Distribució de les plaques tectòniques

Dins Catalunya, l'activitat sísmica es concentra als Pirineus, especialment a la part central i occidental, on presenta força regularitat temporal; a la serralada costanera i el litoral, i, en menor mesura, a la zona muntanyosa dels Ports i les Serres de Cardó, al sud oest.

Als Pirineus orientals, tot i que l'activitat és més difosa, és on es van produir els esdeveniments sísmics del segle XV. Això pot suggerir que és una zona de baixa probabilitat sísmica però on s'ha de considerar el risc d'esdeveniments aïllats de gran intensitat. (2)(3)

3.2.2 Terratrèmols històrics

Amb diferència, els esdeveniments sísmics més importants dels que es te coneixement son els terratrèmols dels segles XIV i XV. Tot i que hi ha dades anteriors, és en aquesta època que comencen a ser fiables. (2)(4)

Aquests son:

- El terratrèmol del 3 de març de 1373, a la Ribagorça, amb intensitat epicentral VIII-IX (escala MSK).
- La crisi de 1427-1428: A la Selva, durant el març de 1427 (hi va haver diversos events sísmics), d'intensitat epicentral VIII-IX; el 15 de maig de 1427 a Olot, amb intesistat epicentral IX, i el 2 de febrer de 1428 al Ripollès, també amb intensitat epicentral ed IX i que va produir més de 1000 morts.
- El 24 de maig de 1448 al Vallès Oriental, amb intensitat epicentral VIII.

Més recentment, els terratrèmols més importants han estat:

- El 19 de novembre de 1923 a la Vall d'Aran, amb intensitat epicentral VIII va produir danys greus.
- El 12 de març de 1927 al Montseny, amb intensitat epicentral VII, també va ocasionar danys importants.

En els últims anys hi ha hagut events que han arribat a superar la intensitat IV i s'han sentit àmpliament al territori, però cap ha ocasionat danys importants.

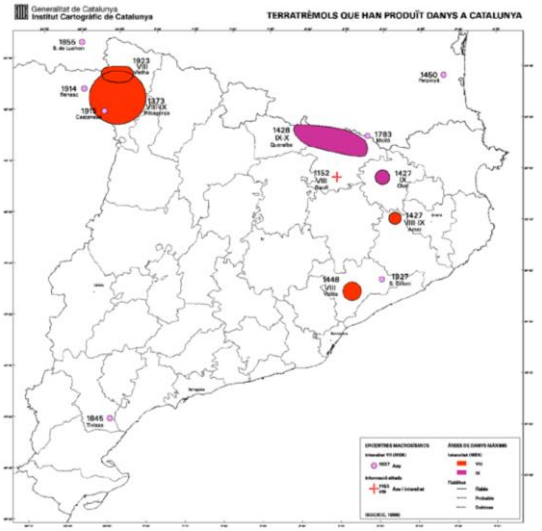


Figura 6. Terratrèmols que han produït danys a Catalunya. Vermell: àrees amb danys d'intensitat VIII; porpra: àrees amb danys d'intensitat IX (SGC/ICC 1996).

Figura 3.8. Terratrèmols que han produït danys a Catalunya

3.3 ESGLÉSIA DEL MONESTIR DE SANTA MARIA DE POBLET

3.3.1 Situació

El monestir de Poblet és un conjunt arquitectònic a la falda nord de les muntanyes de Prades. Es troba a la provincia de Tarragona, Comarca de la Conca de Barberà i municipi de Vimbodí i Poblet. És l'únic monestir de Catalunya que té el títol de Patrimoni de la Humanitat.

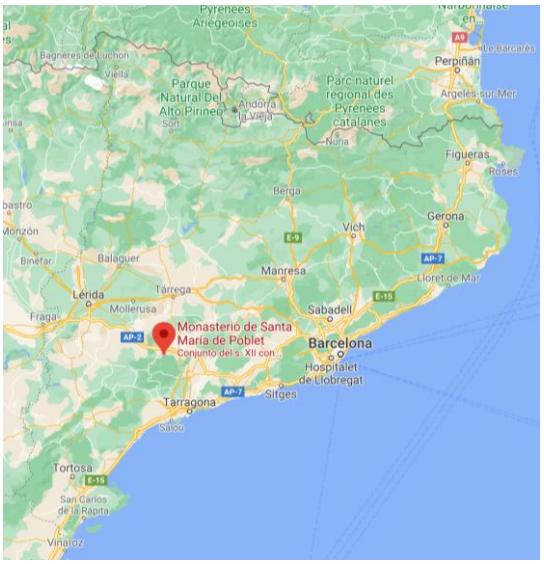


Figura 3.9 Situació de Poblet a Catalunya

3.3.2 Tipus de sòl

D'acord amb el mapa de classificació de sòls de l'ICC (19), el sòl de la zona está format per dipòsits de meteorització de roques de diferent litologia. És de moderadament profund a molt profund, ben drenat, amb textures mitjanes o moderadament fines i un abundant contingut d'elements grossos. Els elements grossos mostren revestiments argilosos i de carbonat càlcic.

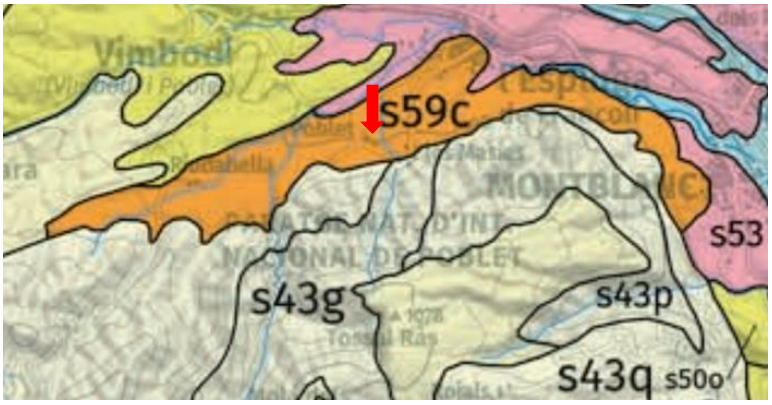


Figura 3.10 Mapa del sòl a Poblet

3.3.3 Història

El monestir de Poblet comença la seva historia l'any 1150 quan Ramon Berenguer IV, aleshores Comte de Barcelona, va fer la donació dels territoris a l'abadia francesa de Fontfroide, de l'ordre del Císter. La construcció de l'església comença vint anys després, el 1170 (31).

En primer lloc s'erigeix la banda est, l'absis amb el deambulatori i les capelles que el rodegen, aquesta fase acaba el 1196. En una fase posterior el segueixen el transsepte i les naus, primer les laterals i després la nau central, reforçada amb arcs feixons. La construcció del cos principal finalitza el 1276 (33)(34).

Al llarg del segle XIII es van afegint els elements que més a veure amb la funció monàstica: els dormitoris, la sala capitular, el claustre, etc. La galilea que cobreix part de la façana finalitza a finals del segle XIII (31)(34). Les obres del monestir finalitzen durant l'abadiat de Ponç de Copons (1316-1348), època en la gosa de gran prosperitat. De fet és en aquest moment que Pere el Cerimoniós ordena crear el panteó real (1340). Durant el seu regnat finalitzen les obres de la muralla (31)(33).

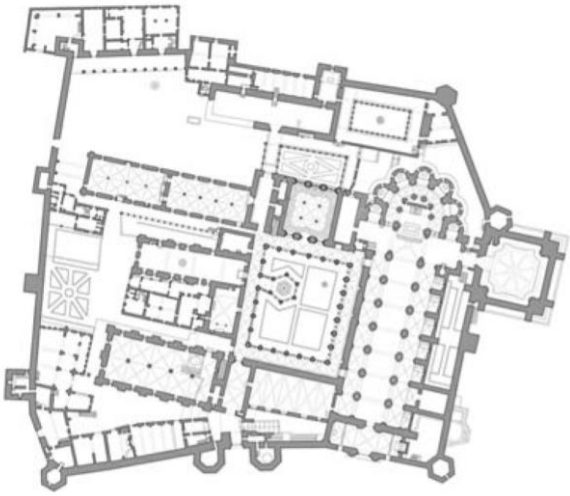


Figura 3.11 Planta del conjunt monàstic de Poblet durant el regnat de Pere el Cerimoniós (33)

Es també durant l'abadiat de Copons que es tomba el mur de la nau sud per afegir les capelles. És molt probable que aquesta acció fos motivada per la gran quantitat de donacions dels nobles del moment, no pas per motius de problemes amb l'estabilitat de l'estructura (34). El cimbori és va afegir al conjunt més tard, al segle XV.

L'esquerda de la nau central està documentada des de 1652, tot i que no se'n coneix ben bé l'origen, una de les possibilitats és que fos provocada per l'incendi de l'orgue i la selleria el 1575 (33).

Altres esdeveniments que va afectar a l'estat de l'estructura foren el gran terratrèmol de 1792 i l'incendi del cor i l'orgue de 1822. Entre 1823 i 1830 s'afegeixen els arcbotants de la banda sud de la nau central, segurament per ajudar a estabilitzar la ja anomenada esquerda de la nau

central. El 1835 pateix un altre incendi important i comença l'exclaustració més llarga. És una època nefasta per a la conservació de l'edifici, a partir de la desamortització de Mendizábal. L'església i el cenobi romanen abandonats i pateixen saquejos i robatoris successius. Les terres fins i tot surten a la venda el 1847 (32)(33)(34).

Hi ha un primer impuls per a recuperar el monestir amb la creació del Real Patronatge de Poblet el 1930, però amb l'esclat de la Guerra Civil l'església i el panteó tornen a ser saquejades. El gran avanç en la recuperació del conjunt es produeix amb el retorn dels monjos el 1940. A partir d'aquí es van fent reformes i millores successives: el cimbori, la llibreria, el palau abacial i la sagristia (32). El 1991 el monestir és declarat Patrimoni de la Humanitat.

Reformes més recents han inclòs a utilització de tirants de ferro per contrarestar l'aparició de fissures, però amb el temps s'ha observat que aquesta actuació ha estat contraproduent, ja que la corrosió d'aquests elements resulta nociva per als materials originals (33).

3.3.4 Geometria

Aquest apartat només comprèn la descripció de l'església, no es parla de la resta del conjunt monàstic. Actualment, la planta i la secció longitudinal son com s'observa a les Figures 3.12 i 3.13.

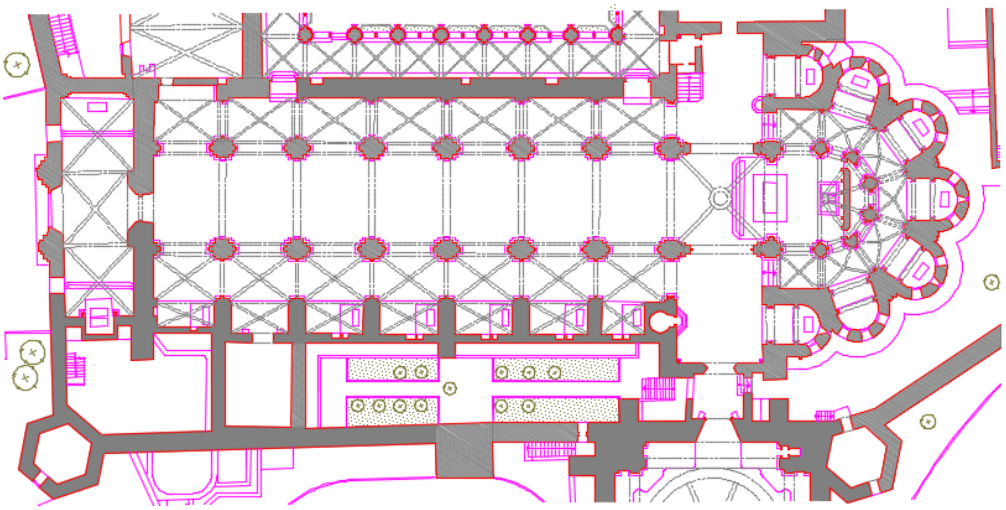


Figura 3.12 Planta església de Poblet

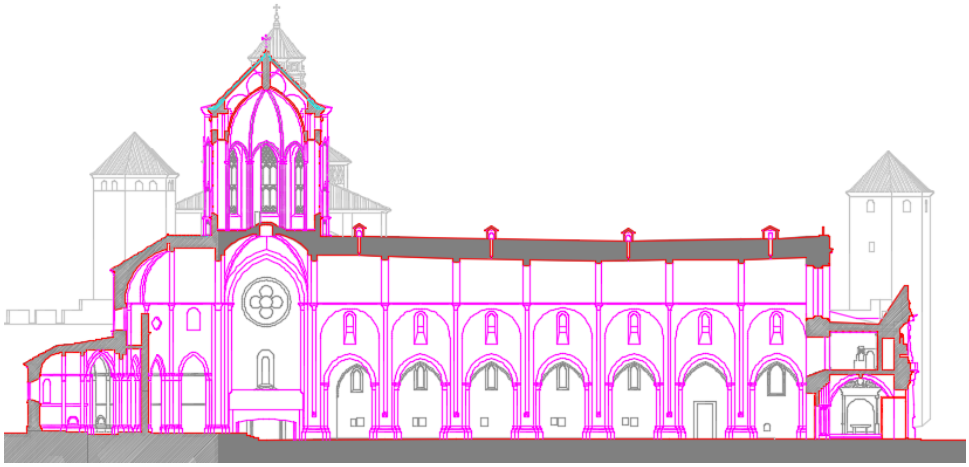


Figura 3.13 Secció longitudinal de l'església de Poblet

Com es pot observar, és una planta en creu llatina amb tres naus: nau central i dos naus laterals. Segueix les característiques d'altres obres del Císter, més diàfan que altres obres de l'època. L'estil no és purament romànic sinó que presenta elements romànics, com és el tipus de planta i la volta de la nau central, que tot i ser apuntada encara pertany a aquest estil, i elements gòtics, com son la presència de voltes de creueria a les naus laterals i a les capelles de la nau sud, del deambulatori i del creuer (5).

És una església de grans dimensions, 86m de llargària per 36m d'amplada, l'alçada de la nau central és de quasi 20m. Els arcs de les voltes de les naus laterals i de les capelles són molt més alts que el de la nau central, coincidint amb el canvi d'estil arquitectònic.

La nau està dividida en set trams, cadascun amb la seva capella. Hi ha dues sortides a la banda nord que donen al claustre, i una a la banda sud que dona accés a l'antic cementiri dels monjos.

El material de construcció de la part resistent de l'estructura és pedra calcària, present a les pedreres de la zona. Després d'una inspecció de la coberta el 2012 es va constatar que el material de replè sobre la volta de la nau central està composat per una capa de material de sòl de 0,9m i una capa a sobre de 0,65m de morter amb fragments petris. Els dos components del replè presenten baixes característiques mecàniques (34).

No es té informació específica sobre el replè a sobre de les naus laterals ni sobre els detalls constructius i la morfologia dels murs. Es creu que, per comparació amb altres obres de l'època i exemples en altres edificis del conjunt, els murs son de tres capes amb runa com a material de replè (34).

3.3.5 Estat de conservació

A la Figura 3.14 podem observar un esquema dels danys que s'observen a l'estructura.

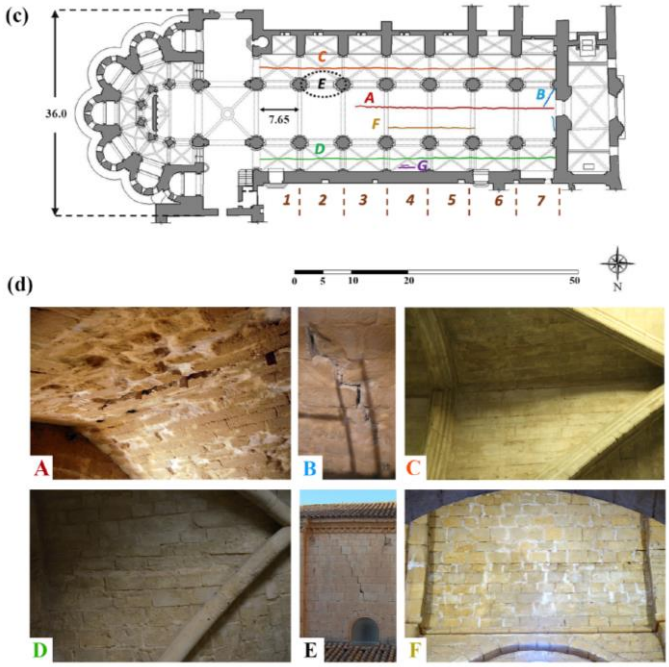


Figura 3.14 Danys presents a l'església de Poblet (36)

Com es pot apreciar, els elements més danyats son les naus, tant la nau central com les naus laterals. Com s'ha comentat, la mesura dels tirants metàl·lics per actuar contra les esquerdes a les voltes malauradament ha provocat el deteriorament del material petri (33)(35).

La nau central presenta una gran deformació, el descens de la clau és d'aproximadament uns 50cm. Saloustros proposa que aquest desplaçament és degut al gir excèntric dels murs de la nau central, que té molt puc suport extern ja que les naus laterals son baixes . En particular, s'han mesurat desplaçaments de 14cm a la banda sud i 10cm a la banda nord (35).

L'esquerda que recorre la volta central, de la que s'ha parlat a l'apartat 3.3.3 perd amplada a mida que s'allunya de la façana. A les hipòtesis de que l'esquerda va ser provocada pels incendis o el terratrèmol de 1972, Saloustros afegeix la possibilitat que vingui donada per aquest gir excèntric dels murs (33)(35). Les naus laterals també presenten esquerdes longitudinals, la nau nord ha estat reparada.

Les esquerdes diagonals de la volta de la nau central poden ser resultants dels esforços de tallant deguts al terratrèmol, o per poca compatibilitat mecànica entre la volta i la façana.

3.4 CATEDRAL DE SANTA MARIA DE LA SEU D'URGELL

3.4.1 Situació

La Catedral de la Seu d'Urgell és l'única plenament romànica de Catalunya. Al nucli urbà de la Seu d'Urgell, ciutat situada al bell mig del Pirineu, al nord-oest del Parc del Cadí i al sud-est del Parc Nacional d'Aigüestortes. A la província de Lleida, la Seu d'Urgell és la capital de l'Alt Urgell.

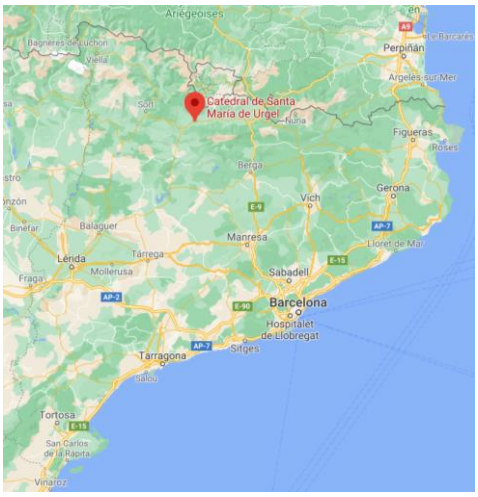


Figura 3.15 Situació de Santa Maria de la Seu d'Urgell a Catalunya

3.4.2 Tipus de sòl

D'acord amb el mapa de classificació de sòls de l'ICC (19), el sòl està format a partir de dipòsits al·luvials. Molt profunds, de ben drenats a moderadament ben drenats, amb textures grosses o mitjanes i un contingut abundant d'elements grossos.

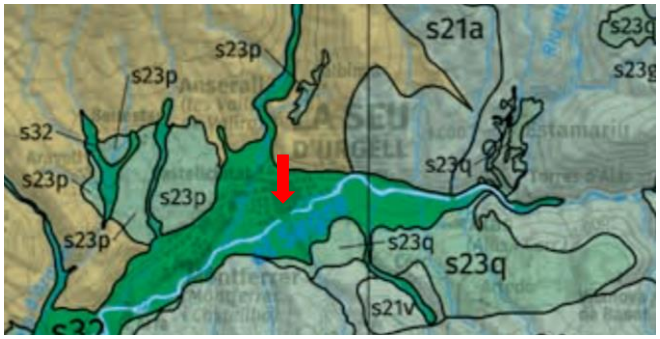


Figura 3.16 Mapa del sòl a la Seu d'Urgell

3.4.3 Història

La Catedral de Santa Maria de la Seu d'Urgell és l'única catedral íntegrament romànica de Catalunya, però tot i datar del segle XII, és la quarta catedral de la ciutat.

La primera catedral estava situada al turó de Castellciutat, però fou destruïda en una de les incursions d'Abd-al-Malik, el 723, que va arrasar la ciutat. A principis del segle IX la ciutat passa a pertànyer a la zona d'influència de Carlemany. És una època difícil, marcada pel conflicte entre l'heretgia adopcionista del bisbe Fèlix i els teòleg carolingis. Tot plegat fa que es traslladi la seu a una altra zona (36)(37)

A finals del segle X, el conjunt catedralici el formen les esglésies de Sant Pere i de Sant Andreu. És amb l'arribada del bisbe Sant Ermengol que comença la construcció de la tercera. Com a Comte d'Urgell va instaurar un sistema d'impostos amb els que després va impulsar la construcció d'infraestructures i de la nova seu, que es va consagrar després de la seva mort, l'any 1040. Aquesta obra forma part de l'anomenat estil preromànic. Si més no, aquesta obra es va deteriorar molt ràpidament, i aviat va ser necessària la seva reconstrucció (37)(5).

El bisbe Ot és qui inicia l'obra de la catedral actual, que comencen el 1115. Les obres, però, son interrompudes pels conflictes entre els Comtes d'Urgell i els Comtes de Foix. L'encàrrec de finalitzar les obres es fa a l'arquitecte més conegut del romànic català, Ramon Llambard i acaben el 1190, tot i que la finalització de les torres i la cúpula és lleugerament posterior (37)(5).

Des que es va acabar la construcció, no s'ha fet cap modificació important a l'estructura: al segle XVI es van enguixar les parets, i un intent de convertir la Seu en una església barroca va quedar només en la modificació de les entrades al transsepte.

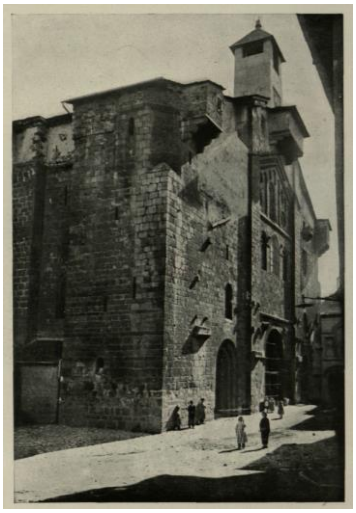


Figura 3.17 Imatge de la façana de la Seu abans de la restauració de Puig i Cadafalch

Ja al segle XX, i en un context arquitectònic de recuperació del patrimoni cultural català, Puig i Cadafalch va liderar la seva reforma. La idea era restablir l'església al seu estat original, és llavors que es va retirar el guix de les parets (38).

3.4.4 Geometria

La planta té forma de creu llatina, amb tres naus i transsepte. La nau central té volta de canó, així com la del transsepte, les naus laterals tenen arcs de mig punt i voltes apuntades, sense capelles laterals. L'absis està cobert per una volta esfèrica i tampoc té capelles adjacents ni deambulatori. On sÍ que hi ha capelles és al transsepte, dues situades a cada banda de la cara est, embegudes al mur.

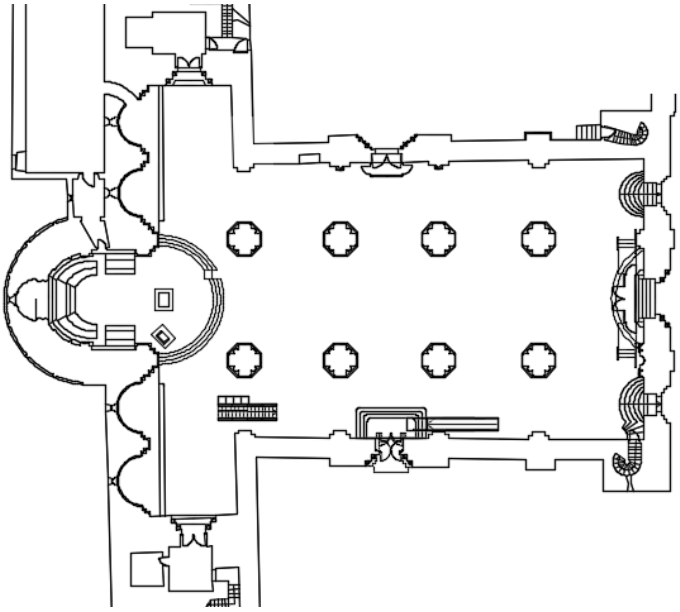


Figura 3.18 Planta de Santa Maria de la Seu d'Urgell

Les naus estan dividida en quatre trams. La nau central té una llum de 5m i les naus laterals, de 3m. Son fora del comú les torres, que donen un aspecte defensiu al conjunt, donant una idea de la quantitat de conflictes al voltant de la construcció, i de la funció de l'església, no només com a edifici de culte sinó com a infraestructura de protecció (36). Rematen les bandes de la façana dues torres, i n'hi ha dues més, de mides massives, als extrems del transsepte. Els altres elements arquitectònics que destaquen son la façana, amb el seu petit cimbori a la part superior, i el passadís obert que recorre la part externa de la volta de l'absis.

A sobre de la volta del creuer hi ha una cúpula amb un petit campanar de paret.

3.4.5 Estat de conservació

En la inspecció visual no s'han detectat grans danys ni grans deformacions, tot i que evidentment, seria necessari realitzar un estudi més exhaustiu amb eines de mesura per poder fer aquesta afirmació.

En canvi, en punts localitzats sí que s'han vist esquerdes i elements danyats.

El més afectat és el cimbori de la part alta de la façana. És comprensible donat el seu nivel d'exposició i l'esveltesa en la seva construcció: és un element molt diàfan, buit i amb elements molt fins.

Figura 3.19 Cimbori de la Seu d'Urgell

A la Figura 3.19 es poden apreciar els desplaçaments relatius que es donen en aquest element. A les altres cares passa el mateix.

Altres punts on s'han trobat esquerdes localitzades son les voltes de les naus laterals, l'absis i l'interior de la façana, com es veu a la Figura 3.20. Hi ha elements que no s'han pogut observar degut a la cobertura de guix.

Figura 3.20 Danys a l'interior de la façana, volta de l'absis i naus laterals (en sentit horari)

Els materials de construcció son carreus quadrats de pedra en bon estat de conservació. Les mides varien en funció de l'element constructiu, són grans per a l'estructura principal, i de petites dimensions pels detalls com el cimbori.

Els murs son de tres capes, dos externes de pedra amb una mitjanera de replè de runa, que no aporta resistència mecànica.

3.5 CANÒNICA DE SANTA MARIA DE VILABERTRAN

3.5.1 Situació

Cap a l'interior del golf de Roses i molt a prop de la frontera amb França i al territori de l'antic comptat d'Empúries, Santa Maria de Vilabertran es troba a l'extrem del municipi de Vilabertran, tocant a Figueres, a la comarca de l'Alt Empordà, província de Girona.

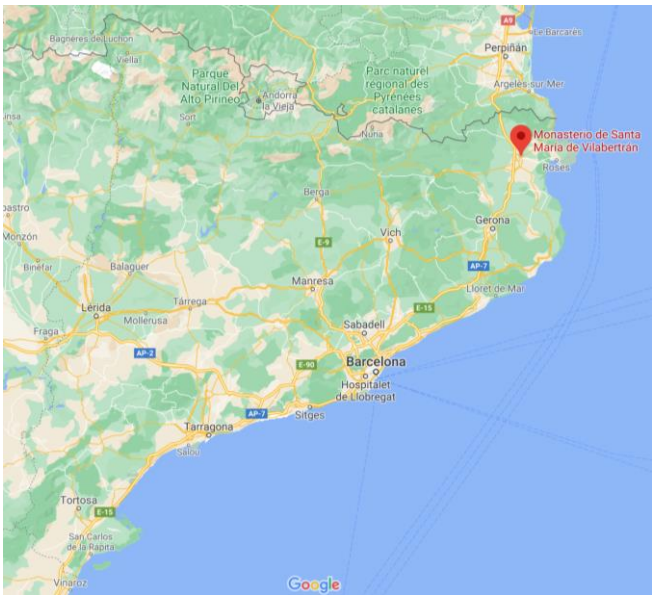


Figura 3.21 Situació de Santa Maria de Vilabertran a Catalunya

3.5.2 Tipus de sòl

D'acord amb el mapa de sòls de l'ICC (19), els sòls de la zona han estat desenvolupats a partir de dipòsits de meteorització, rics en carbonat càlcic. De superficials a molt profunds, ben drenats, amb textures mitjanes i un contingut variable d'elements grossos. Presenten acumulacions secundàries de carbonat càlcic en nòduls o en revestiments dels elements grossos.

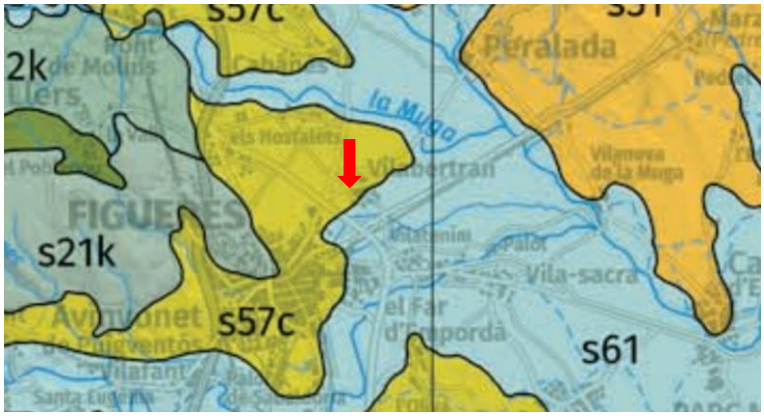


Figura 3.22 Mapa del sòl a Vilabertran

3.5.3 Història

El primer assentament religiós és del segle XI, quan el pare Pere Rigall es va establir a Vilabertran i va fundar allà una comunitat monàstica segons les regles de Sant Agustí. Poc a poc, amb les donacions de famílies benestants de la zona, el nombre de propietats de la comunitat va anar

ascendint. Rigall va ser el primer abat del monestir i va iniciar la construcció de l'església el 1080, que va ser consagrada l'11 de novembre de l'any 1100. És la mateixa que ens ha arribat fins avui (39).

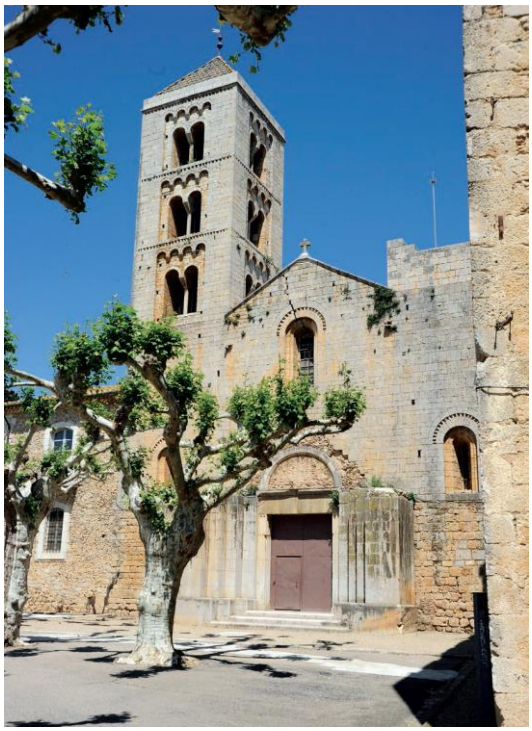


Figura 3.23 Façana i campanar de la canònica de Vilabertran

Al segle XII, l'església disposava d'una hostatgeria a la ruta cap a Terra Santa, això va fer que anés guanyant importància amb el temps i acollís esdeveniments importants com les noces del rei Jaume II amb Blanca d'Anjou (39)(40).

Després d'aquest període de prosperitat, al segle XIII es van haver de construir fortificacions al monestir per protegir-lo de les incursions dels pirates, també és d'aquesta època el palau abacial.

Durant el segle XVI el monestir pateix el declivi de l'ordre de Sant Agustí. El 1592 el Papa Climent III ordena la secularització de totes les comunitats de l'ordre a Catalunya. Aquestes terres passen en endavant a estar regides per un arcepreste (40).

L'any 1794 el monestir és saquejat per les tropes napoleòniques i poc més tard, amb la desamortització de Mendizábal el 1835, els pocs monjos que quedaven es retiren a Albarrasí.

Figura 3.24 Imatge del claustre i part del campanar de Vilabertran, presa entre 1885 i 1911 (Imatge del Centre excursionista de Catalunya)

Després de la Guerra Civil es converteix en cuartell militar. No és fins el 1945 que comencen les reformes (40).

L'any 1980 passa a ser propietat de la Generalitat.

3.5.4 Geometria

La planta té forma de creu llatina, amb tres naus amb volta de canó. L'amplada de la nau central és de 8m i les de les naus laterals és de 3m. Les voltes estan dividides en tres trams iguals i un de més curt tocant a la façana. L'absis està cobert amb una volta esfèrica, i no té capelles adjacents. El transsepte està cobert amb volta de canó, i té una capella a cada costat de l'altar, a la banda est. A més, hi ha una capella gòtica a l'extrem nord del transsepte, coberta amb volta de creueria.

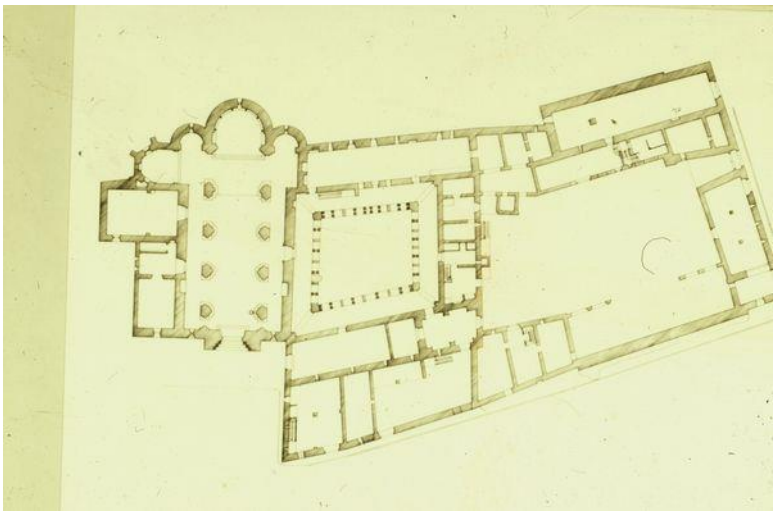


Figura 3.25 Planta de la canònica de Vilabertran

Al costat sud de la nau hi ha una sortida al claustre i al costat nord, una sortida als edificis del complex monàstic.

Figura 3.26 Façana de Vilabertran

A la façana, com es pot veure a la Figura 3.26 hi ha dos torres de campanar, de la qual només una ha estat acabada. També es pot observar el canvi a l'entrada principal, on s'ha tapiat l'arc original.

Els materials de construcció són carreus de pedra en bon estat de conservació. Les mides, però, son molt variables. A la façana tenim carreus quadrats i ben desbastats, en canvi a l'interior trobem elements de dimensions molt més reduïdes units amb morter, sobre tot a les voltes. Les capelles del transsepte son de construcció posterior a la resta de la planta i no tenen tan bona connexió amb la resta dels murs com els elements originals.

Els murs també són de tres làmines, dues exteriors de pedra amb una mitjanera de runa.

3.5.5 Estat de conservació

En la inspecció visual s'han detectat algunes esquerdes que es propaguen al llarg de diferents macroelements i que donen una idea del dany que ja ha patit l'església i de quins son els mecanismes que es poden activar amb més facilitat.

D'una banda, hi ha esquerdes importants a la nau central, algunes es propaguen fins als arcs que uneixen les columnes que la separen de les naus laterals. Tot i que ja han estat reparades en alguna ocasió, encara romanen clarament visibles. Un dels possibles motius seria el terratrèmol de 1428 que va tenir l'epicentre molt a prop de l'església. L'altre podria ser els assentaments diferencials deguts al pes del campanar, o una combinació d'ambdós. En qualsevol cas, la presència del campanar introdueix un element de vulnerabilitat.

Figura 3.27 Esquerdes a l'interior de la façana

L'altra esquerda important és la que s'observa a la façana (Figura 3.27) i que puja des de la finestra fins a la coberta. És consistent amb el mecanisme d'inestabilitat pels efectes de tallant que proposa la Guia.

Figura 3.28 esquerda de la façana

4 APLICACIÓ DELS MÈTODES ALS CASOS PROPOSATS

4.1 METODOLOGIA DE CÀLCUL

Per a les diferents esglésies, s'han estudiat els macroelements i els seus mecanismes assimilant el seu funcionament al del bolcament d'un mur que es comporta com un sòlid rígid.

A partir d'aquí s'ha fet l'estudi del bolcament de les façanes a través de diversos mecanismes, i de l'estabilitat de les voltes, a partir del mecanisme de bolcament del mur. En aquesta secció s'explica com s'han dut a terme aquests càlculs.

4.1.1 Càlcul de la càrrega de les voltes

El concepte és el mateix que el de l'esquema de la Figura 2.7, considerant un sistema de càrregues una mica més sofisticat que permet tenir en compte les forces verticals i horitzontals introduïdes per les voltes a banda i banda del mur, si fos el cas, el pes propi d'un element a sobre del considerat i el pes propi de l'element.

Conèixer les càrregues que introdueixen les voltes sobre els murs no és un problema elemental, com a base es fan servir les taules d'Ungewitter (20). Les voltes analitzades, però, no es troben contemplades específicament a les taules.

Altura/luz (f/L)	1 : 8		1 : 3		1 : 2		2 : 3		5 : 6 a 1 : 1	
kN/m²	V_o	H_0	V_o	H_0	V_o	H_0	V_o	H_0	V_o	H_0
½ ladrillo ligero	2,0	3,6-4,0	2,3	1,6-1,8	2,6	1,1-1,2	2,9	0,9-1,0	3,4	0,8-0,9
½ ladrillo resistente	2,7	5,0-5,5	3,1	2,2-2,4	3,5	1,4-1,6	3,8	1,1-1,3	4,5	1,0-1,1
¾ ladrillo resistente	3,7	7,0-7,5	4,2	3,0-3,3	4,8	1,9-2,2	5,3	1,6-1,8	6,5	1,5-1,6
200 mm. arenisca	5,0	9,5-10,0	5,7	4,2-4,5	7,0	2,9-3,2	7,5	2,2-2,5	9,0	2,1-2,3
300 mm. mampostería	8,5	16-17	10,0	7,1-7,5	12,0	4,8-5,5	13,0	4,0-4,3	15,0	3,5-3,7
Brazo de palanca (h/f)	0,90		0,85-0,75		0,80-0,70		0,80-0,72		0,80-0,75	

Figura 4.1 Taula de càrregues de les voltes

En base als valors de la taula, però, s'han trobat expressions que permeten calcular els valors V_0 i H_0 per a qualsevol volta de maçoneria. En primer lloc, s'assumeix que les càrregues resultants son directament proporcionals al gruix de la volta. Dividint els valors V_0 i H_0 entre els 0,3m de la volta de maçoneria, es representen els seus valors per a les diferents valors de f/L.

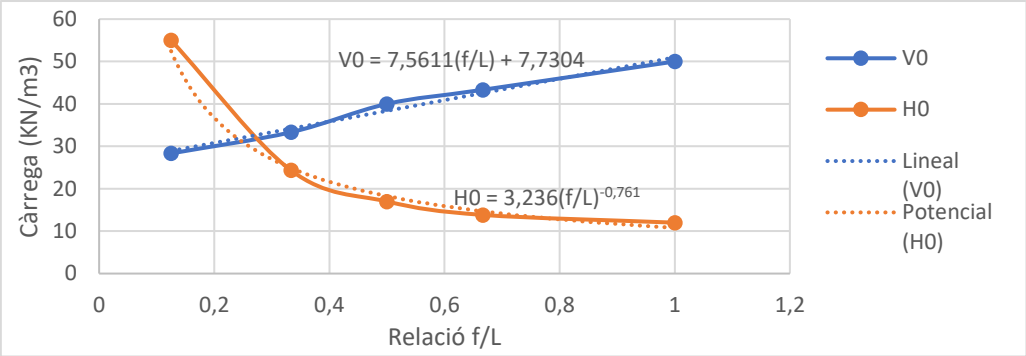


Figura 4.2 Relació entre les dimensions de la volta i la càrrega

Després, amb Excel, s'ajusta la tendència que millor coincideix amb la distribució dels punts i s'obté l'expressió matemàtica. El resultat final serà, doncs:

$$V_0 = \left(7{,}56\frac{f}{L} + 7{,}73\right)e \qquad \text{Eq. 4.1}$$

$$H_0 = 3{,}24e\left(\frac{f}{L}\right)^{-0{,}761} \qquad \text{Eq. 4.2}$$

On f és l'alçada de la volta, L la llum i e el gruix. Els valors de V_0 i H_0 segons aquestes expressions son en KN/m^2, per obtenir els valors finals V i H de les càrregues totals verticals i horitzontals introduïdes per les voltes s'han de multiplicar per l'àrea en planta de la volta (20)(22).

Per últim, s'ha d'esbrinar com considerar en l'esquema el pes del replè que es recolza sobre la volta. D'acord amb Huerta, aquest es pot considerar com a una càrrega vertical que actua a la base de la volta (29).

4.1.2 Efectes del desplaçament del mur en l'estabilitat de les voltes

La Guia no especifica cap mecanisme en particular per a la fallida de les voltes, tret de la volta de la nau central, on es contempla la fallida per vibració transversal de la nau. A l'hora d'estudiar aquest mecanisme, el càlcul a fer seria el del bolcament dels murs laterals de la nau central.

De la mateixa manera s'ha estudiat l'estabilitat de les voltes de les naus laterals, a partir del bolcament dels murs que les suporten. De manera que no s'han calculat les corbes de capacitat de les voltes en sí, però sí dels murs.

A partir d'aquest estudi, es podrà observar com afecta el desplaçament del mur a la volta. La relació entre la deformació i l'eventual col·lapse de la volta segons el desplaçament a la base serà diferent en funció del tipus de volta, com s'explicarà a continuació.

És important assenyalar que hi ha altres mecanismes que podrien provocar la fallida de les voltes i que haurien d'estudiar-se en particular: efectes de tallant derivats de les discontinuïtats de les parets, o per efectes de tallant deguts a discontinuïtats a la pròpia volta; per les diferències en la rigidesa entre la volta de la nau i les nervadures, per deformació longitudinal de la columnata, etc. Aquests podrien tenir una acceleració d'activació més baixa que el col·lapse per obertura dels suports.

Quan al funcionament mecànic de les voltes, s'ha de destacar que són molt més adaptables als moviments que els murs:

- Les esquerdes no impliquen perill, son senzillament l'adaptació de l'estructura a un canvi de les seves condicions
- Les esquerdes son reversibles: si els suports tornen a la posició original, aquestes es tancaran (23)

Així doncs, tindrà sentit estudiar el desplaçament últim que poden suportar les voltes, aquell per al qual es produiria el col·lapse, no tant trobar valors intermedis. A diferència dels murs, quasi tota la corba de capacitat seria la branca elàstica i presentaria una branca no lineal pràcticament inexistent.

L'objectiu d'aquest estudi és obtenir aquests valors del límit últim de les voltes i veure si s'assoleixen amb els desplaçaments dels murs que s'han calculat, per poder fer afirmacions sobre l'estabilitat de les voltes en les diferents fases de la deformació del mur.

Els valors últims de desplaçament de desplaçament pel mur i per la volta no han de coincidir necessàriament, el mur podria patir un gir suficient com per col·lapsar i que la volta continués essent estable en aquest punt, tot i que evidentment, un cop el mur ha col·lapsat, la volta perd el recolzament i també cau. Es pot dir, aleshores, que el desplaçament últim de la volta és el mínim entre el seu propi (al que arriba per raons geomètriques) i el del mur.

El cas invers, però, no es compleix. Per exemple, la volta podria ser molt poc gruixuda i col·lapsar per a un gir del mur que no el fes bolcar; això no només no implicaria la fallida del mur, sinó que aquest milloraria fins i tot la seva estabilitat, excèntrica deguda a l'empenta de la volta (22). La seva corba de capacitat del mur s'hauria de recalcular a partir d'aquest punt, per tenir en compte aquesta circumstància.

La relació entre la deformació de la volta (i el seu eventual col·lapse) en funció del desplaçament a la base serà diferent en funció del tipus de volta, com s'explicarà a continuació

4.1.2.1 Volta de canó

La volta de canó presenta el cas més senzill. En pic comença el desplaçament lateral del mur, es comencen a obrir les esquerdes.

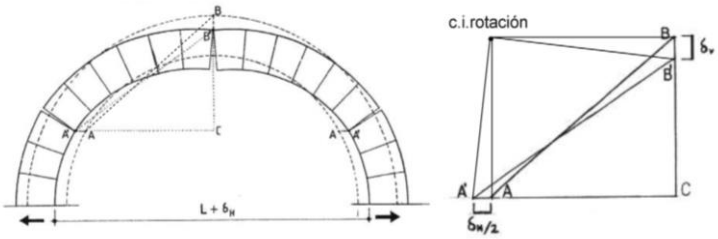


Figura 4.3 Relació entre l'apertura de de la base i el descens vertical de la clau

Com es pot observar a la figura, l'obertura de l'esquerda a la clau de la volta depèn del desplaçament cap a l'exterior del mur que la suporta i de l'alçada del punt A, a la que es considera que comença la deformació (22)(28).

Es pot resoldre el problema mecànic i s'arriba a la següent expressió:

$$\delta_v = \frac{cos\varphi}{1 - sin\varphi}\delta_h \qquad \text{Eq. 4.3}$$

On δ_v és el desplaçament vertical de la volta (punt B de la Figura 4.3), δ_h és el desplaçament horitzontal del mur (d'un dels murs, no el total, és a dir, la meitat del que apareix a la Figura 4.3) i ϕ és l'angle a partir del qual es considera que la volta es comença a deformar. D'acord amb Huerta, per una volta de canó aquest angle és de 30º (28).

Avançant amb el problema mecànic, podem obtenir l'angle d'obertura de l'esquerda a la part superior de la volta: sent e el gruix de l'arc, s'arriba a la següent expressió:

$$\cos\left(\frac{\vartheta}{2}\right) = \frac{e - \delta_v}{e} \qquad \text{Eq. 4.4}$$

Amb aquestes expressions podem obtenir la deformació vertical de la volta i l'obertura de l'esquerda quan el mur assoleix el seu punt d'acompliment i quan el mur assoleix el seu desplaçament últim.

Per obtenir el valor del desplaçament últim que suporta la volta, es prenen els valors de Huerta per a la volta de canó: la volta col·lapsa per a una obertura total dels estreps igual a L/10 (22). Per tant, considerant el cas més desfavorable, que seria que els murs es baden i s'obren simètricament, en comptes de girar cap a la mateixa banda, el desplaçament màxim del mur, és a dir, el desplaçament últim de la volta, seria

$$Du = L/20 \qquad \text{Eq. 4.5}$$

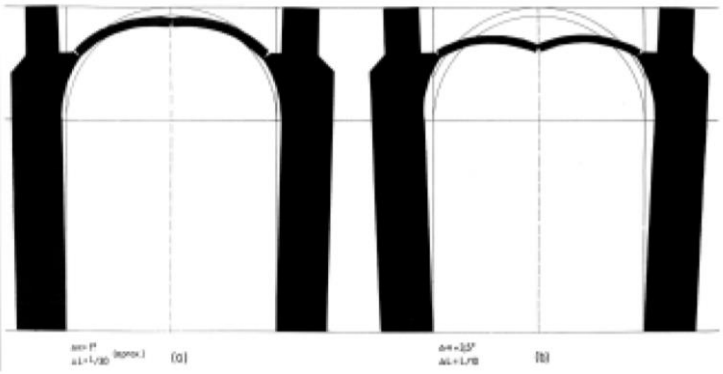


Figura 4.4 deformació i col·lapse d'una volta de canó per obertura dels murs

4.1.2.2 Volta apuntada

Aquest cas és molt més difícil d'estudiar que el de la volta de canó, a diferència d'aquesta, quan els estreps s'obren, no apareixen esquerdes immediatament. Com es pot observar a la Figura 4.5, el que passa és que l'obertura dels estreps genera una pressió afegida sobre la clau de la volta (23). Un dels mecanismes possibles de fallida és que aquesta pressió és suficient com per provocar el lliscament de la clau, que es desplaça cap amunt (22).

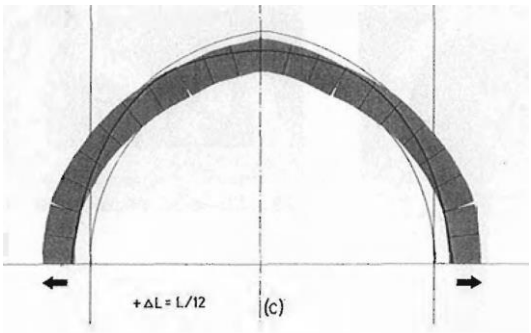


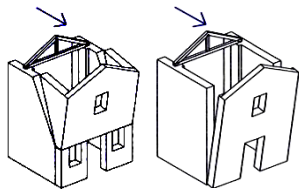
Figura 4.5 Efecte de la separació dels murs en la volta apuntada

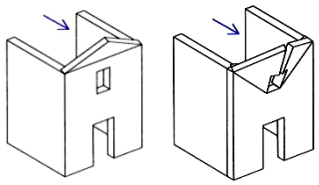
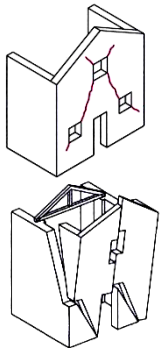
Així doncs, és més difícil resoldre geomètricament el problema per obtenir l'angle d'obertura de les esquerdes, o quin serà el desplaçament vertical de la clau. Per trobar el desplaçament últim d'aquest tipus de voltes en funció de la seva geometria s'ha recorregut a valors tabulats (annexes).

4.2 CÀLCULS APLICATS A POBLET

4.2.1 Mètode dels índex de vulnerabilitat

La Guia s'ha aplicat a partir de l'observació directa de l'edifici. Es mostra com a exemple el procés que s'ha seguit per analitzar el macroelement de la façana, el detall amb la resta de macroelements, amb els seus respectius mecanismes, es pot consultar als annexes. En total hi ha deu macroelements i vint-i-quatre mecanismes.

Macroelement: FAÇANA		
Mecanisme 1: Bolcament de la façana 	Mesures antisísmiques - Edificis col·lindants, la façana original està coberta per una façana barroca unida a la muralla exterior. - Bons elements d'unió entre la façana i les parets de les naus.	Indicadors de vulnerabilitat - Cap dels indicats
	Efectivitat: Alta, és molt difícil el bolcament complet de la façana quan està reforçada frontalment. $efectivitat = 2$	Efectivitat: Nul·la, la volta no es recolza sobre la façana. $efectivitat = 0$
Paràmetres del mecanisme 1		
$\rho_k = \rho_1 = 1$	$v_{kp} = v_{1p} = 3$	$v_{ki} = v_{1i} = 0$
Dany pel mecanisme 1 L'estructura no presenta afectació per aquest mecanisme.		

$d_1 = 0$		
Mecanisme 2: Dany a la capçalera de la façana 	Mesures antisísmiques - No hi ha mesures específiques	Indicadors de vulnerabilitat: - Presència d'una gran obertura: Rosetó
	Efectivitat: Cap, per sobre de la unió entre façana i muralla, sí que es pot produir el bolcament. $efectivitat = 0$	Efectivitat: Alta, la part exposada de la façana no té reforços $efectivitat = 3$
Paràmetres del mecanisme 2		
$\rho_k = \rho_2 = 1$	$v_{kp} = v_{2p} = 0$	$v_{ki} = v_{2i} = 3$
Dany pel mecanisme 2 L'estructura presenta esquerdes, però no dany estructural degut a aquest mecanisme. $d_2 = 1$		
Mecanisme 3: Efectes de tallant a la façana 	Mesures antisísmiques - Edificis adjacents: La façana barroca que uneix la façana original a la muralla	Indicadors de vulnerabilitat - Presència de grans obertures: Porta i rosetó
	Efectivitat: Mitja, només protegeix una part de la façana. $efectivitat = 2$	Efectivitat: Mitja, les obertures són grans en relació a la dimensió de la façana, però no és esvelta i els murs son gruixos. $efectivitat = 2$
Paràmetres del mecanisme 3		
$\rho_k = \rho_3 = 1$	$v_{kp} = v_{3p} = 2$	$v_{ki} = v_{3i} = 2$
Dany pel mecanisme 3 L'estructura presenta esquerdes importants a les obertures, el rosetó i la porta original. $d_3 = 2$		

Taula 4.1 Detall de l'aplicació del mètode dels índex al macroelement de la façana de Poblet

La Taula 4.3 és el resum de tots els valors que s'han obtingut aplicant la Guia, la Taula 4.2 conté els valors calculats a partir d'aquestes observacions.

índex de vulnerabilitat	i_v	0,5521
índex de dany	i_d	0,2394
acceleració límit dany (a/g)	a_{SLD}	0,0412
acceleració límit últim (a/g)	a_{SLU}	0,1440

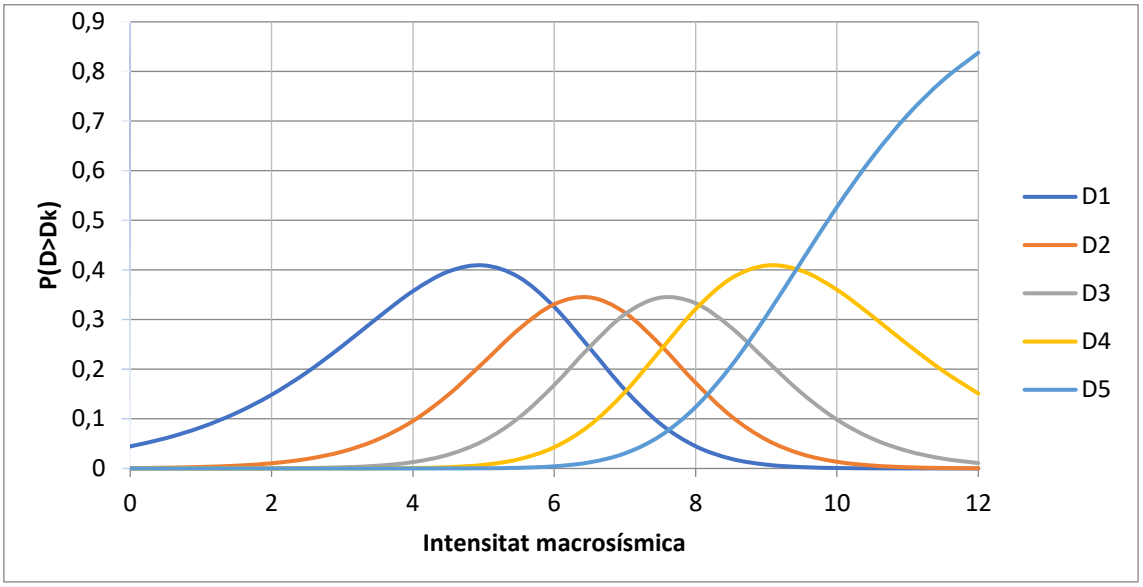
Taula 4.2 Resultats de l'anàlisi dels índex de vulnerabilitat a Poblet

		Número del macroelement (k)	Nombre de mesures antisísmiques	efectivitat mesures antisísmiques	vkp	nombre d'indicadors de vulnerabilitat	efectivitat indicadors de vulnerabilitat	vki	ρk	dk
FAÇANA	Bolcament façana	1	2	2	3	0	0	0	1	0
	Capçalera façana	2	0	0	0	1	3	3	1	1
	Tallant façana	3	1	2	2	1	2	2	1	2
	Vibració nau central	4	2	1	2	1	3	3	1	1
NAU CENTRAL	Tallant parets nau central (i lateral	5	2	2	3	1	1	1	1	1
	Columnata nau central	6	2	3	3	1	1	1	1	0
	Volta nau central	7	1	1	1	1	2	2	1	2
NAUS LATERALS	Voltes naus laterals	8	1	3	3	0	0	0	1	2
	Coberta naus laterals i central	9	0	0	0	1	1	1	1	1
TRANSSEPTE	Bolcament transsepte	10	1	3	3	2	3	3	0,8	0
	Tallant parets transsepte	11	0	0	0	3	3	3	1	2
	Voltes transsepte	12	0	0	0	1	3	3	1	2
	Coberta transsepte	13	0	0	0	1	1	1	0,6	1
CIMBORI	Cimbori	14	0	0	0	2	3	3	0,8	1
ABSIS	Bolcament absis	15	2	3	3	2	3	3	1	1
	Tallant parets absis	16	2	3	3	2	3	3	1	0
	Volta absis	17	1	3	3	0	0	0	1	2
	Coberta absis	18	0	0	0	1	1	1	0,6	1
CAPELLES	Bolcament capelles	19	0	0	0	1	1	1	0,7	0
	Tallant parets capelles	20	0	0	0	2	2	2	0,7	1
	Voltes capelles	21	0	0	0	0	0	0	0,7	2
EDIFICIS ADJACENTS	Edificis adjacents	22	0	0	0	1	1	1	0,6	1
CAMPANAR PARET	Campanar paret	23	1	1	1	1	3	3	0,6	3
CAMPANAR TORRE	Campanar torre	24	1	2	2	1	2	2	0,7	2

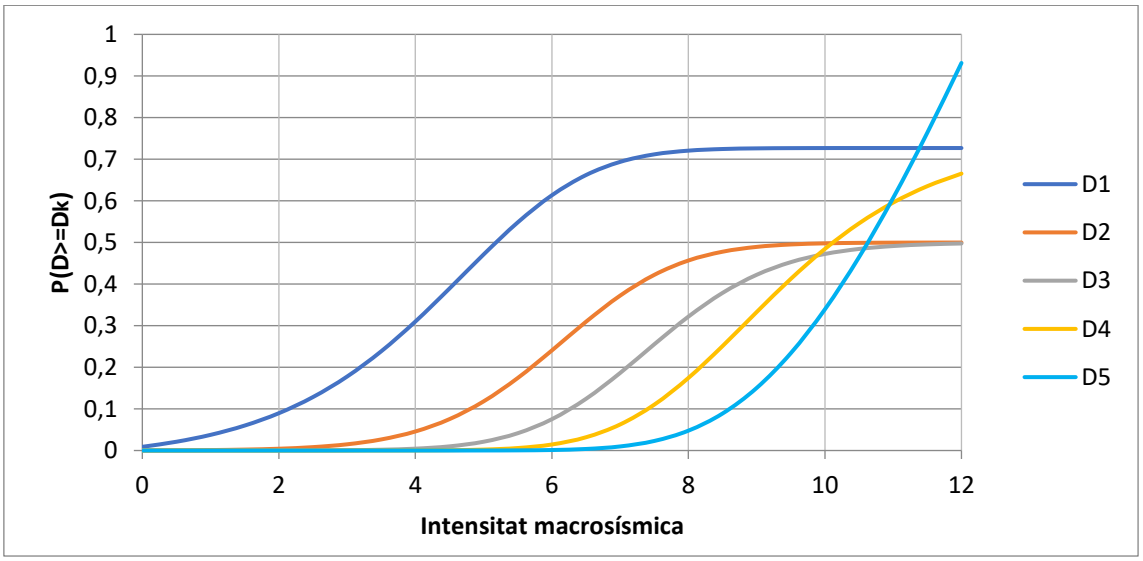
Taula 4.3 Taula resum dels valors de Poblet

4.2.2 Corbes de fragilitat

Com s'ha explicat a l'apartat 2.3.3, a partir de les dades obtingudes amb l'estudi dels índex de vulnerabilitat, es poden traçar les corbes de fragilitat, segons una distribució de probabilitat binomial.



Taula 4.4 Probabilitat d'arribar als diferents nivells de dany per Poblet



Taula 4.5 Probabilitat acumulada dels diferents nivells de dany per Poblet

Per exemple, per a una intensitat sísmica de 6 (10), que té un període de retorn a Poblet de 500 anys, veiem que el més possible és que l'edifici sofreixi danys entre 1 i 2 (Figura 4.4). El dany moderat, 4, és el més probable per a una intensitat de 9.

4.2.3 Mètode de l'anàlisi límit cinemàtic

La taula resumeix els valors de càlcul que s'han pres, tenint en compte la localització, el tipus de sòl i els materials de construcció.

NCSE-02		EC-08	
ρ	1,3	ϒ	1,3
ρa_b	0,052	a_{gR}	0,051
S	1,6	S	2
K	1	K	1

Taula 4.6 Valors de càlcul Poblet

El cas de Poblet és el més complex dels estudiats, la secció transversal no és simètrica i a la banda sud hi ha una fila de capelles. A més, les voltes son apuntades, no de canó com a la resta de casos.

Els mecanismes estudiats, per macroelements, son:

- Pel macroelement de la façana:
  - Bolcament de la façana sencera
  - Bolcament de la part superior de la façana
  - Bolcament de la façana a partir de la galilea
- Pel macroelement de la nau central
  - Vibració transversal de la nau
- Pel macroelement de les naus laterals:
  - Estabilitat de la volta de la nau lateral nord en funció de la deformació dels murs que la suporten. La nau lateral sud es recolza sobre pilars que estan sotmesos d'una banda a les càrregues de la nau lateral sud i de l'altra, a les càrregues de les capelles, i tenen a sobre el mur extern de la nau lateral. S'ha estudiat el mecanisme de bolcament d'aquest mur lateral, tot i que no suporta el pes de cap volta i és difícil preveure com afectaria a les voltes el seu col·lapse. No s'ha estudiat el mecanisme dels pilars.
- Pel macroelement de les capelles:
  - Estabilitat de les voltes de les capelles en funció de la deformació dels murs que les suporten

4.2.3.1 Suposicions de càlcul

4.2.3.1.1 Façana

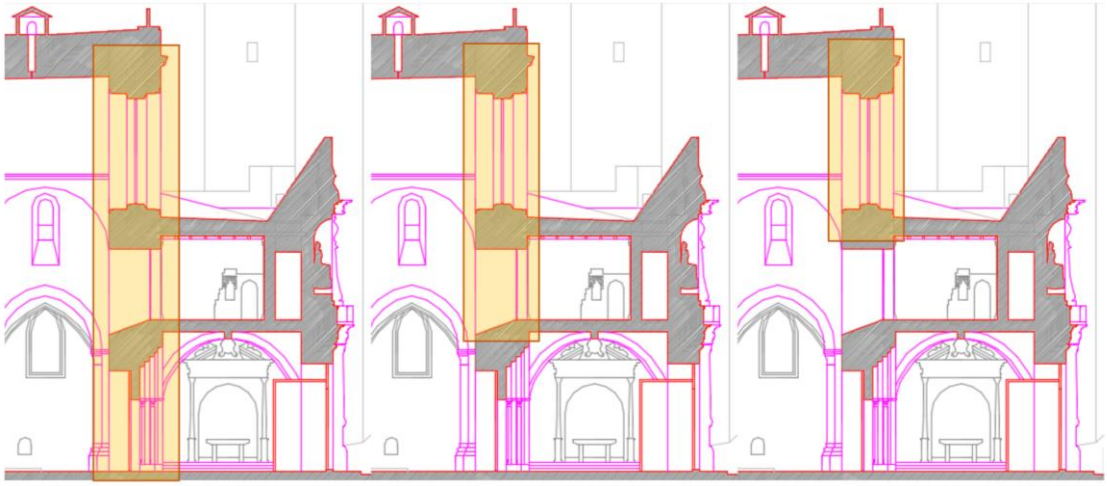


Figura 4.6 Mecanismes considerats a la façana, d'esquerra a dreta: façana competa, façana per sobre de la galilea i part superior de la façana

La Guia presenta dos mecanismes de bolcament a la façana, bolcament de la façana completa i bolcament de la part superior de la façana. En el cas de Poblet, però, s'ha estudiat un tercer mecanisme, el de bolcament a l'alçada de la galilea.

Com la galilea és de construcció posterior a la façana original, es considera que en el mecanisme de bolcament de la façana completa, no ofereix resistència addicional, ja que la seva estructura no treballa conjuntament amb la de la façana. Tot i així, podria representar un element de colpeig a la seva alçada que generés dany suficient com per facilitar el mecanisme de bolcament a partir de la seva alçada.

Es considera una càrrega vertical que actua sobre la façana provinent del pes de part de la coberta. No hi actuen forces horitzontals que afavoreixen el bolcament.

4.2.3.1.2 Nau central

Figura 4.7 Mur lateral de la volta de la nau central

Les característiques de la volta de la nau central son les de la Taula 4.7.

L	llum	7,65m
f	alçada de la volta	4,49m
e	gruix de la volta	0,47m
f/L	Relació alçada-llum	0,61
e/L	Relació gruix-llum	0,061
B	Longitud del pòrtic	7,11m

Taula 4.7 Característiques geomètriques de la volta central de Poblet

D'acord amb les expressions de l'apartat 4.1 obtenim els valors de les càrregues vertical i horitzontal introduïdes per la volta, considerant que el pes del replè es suma a la càrrega vertical de la volta.

H	73,79 KN
V	832,45 KN

Taula 4.8 Valors de les càrregues introduïdes per la volta central

A partir de les taules dels annexes per a les característiques de la Taula 4.9, obtenim la deformació horitzontal màxima de la volta, és a dir, el desplaçament màxim del mur és la meitat d'aquest valor (27).

ΔL_{max}	36cm
$D_{x\ max}$	18 cm

Taula 4.9 Valors límit de la volta de la nau central

4.2.3.1.3 Mur nau lateral nord

Figura 4.8 Mur de la nau lateral nord

S'ha fet la comprovació d'aquest element considerant el seu pes propi i la càrrega de la coberta, el funcionament mecànic és com el de la comprovació dels mecanismes de la façana. L'element, però no té gaire importància en l'estabilitat global de l'estructura.

4.2.3.1.4 Nau lateral nord

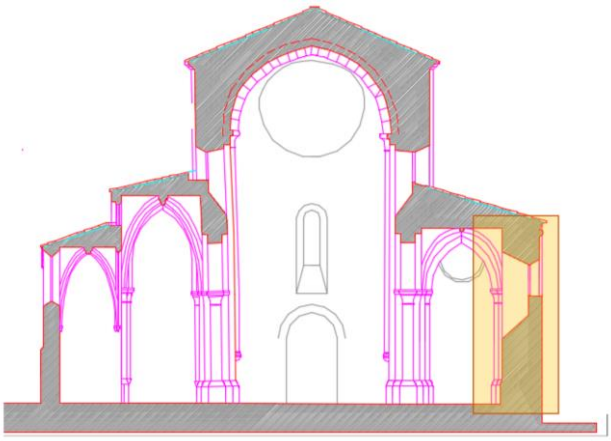


Figura 4.9 Mur exterior de la nau lateral nord

Les característiques de la volta son les de la Taula 4.10.

L	llum	3,29 m
f	alçada de la volta	2,59 m
e	gruix de la volta	0,39 m
f/L	Relació alçada-llum	0,79

e/L	Relació gruix-llum	0,12

Taula 4.10 Característiques geomètriques de la volta de la nau lateral nord

Les càrregues que es tenen en compte son les introduïdes per la volta lateral nord, considerant el pes del replè en la vertical, i el pes de l'element de coberta que s'hi recolza, Q.

H	16,81 KN
V	772,35 KN
Q	619,94 KN

Taula 4.11 Valors de les càrregues introduïdes per la volta lateral nord i pes de la coberta

El desplaçaments límit de la volta, d'acord amb les taules dels annexes, son

ΔL_{max}	58cm
$D_{x\ max}$	29 cm

Taula 4.12 Valors límit de la volta lateral nord

4.2.3.1.5 Capelles

Figura 4.10 Mur exterior de les capelles

Les característiques de la volta de les capelles son

L	llum	2,85m
f	alçada de la volta	3,95m
e	gruix de la volta	0,34m
f/L	Relació alçada-llum	1,38

e/L	Relació gruix-llum	0,12

Taula 4.13 Característiques geomètriques de la volta de les capelles

Les càrregues introduïdes per la volta, considerant el pes del replè a la vertical, i la càrrega de la coberta son

H	20,74 KN
V	832,45 KN
Q	139, KN

Taula 4.14 Valors de les càrregues introduïdes per les voltes de les capelles i pes de la coberta

No es tenen dades sobre el desplaçament límit d'una volta d'aquestes característiques.

4.2.4 Anàlisi de resultats

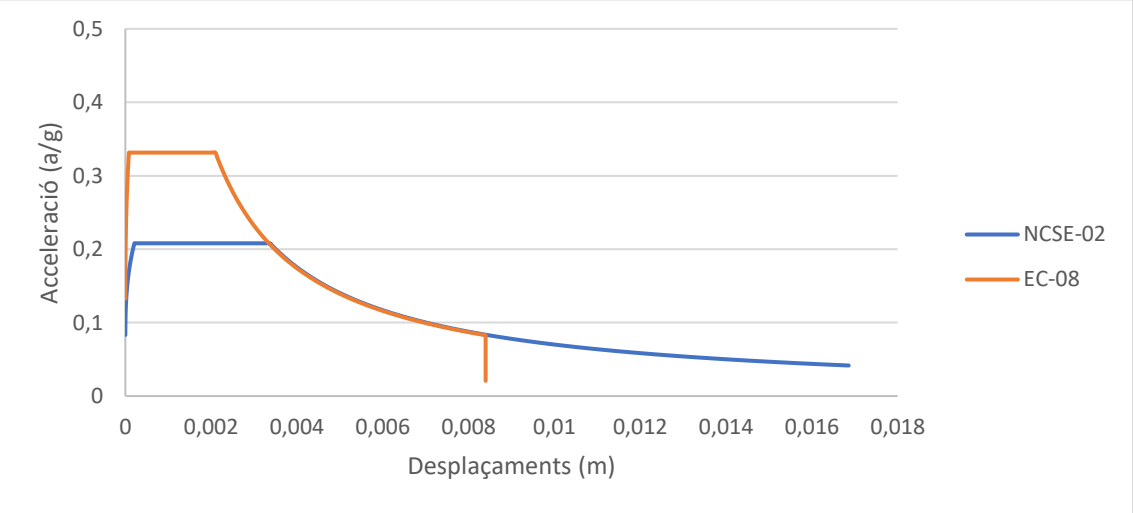


Figura 4.11 Espectres de resposta per a Poblet

Podem observar que amb el procediment de la normativa EC-08 s'obté una acceleració màxima més gran que amb la normativa espanyola. En canvi, per a NCSE-02, els desplaçaments son majors. Veiem com afecta això als diferents mecanismes estudiats.

Mecanismes	**Valors últims**	
	d_u	a_u
Bolcament façana sencera	11cm	0,56g

Bolcament façana a partir de la galilea	15cm	2,11g
Bolcament part superior de la façana	14cm	3,9g
Mur nau lateral	8cm	1,67g
Mur exterior nord	3cm	0,97g
Mur de les capelles	8cm	0,82g

Figura 4.12 Taula resum dels resultats de Poblet

Façana

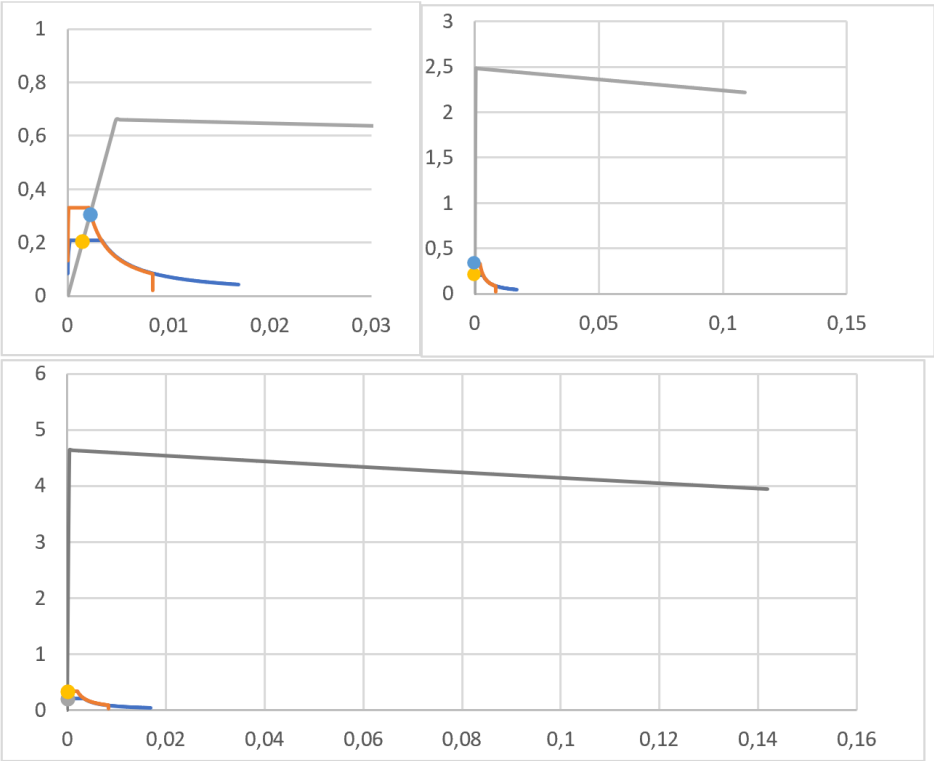


Figura 4.13 Corbes de capacita pels mecanismes, en sentit horari: bolcament de la façana sencera, bolcament de la façana per sobre de la galilea i bolcament de la part superior de la façana

Per a que es pugui observar, la figura 4.13 és un detall del mecanisme de bolcament de la façana sencera

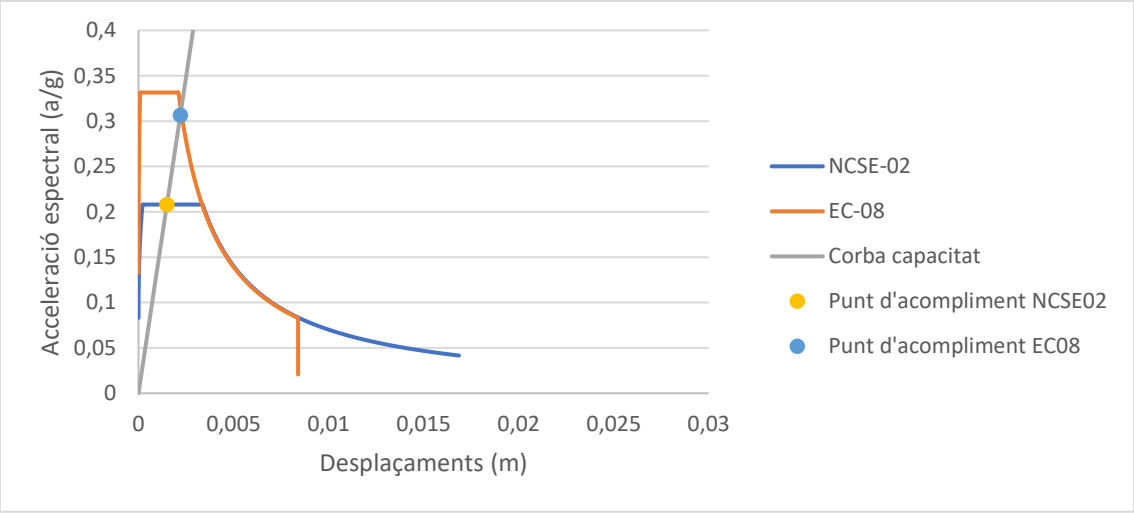


Figura 4.14 Punts d'acompliment del mecanisme de bolcament de la façana sencera

En primer lloc, cal destacar la forma de la corba de capacitat en els tres casos, la branca lineal té un gran pendent, és a dir, té la forma esperada per a un element de gran rigidesa. Comparant les corbes dels tres mecanismes entre elles, podem observar que el límit elàstic creix si és redueixen les dimensions del bloc estudiat, en canvi, no hi ha una gran variació en el desplaçament últim. És a dir, si considerem un element cada cop menys esvelt, com seria la façana a partir de la galilea, o la part superior de la façana, el pes propi serà menor que el de la façana sencera i actuarà més lluny de la vertical de la ròtula, ajudant a estabilitzar el bloc. Aleshores caldrà una acceleració més gran per a activar el mecanisme.

S'ha de dir que en el model considerat, només es compten les forces que actuen de la ròtula cap amunt, en models més sofisticats que no consideressin la façana com a un sòlid rígid sinó que tinguessin en compte les propietats dels materials o l'efecte del colpeig de la galilea, es podrien obtenir acceleracions d'activació més baixes per als mecanismes de fallida de la part superior de la façana.

En qualsevol cas, segons aquest estudi, el mecanisme que activarà la fallida de la volta serà el de bolcament de la façana sencera.

En tots els casos, la corba de capacitat talla els espectres de resposta en la seva branca elàstica, de manera que no és necessari aplicar els mètodes de la Circolare i els punts d'acompliment són les interseccions entre les corbes.

El dany que s'assoleix per a tots els punts d'acompliment és lleu.

Nau central

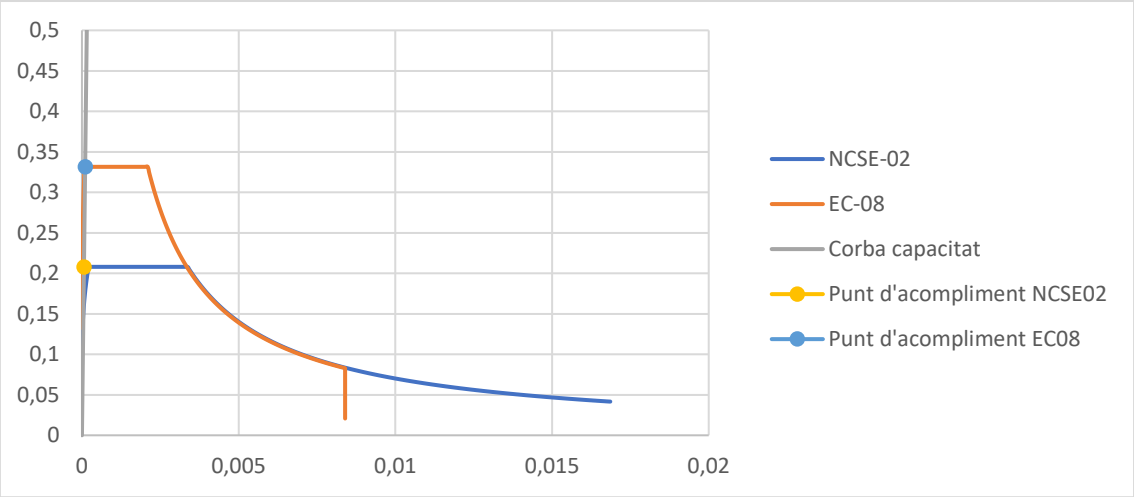


Figura 4.15 Detall dels punts d'acompliment del bolcament dels murs de la nau central

Podem observar també en aquest cas la corba de capacitat d'un element amb gran rigidesa. D'acord amb les expressions calculades, també podem observar que l'augment de la relació f/L fa que cada cop augmenti més la força vertical (estabilitzadora) que introdueix la volta, i disminueixi la força horitzontal, tot i que aquesta es va estabilitzant.

Les corbes es tallen a la branca elàstica de la corba de capacitat. El dany obtingut també és lleu.

Comparem ara els valors últims del desplaçament del mur amb els desplaçaments últims de la volta. Veiem que quan es produeix la fallida del mur, la volta encara és estable, per tant, no és necessari calcular una nova corba de capacitat per al mur i es pot dir que l'acceleració que provoca la fallida de la volta per a aquest mecanisme és, doncs, la del mur.

Mur de la nau lateral sud

Pesenta també dany lleu, les corbes es tallen a la branca elàstica i no és necessari fer càlculs addicionals.

Volta nau lateral nord

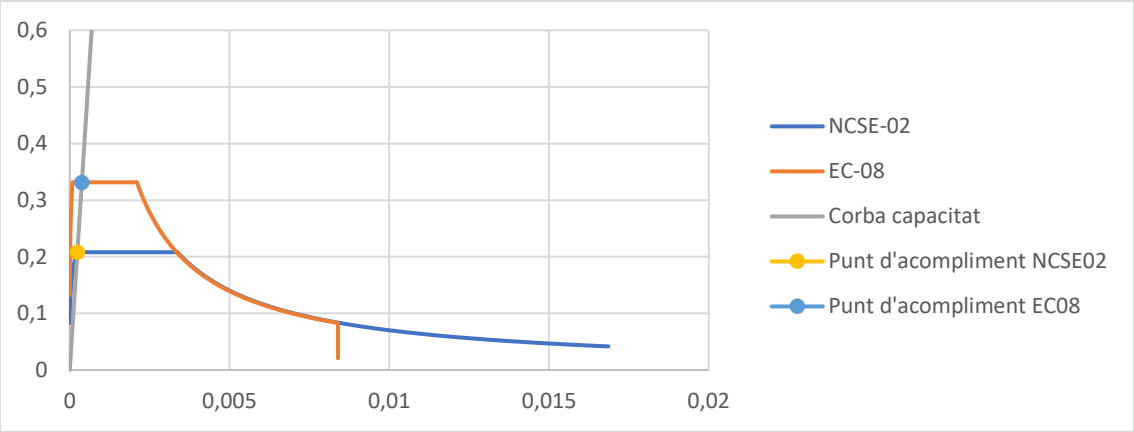


Figura 4.16 Punts d'acompliment del mur de la nau lateral nord

En aquest cas, tot i que les corbes també es tallen a la branca elàstica de la corba de capacitat, veiem una acceleració d'activació del mecanisme menor que la del mur de la volta central, perquè les càrregues verticals son molt grans, de l'ordre de les de la volta central, en canvi l'element és més esvelt i per tant, més inestable, sobretot si hi actuen forces horitzontals per sobre del centre de gravetat. Tot i així, el dany de l'element al punt d'acompliment és lleu.

Com en el cas de la volta central, la volta és estable per al desplaçament en el que el mur col·lapsa. Per tant, l'acceleració última que pot suportar és la mateixa que la del mur.

Volta capelles

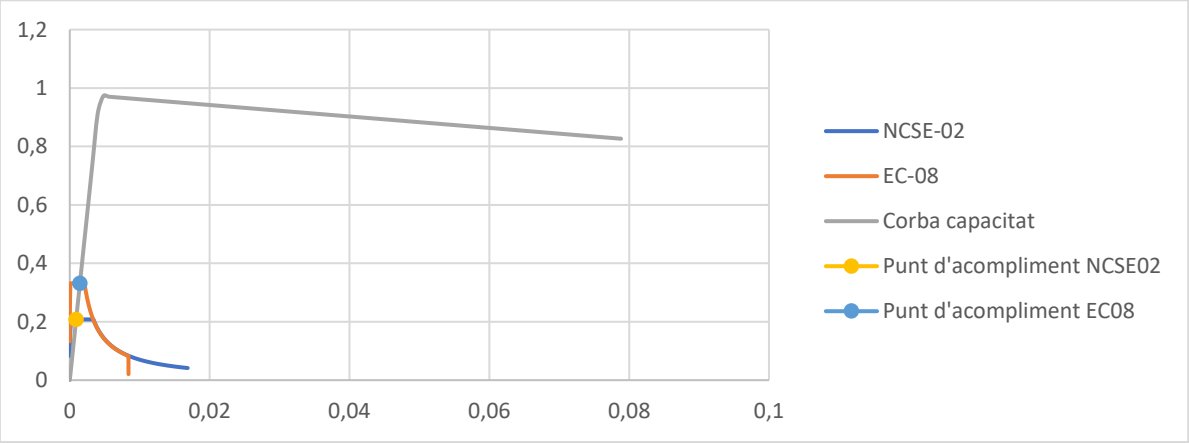


Figura 4.17 Punts d'acompliment del mur exterior de les capelles, detall

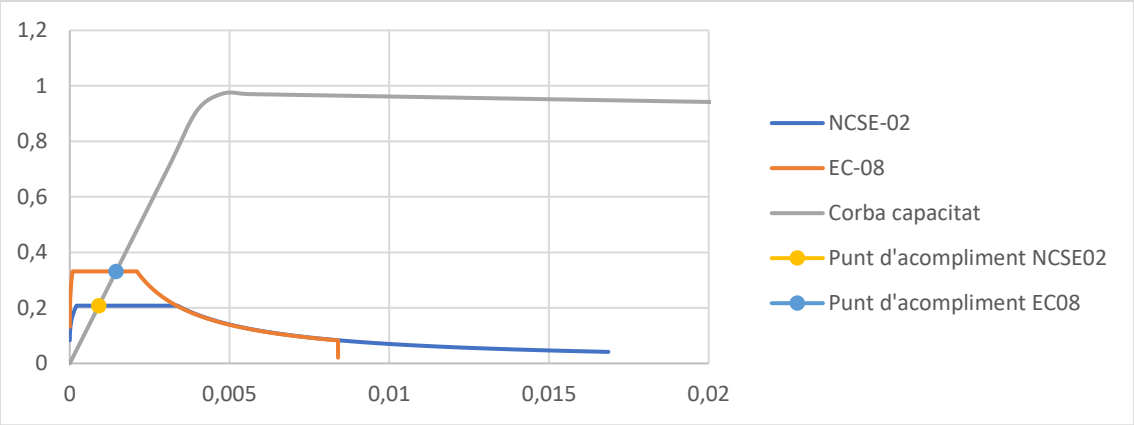


Figura 4.18 Punts d'acompliment del mur exterior de les capelles, detall

Observem que l'acceleració d'activació del mecanisme és la més petita dels tres elements sota càrrega de volta, també és l'element més esvelt dels tres. Tot i així, les corbes es tallen en la branca elàstica i el dany al punt d'acompliment és lleu.

Com en els altres casos, l'acceleració última de la volta serà la del mur, ja que en el seu desplaçament últim la volta encara no ha col·lapsat.

En global, veiem que, en tots els casos, el punt d'acompliment presenta un desplaçament i una acceleració més alts si es calculen amb l'espectre de resposta d'EC08.

Les altres observacions que es poden destacar son: per a càrregues d'ordres de magnitud semblants, l'esveltesa és el factor que més contribueix a l'estabilitat de l'element, i que les voltes son més resistents que els murs que les suporten si considerem la seva estabilitat.

Aquest darrer comentari té sentit observant l'estat de la volta. Com s'ha dit, hi ha una esquerda al llarg de la part més alta de la volta central, que podria ser deguda al lliscament de la clau (22). La seva gran deformació vertical també és consistent amb els grans valors de deformació que pot arribar a admetre.

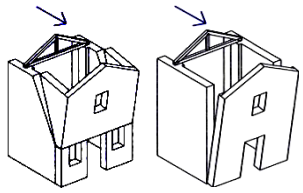
Comparació amb el resultat obtingut amb l'anàlisi d'índex de vulnerabilitat

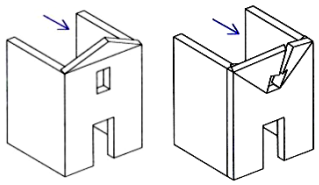
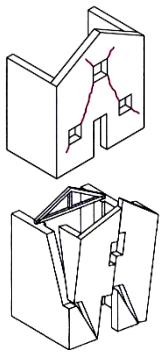
Comparant els resultats amb els obtinguts amb els índex de vulnerabilitat, veiem que l'acceleració última obtinguda amb aquest mètode és més baixa que les obtingudes macroelement per macroelement. Això també és consistent amb la teoria, ja que l'índex de vulnerabilitat analitza el global de l'església, i l'estructura col·lapsaria per a l'acceleració d'activació més baixa de qualsevol dels macroelements que hi tenen un paper fonamental.

4.3 SANTA MARIA DE LA SEU D'URGELL

4.3.1 Mètode dels índex de vulnerabilitat

A partir de l'observació *in situ* de l'edifici, s'aplica la Guia. Hi ha nou macroelements i vint-i-tres mecanismes. Com abans, es mostra l'exemple de la façana, el detall amb la resta de macroelements, amb els seus respectius mecanismes, es pot consultar als annexes.

<table>
<tr><th colspan="3">Macroelement: FAÇANA</th></tr>
<tr><td rowspan="2">Mecanisme 1: Bolcament de la façana
  </td><td>Mesures antisísmiques
- A un extrem de la façana hi ha un edifici adjacent
- Bona qualitat de la unió entre la gaçana i les parets laterals</td><td>Indicadors de vulnerabilitat
- Cap dels indicats</td></tr>
<tr><td>Efectivitat: Mitja, l'edifici és tangent, no suporta empentes.
$efectivitat = 2$</td><td>Efectivitat:
- Cap, la volta interior és de canó i no es recolza contra la façana. Als extrems laterals hi ha dues torres sense obertures laterals que proporcionen una bona unió de la nau amb les parets.
$efectivitat = 1$</td></tr>
<tr><td colspan="3">Paràmetres del mecanisme 1</td></tr>
<tr><td>$\rho_k = \rho_1 = 1$</td><td>$v_{kp} = v_{1p} = 3$</td><td>$v_{ki} = v_{1i} = 0$</td></tr>
<tr><td colspan="3">Dany pel mecanisme 1
Tot i la restauració de l¦església, de la banda del claustre s'observa una esquerda que pot estar originada per aquest mecanisme.
$d_1 = 2$</td></tr>
</table>

Mecanisme 2: Dany a la capçalera de la façana 	Mesures antisísmiques - No hi ha mesures específiques	Indicadors de vulnerabilitat: - Presència d'obertures: dues files de finestres - Presència d'un cimbori que es recolza, d'una banda, a la façana
	Efectivitat: Cap, per sobre de la unió entre façana i muralla, sí que es pot produir el bolcament. $efectivitat = 0$	Efectivitat: Alta $efectivitat = 2$
Paràmetres del mecanisme 2		
$\rho_k = \rho_2 = 1$	$v_{kp} = v_{2p} = 0$	$v_{ki} = v_{2i} = 3$
Dany pel mecanisme 2 L'estructura ha estat restaurada i no presenta esquerdes estructurals. $d_2 = 1$		
Mecanisme 3: Efectes de tallant a la façana 	Mesures antisísmiques - De la banda sud hi ha un edifici adjacent	Indicadors de vulnerabilitat - Presència de múltiples obertures: Dues files de finestres i la porta a la nau central i portes i finestres a les naus laterals.
	Efectivitat: Mitja, la banda nord no té cap recolzament extern. $efectivitat = 2$	Efectivitat: Alta, les obertures son nombroses, tot i que els elements entre elles no siguin esvelts. $efectivitat = 3$
Paràmetres del mecanisme 3		
$\rho_k = \rho_3 = 1$	$v_{kp} = v_{3p} = 2$	$v_{ki} = v_{3i} = 3$
Dany pel mecanisme 3		

La façana ha estat restaurada, tot i així s'aprecien algunes antigues esquerdes a les obertures. $$d_3 = 1$$

Taula 4.15 Detall del l'estudi del mètode dels índex per a la façana de La Seu

Les taules contenen el resum dels resultats.

índex de vulnerabilitat	i_v	0,39
índex de dany	i_d	0,26
acceleració límit dany (a/g)	a_{SLD}	0,05
acceleració límit últim (a/g)	a_{SLU}	0,17

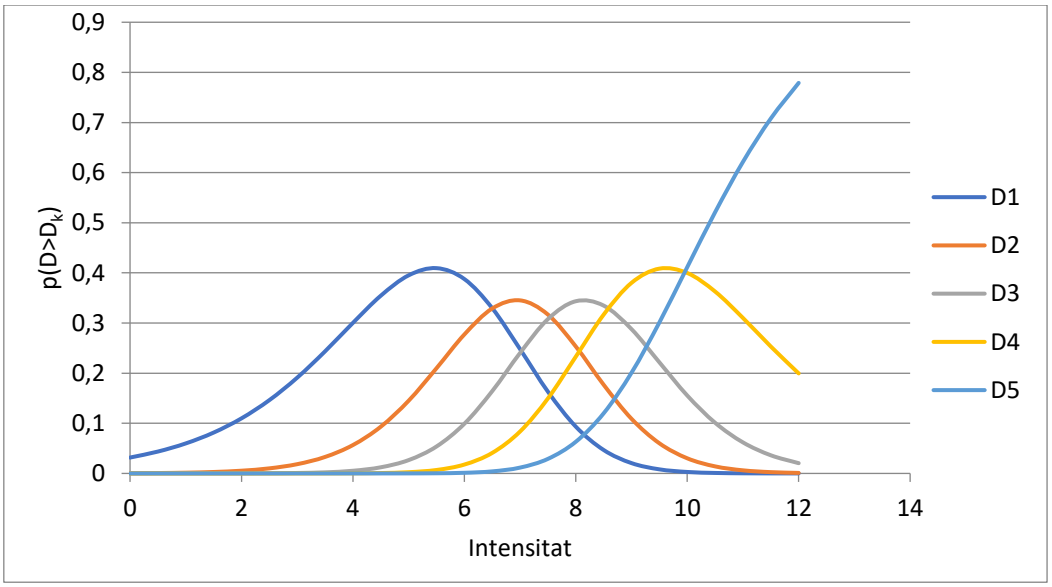
Taula 4.16 Taula resum dels resultats del mètode dels índex a La Seu

		Número del macroelement (k)	Nombre de mesures antisísmiques	efectivitat mesures antisísmiques	vkp	nombre d'indicadors de vulnerabilitat	efectivitat indicadors de vulnerabilitat
FAÇANA	Bolcament façana	1	2	2	3	0	0
	Capçalera façana	2	0	0	0	2	2
	Tallant façana	3	1	2	2	1	3
	Vibració nau central	4	2	2	3	1	2
NAU CENTRAL	Tallant parets nau central	5	2	3	3	2	2
	Columnata nau central	6	1	3	3	1	2
	Volta nau central	7	0	0	0	1	1
NAUS LATERALS	Voltes naus laterals	8	1	2	2	0	0
	Coberta naus laterals i central	9	0	0	0	1	1
TRANSSEPTE	Bolcament transsepte	10	1	3	3	1	1
	Tallant parets transsepte	11	1	3	3	0	0
	Voltes transsepte	12	0	0	0	1	1
	Coberta transsepte	13	0	0	0	1	1
ABSIS	Bolcament absis	14	1	3	3	1	2
	Tallant parets absis	15	2	2	3	2	2
	Volta absis	16	1	2	2	0	0
	Coberta absis	17	0	0	0	1	1
CAPELLES	Bolcament capelles	18	1	3	3	1	1
	Tallant parets capelles	19	1	3	3	1	1
	Voltes capelles	20	1	3	3	0	0
CIMBORI	Cimbori	21	2	2	3	1	3
TORRE i CAMPANAR	Torre i campanar	22	2	2	3	1	2
EDIFICIS ADJACENTS	Edificis adjacents	23	1	3	3	1	2

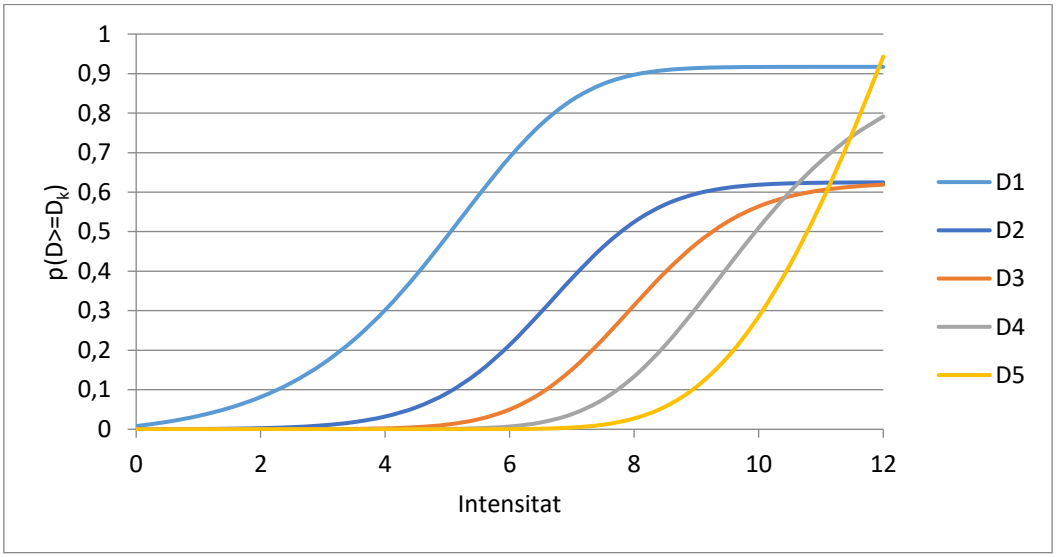
Taula 4.17 Taula dels índex de vulnerabilitat de La Seu

A partir d'aquests valors podem obtenir les corbes de fragilitat.

4.3.1.1 Corbes de fragilitat



Taula 4.18 Probabilitat dels diferents nivells de dany a La Seu



Taula 4.19 Probabilitat acumulada dels diferents nivells de dany a La Seu

Si comparem aquests valors amb la intensitat màxima històrica, 7, podem observar que la probabilitat de sofrir dany D2 és la més alta, del 35%, mentre que la de sofrir danys D1 i D3 és la mateixa, 24%. Això fa esperar que aquest sigui el dany esperat a l'església, però la inspecció visual dona un nivell de dany menor que aquest. Això pot ser degut a les reformes posteriors.

4.3.2 Mètode de l'anàlisi límit cinemàtic

NCSE-02		EC-08	
ρ	1,3	ϒ	1,3
a_b	0,06	a_{gR}	0,113
S	1,6	S	2
K	1	K	1

Taula 4.20 Dades de La Seu d'Urgell

Degut a la geometria de l'església, aquest cas és més senzill que el de Poblet, la secció és simètrica i només hi ha tres naus. Les voltes, tant a la nau central com a les laterals, son de canó.

Els mecanismes estudiats, per macroelements, son:

- Pel macroelement de la façana:
  - Bolcament de la façana sencera
  - Bolcament de la part superior de la façana
- Pel macroelement de la nau central
  - Vibració transversal de la nau
- Pel macroelement de les naus laterals:
  - Estabilitat de la volta de la nau lateral nord en funció de la deformació dels murs que la suporten, com hi ha simetria, l'estudi serveix per les dues naus laterals.

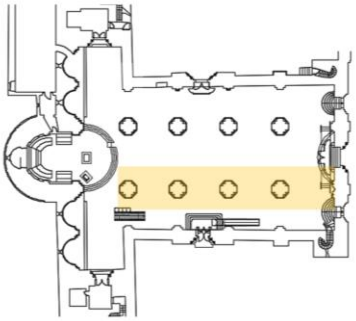
4.3.2.1 Façana

Taula 4.21 Mecanismes de bolcament de la façana de La Seu

La Guia presenta dos mecanismes de bolcament a la façana, bolcament de la façana completa i bolcament de la part superior de la façana. Com no hi ha cap element extern a la façana, seran aquests els que es consideraran.

Es considera una càrrega vertical que actua sobre la façana provinent del pes de part de la coberta. No hi actuen forces horitzontals que afavoreixen el bolcament.

4.3.2.2 Nau central



Taula 4.22 Situació del mur que suporta la volta de la nau central

Les característiques de la volta de la nau central son

les de la taula.

llum	8,68m
f	3,8m
L	7,11m
t	0,51m

Taula 4.23 Característiques geomètriques de la volta central de La Seu

D'acord amb les de l'apartat 4.1 obtenim els valors de les càrregues vertical i horitzontal introduïdes per la volta, considerant que el pes del replè es suma a la càrrega vertical de la volta.

H	16,3 KN
V	179,7 KN

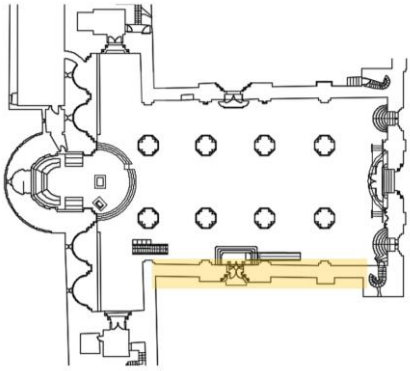
Taula 4.24 Valors de les càrregues introduïdes per la volta central

A partir de les expressions de l'apartat 4.1 obtenim la deformació horitzontal màxima de la volta.

d_u	43,4cm

Taula 4.25 Valor límit de la volta de la nau central

4.3.2.3 Nau lateral



Taula 4.26 Situació del mur que suporta la nau lateral

Les característiques de la volta son les de la 4.27.

llum	5,9m
f	2,85m
L	7,11m
t	0,49m

Taula 4.27 Característiques geomètriques de la volta de la nau lateral de La Seu

Les càrregues que es tenen en compte son les introduïdes per la volta lateral nord, considerant el pes del replè en la vertical.

V	112,7KN
H	31,4KN

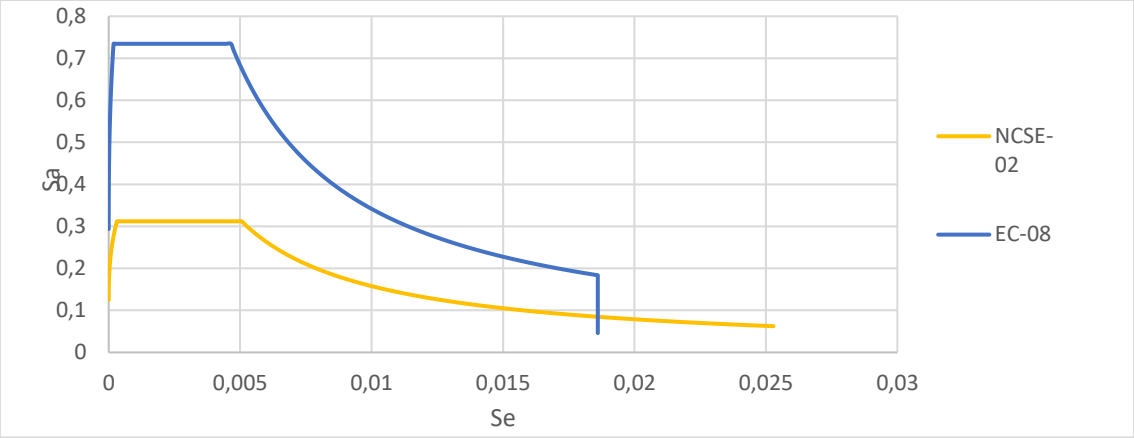
Taula 4.28 Valors de les càrregues introduïdes per la volta lateral

El desplaçaments límit de la volta son

d_u	29,5cm

Taula 4.29 Valors límit de la volta lateral nord

4.3.3 Anàlisi de resultats



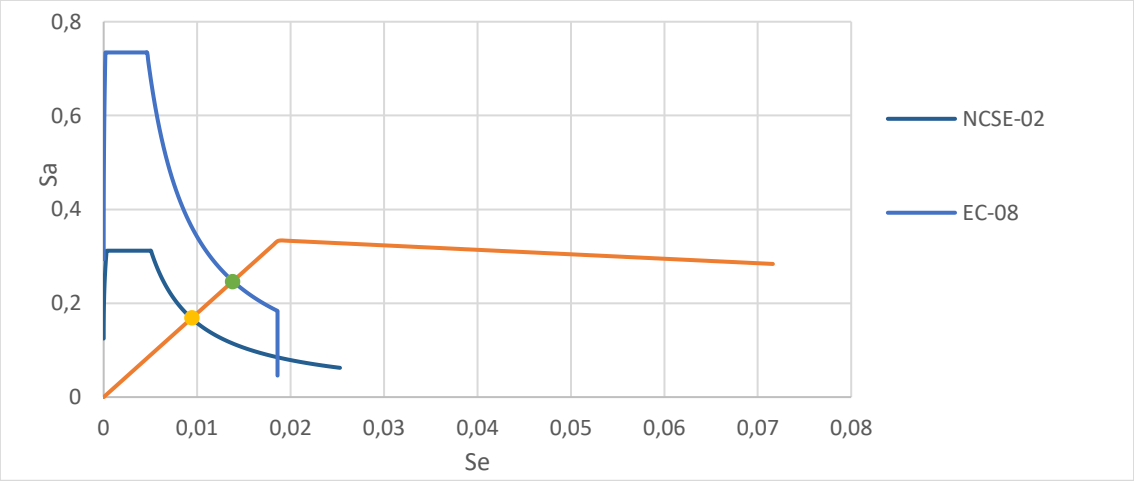
Taula 4.30 Espectres de resposta a La Seu

Com en el cas de Poblet, l'espectre de resposta de la normativa EC-08 dona una major acceleració màxima i NCSE-02 dona desplaçaments més grans.

Mecanismes	**Valors últims**	
	d_u	a_u
Bolcament façana sencera	7cm	0,28g
Bolcament part superior de la façana	8cm	1,35g
Mur nau central	7cm	2,03g
Mur exterior nau lateral	4cm	0,23g

Taula 4.31 Mecanismes per a La Seu d'Urgell

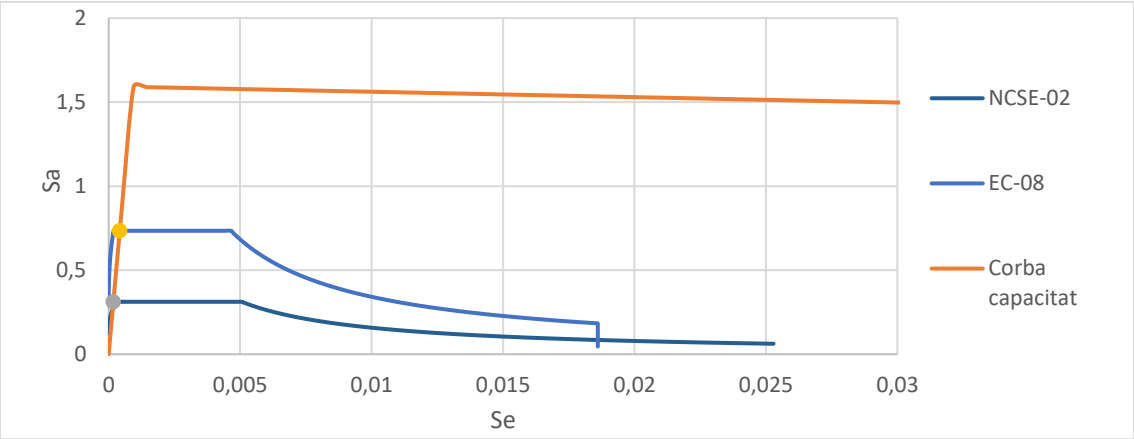
Façana



Taula 4.32Punts d'acompliment pel bolcament de la façana sencera

A diferència dels resultats de Poblet, la façana de La Seu presenta un comportament molt menys rígid. Tot i que les corbes es tallen a la branca elàstica, si comparem les acceleracions màximes

de les corbes, en aquest cas l'acceleració del punt d'activació del mecanisme és menor que les màximes dels espectres de resposta.



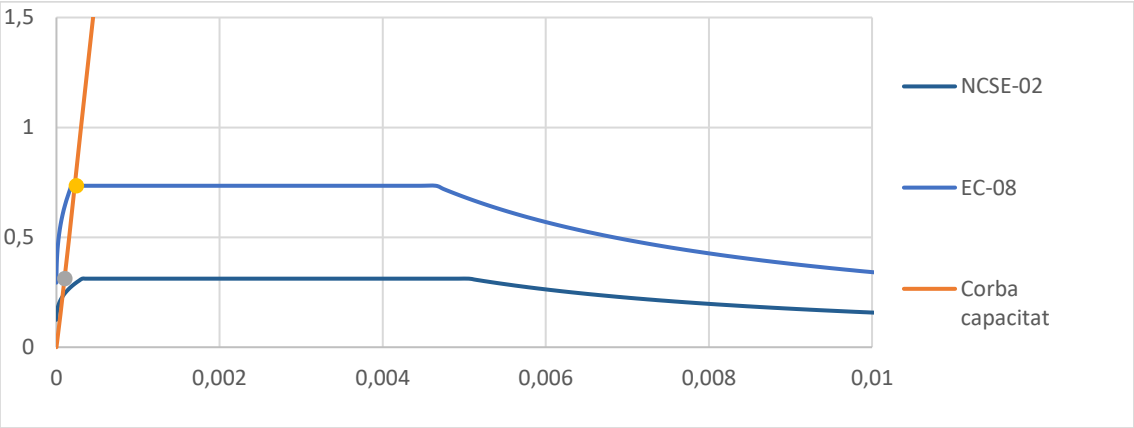
Taula 4.33 Punts d'acompliment per al bolcament de la part superior de la façana

Com abans, veiem que l'acceleració d'activació del mecanisme és més gran si prenem només la part superior de la façana, és a dir, es redueix l'esveltesa de l'element. El mecanisme que activarà la fallida de la volta serà també el del bolcament de la façana sencera.

No és necessari aplicar els mètodes de la Circolare i els punts d'acompliment són les interseccions entre les corbes.

El dany que s'assoleix per a tots els punts d'acompliment és lleu.

Nau central



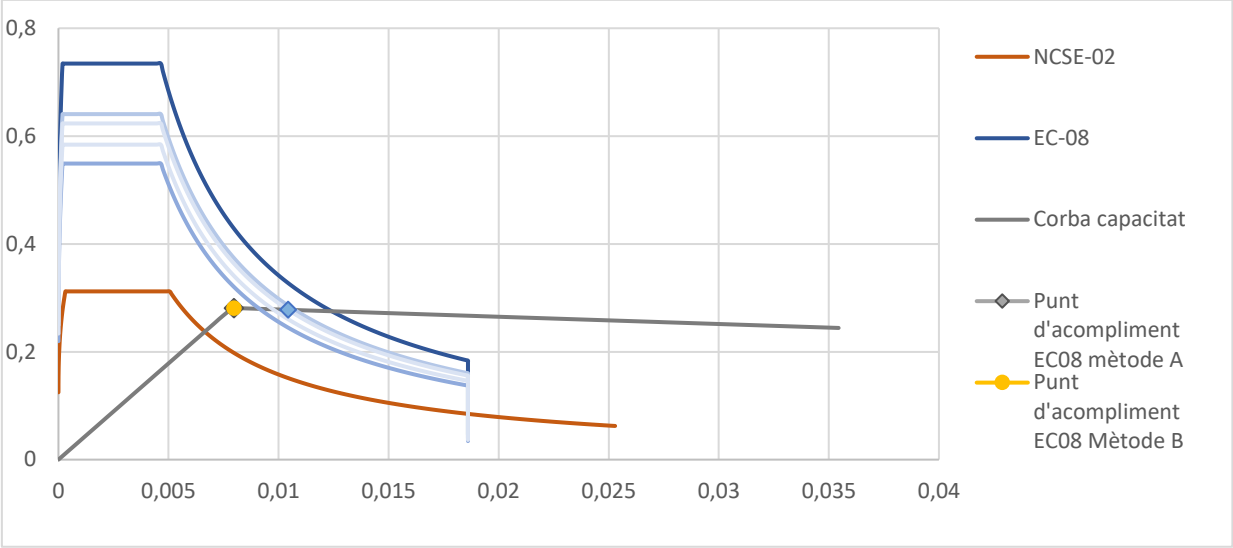
Taula 4.34 Punts d'acompliment per al mur de la nau central

Podem observar que el mur lateral de la nau central també és un element amb una gran rigidesa. En aquest cas no s'ha considerat el pes del replè, que com s'ha vist, és una hipòtesi més desfavorable que considerar-lo.

Les corbes es tallen a la branca elàstica de la corba de capacitat. El dany obtingut també és lleu.

Ara es pot fer la comparació amb els valors dels desplaçaments últims de la volta. Com abans, quan es produeix la fallida del mur, la volta encara és estable.

Volta nau lateral



Taula 4.35 Punts d'acompliment per al mur exterior

De tots els que s'han estudiat, aquest presenta el cas més interessant. És l'únic en el que la intersecció de les corbes es dona a la branca no lineal per a un dels espectres de resposta.

Com la intersecció entre la corba de capacitat i l'espectre NCSE-02 es dona a la branca elàstica, el punt d'acompliment és el d'intersecció.

Per trobar el punt d'acompliment per a l'espectre EC-08 s'apliquen els mètodes A i B.

Per al mètode B s'ha pres una tolerància d'1mm. Han estat necessàries cinc iteracions per arribar-hi.

Els punts d'acompliment resultants es poden veure a la figura. La gran diferència entre aquest element i la resta, per a donar uns resultats tan dispars, és la seva esveltesa.

Comparant els valors obtinguts amb els límits de la volta, es torna a comprovar que la volta no col·lapsa per al desplaçament últim del mur.

Comparació amb el mètode dels índex de vulnerabilitat

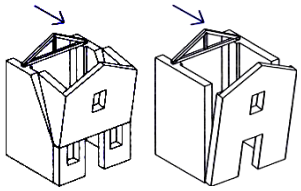
Comparant els resultats amb els obtinguts amb els índex de vulnerabilitat, veiem, curiosament, que l'acceleració última obtinguda és mes gran que la del cas de Poblet, en canvi, hem vist que els elements estudiats tenen més vulnerabilitat sísmica. Comparant en particular l'acceleració

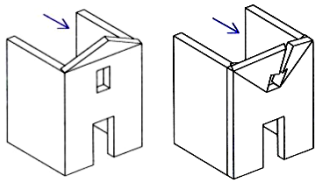
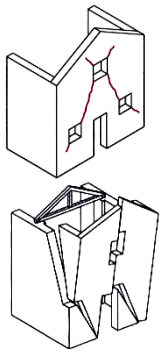
última obtinguda amb els índex de vulnerabilitat i la del mur exterior, que s'ha vist que és especialment sensible, veiem que l'acceleració dels índex encara és més petita. Això pot ser degut al caire aproximat dels càlculs amb índex de vulnerabilitat, però també és possible que hi hagi presents elements de l'estructura encara més sensibles al sisme que els murs exteriors.

4.4 SANT MARIA DE VILABERTRAN

4.4.1 Mètode dels índex de vulnerabilitat

A partir de l'observació de l'edifici i aplicant la guia, trobem vuit macroelements i vint-i-dos mecanismes. La resta dels mecanismes es troben detallats als annexes.

<table>
<tr><td colspan="3">Macroelement: FAÇANA</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Mecanisme 1: Bolcament de la façana
  </td><td>Mesures antisísmiques
- A un extrem de la façana hi ha un edifici adjacent
- Bona qualitat de la unió entre la gaçana i les parets laterals</td><td>Indicadors de vulnerabilitat
- Cap dels indicats</td></tr>
<tr><td>Efectivitat: Mitja, l'edifici és tangent, no suporta empentes.
$efectivitat = 2$</td><td>Efectivitat:
- Cap, la volta interior és de canó i no es recolza contra la façana. Als extrems laterals hi ha dues torres sense obertures laterals que proporcionen una bona unió de la nau amb les parets.
$efectivitat = 1$</td></tr>
<tr><td colspan="3">Paràmetres del mecanisme 1</td></tr>
<tr><td>$\rho_k = \rho_1 = 1$</td><td>$v_{kp} = v_{1p} = 3$</td><td>$v_{ki} = v_{1i} = 0$</td></tr>
<tr><td colspan="3">Dany pel mecanisme 1</td></tr>
</table>

<table>
<tr><td colspan="3">Tot i la restauració de l¡església, de la banda del claustre s’observa una esquerda que pot estar originada per aquest mecanisme.
$d_1 = 2$</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Mecanisme 2: Dany a la capçalera de la façana
  </td><td>Mesures antisísmiques
- No hi ha mesures específiques</td><td>Indicadors de vulnerabilitat:
- Presència d’obertures: dues files de finestres
- Presència d’un cimbori que es recolza, d’una banda, a la façana</td></tr>
<tr><td>Efectivitat: Cap, per sobre de la unió entre façana i muralla, sí que es pot produir el bolcament.
$efectivitat = 0$</td><td>Efectivitat: Alta
$efectivitat = 2$</td></tr>
<tr><td colspan="3">Paràmetres del mecanisme 2</td></tr>
<tr><td>$\rho_k = \rho_2 = 1$</td><td>$v_{kp} = v_{2p} = 0$</td><td>$v_{ki} = v_{2i} = 3$</td></tr>
<tr><td colspan="3">Dany pel mecanisme 2
L’estructura ha estat restaurada i no presenta esquerdes estructurals.
$d_2 = 1$</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Mecanisme 3: Efectes de tallant a la façana
  </td><td>Mesures antisísmiques
- De la banda sud hi ha un edifici adjacent</td><td>Indicadors de vulnerabilitat
- Presència de múltiples obertures: Dues files de finestres i la porta a la nau central i portes i finestres a les naus laterals.</td></tr>
<tr><td>Efectivitat: Mitja, la banda nord no té cap recolzament extern.
$efectivitat = 2$</td><td>Efectivitat: Alta, les obertures son nombroses, tot i que els elements entre elles no siguin esvelts.
$efectivitat = 3$</td></tr>
<tr><td colspan="3">Paràmetres del mecanisme 3</td></tr>
</table>

$\rho_k = \rho_3 = 1$	$v_{kp} = v_{3p} = 2$	$v_{ki} = v_{3i} = 3$
Dany pel mecanisme 3 La façana ha estat restaurada, tot i així s'aprecien algunes antigues esquerdes a les obertures. $d_3 = 1$		

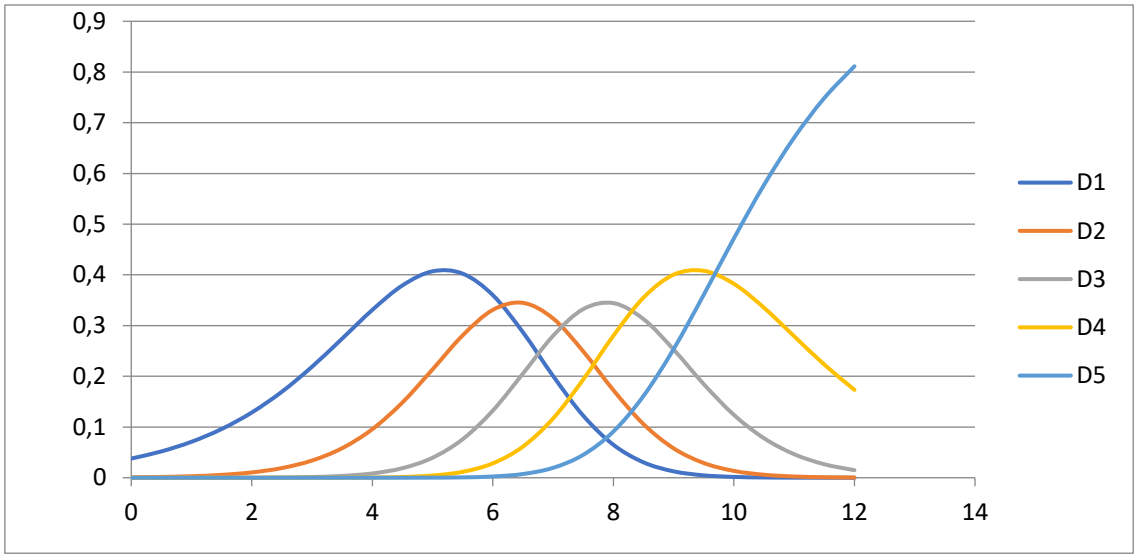
Taula 4.36 Mecanismes de Vilabertran

índex de vulnerabilitat	i_v	0,39
índex de dany	i_d	0,26
acceleració límit dany (a/g)	a_{SLD}	0,05
acceleració límit últim (a/g)	a_{SLU}	0,17

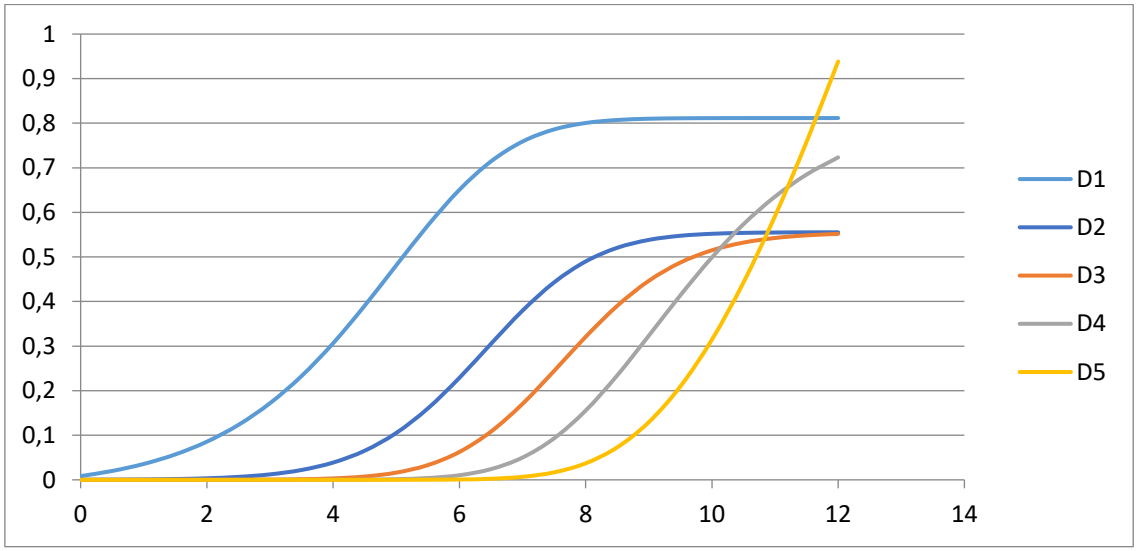
Taula 4.37 Índex obtinguts a Vilabertran

		Número del macroelement (k)	Nombre de mesures antisísmiques	efectivitat mesures antisísmiques	vkp	nombre d'indicadors de vulnerabilitat	efectivitat indicadors de vulnerabilitat
FAÇANA	Bolcament façana	1	2	2	3	2	1
	Capçalera façana	2	0	0	0	0	0
	Tallant façana	3	1	2	2	1	2
	Vibració nau central	4	0	0	0	1	2
NAU CENTRAL	Tallant parets nau central (i naus la	5	1	2	2	2	1
	Columnata nau central	6	2	2	3	1	2
	Volta nau central	7	0	0	0	0	0
NAUS LATERALS	Voltes naus laterals	8	1	3	3	1	1
	Coberta naus laterals i central	9	0	0	0	1	1
TRANSSEPTE	Bolcament transsepte	10	1	3	3	2	2
	Tallant parets transsepte	11	2	2	3	1	2
	Voltes transsepte	12	1	2	2	0	0
	Coberta transsepte	13	0	0	0	1	1
ABSIS	Bolcament absis	14	1	1	1	1	1
	Tallant parets absis	15	1	1	1	0	0
	Volta absis	16	0	0	0	0	0
	Coberta absis	17	0	0	0	1	1
CAPELLES	Bolcament capelles	18	1	3	3	1	1
	Tallant parets capelles	19	2	2	3	2	2
	Voltes capelles	20	0	0	0	1	1
EDIFICIS ADJACENTS	Edificis adjacents	21	0	0	0	1	2
CAMPANAR TORRE	Campanar torre	22	1	2	2	2	3

Taula 4.38 Índex per a Vilabertran



Taula 4.39 Probabilitat de sofrir un determinat nivell de dany a Vilabertran



Taula 4.40 Probabilitat acumulada dels diferents nivells de dany a Vilabertran

Com en el cas de la Seu, Vilabertran també ha estat sotmesa als grans terratrèmols històrics. Consultant a les taules la probabilitat de dany d'un sisme d'intensitat 7, veiem que la probabilitat de sofrir dany D2 és la més alta que la de sofrir danys D3. Això fa esperar que aquest sigui el dany esperat a l'església. Com en el cas de La Seu, el dany observat és menor, però no es pot concloure que sigui perquè el mètode no sigui acurat per a aquest cas, ja que pot ser degut reformes posteriors.

4.4.2 Mètode de l'anàlisi límit cinemàtic

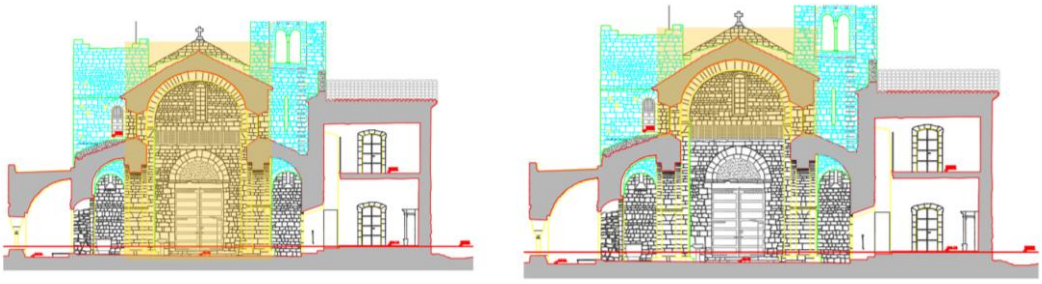
NCSE-02		EC-08	
ρ	1,3	ϒ	1,3
a_b	0,08	a_{gR}	0,116
S	1,28	S	2
K	1	K	1

Com en el cas de La Seu, la planta i l'alçat son simètrics i l'església compta amb tres naus amb voltes de canó. No hi ha capelles laterals.

Els mecanismes estudiats, per macroelements, son:

- Pel macroelement de la façana:
  - Bolcament de la façana sencera
  - Bolcament de la part superior de la façana
- Pel macroelement de la nau central
  - Vibració transversal de la nau
- Pel macroelement de les naus laterals:
  - Estabilitat de la volta de la nau lateral nord en funció de la deformació dels murs que la suporten, l'estudi serveix per les dues naus laterals.

4.4.2.1 Façana



Taula 4.41 Mecanismes de bolcament de la façana

Vilabertran sí que té un element singular a la façana que li serviria de contrafort en cas de sisme, una mena de pòrtic a banda i banda de la porta, tot i que el seu efecte no s'ha tingut en compte en aquests càlculs. Es consideraran els mecanismes de bolcament de la façana sencera i de bolcament de la part superior de la façana.

Es considera una càrrega vertical que actua sobre la façana provinent del pes de part de la coberta. No hi actuen forces horitzontals que afavoreixen el bolcament.

Nau central

Les característiques de la volta de la nau central son

llum	5,87m
f	3,9
L	6,44
t	0,57

Taula 4.42 Característiques geomètriques de la volta central de Vilabertran

Les càrregues de la volta

V	157,8KN
H	14,9KN

Taula 4.43 Valors de les càrregues introduïdes per la volta central

Els desplaçaments últims de la volta central son

d_u	29cm

Taula 4.44 Valors límit de la volta de la nau central

Nau lateral nord

Les característiques de la volta son

llum	2m
f	1,2m
L	6,44m
t	0,33

Taula 4.45 Característiques geomètriques de la volta de la nau lateral

Les càrregues que es tenen en compte son les introduïdes per la volta lateral nord, en aquest cas sí que es considera una càrrega de coberta, no hi ha replè sobre la volta.

V	62,9
H	19,84
Q	110KN

Taula 4.46 Valors de les càrregues introduïdes per la volta lateral

El desplaçaments límit de la volta son

d_u	10cm

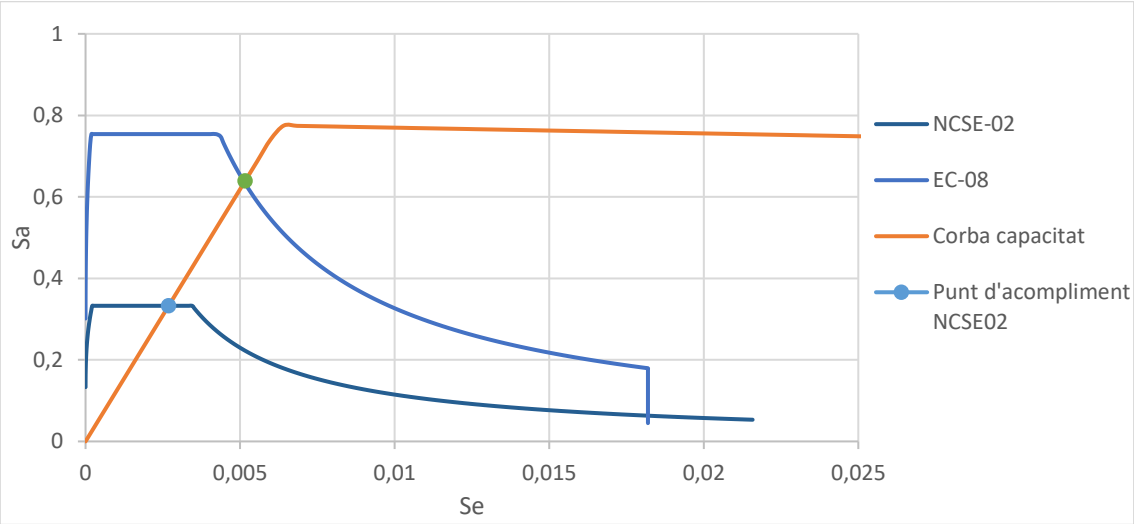
Taula 4.47 Valors límit de la volta lateral

4.4.2.2 ANÀLISI DELS RESULTATS

Igual que en els dos casos anteriors, la normativa EC08 dona una acceleració màxima més gran i la de NCSE02, desplaçaments majors.

Mecanismes	**Valors últims**	
	d_u	a_u
Bolcament façana sencera	9cm	0,65g
Bolcament part superior de la façana	6cm	0,52g
Mur nau central	10cm	5,73g
Mur exterior nau lateral	7cm	1,37g

Façana



Taula 4.48 Punts d'acompliment per al bolcament de la façana sencera

A Vilabertran veiem que la corba de capacitat de la façana sencera te una elasticitat entre la de Poblet i la de La Seu. Com en les altres esglésies, l'acceleració d'activació és molt més petita si considerem la façana sencera que si considerem només la part superior, serà aquesta l'acceleració d'activació de la fallida de la façana per bolcament.

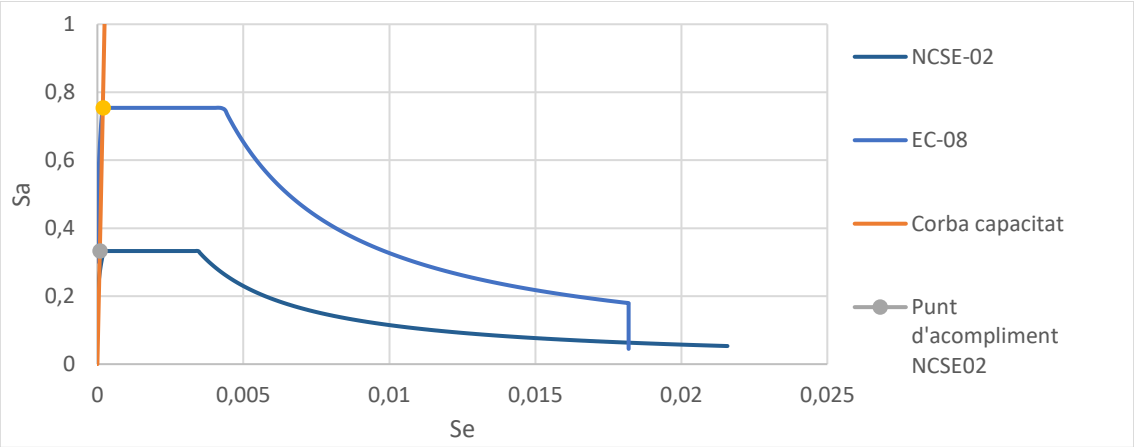
En qualsevol cas, les interseccions es donen a la branca elàstica de la corba de capacitat i el dany resultant és lleu.

Nau central

Aquest és el valor més elevat que s'ha trobat en tots els murs estudiats. Tot i ser esperable que el resultat sigui un corba de gran rigidesa, aquest valor sembla massa gran.

Una altra vegada, s'arriba abans al desplaçament últim del mur que de la volta.

Volta nau lateral



Taula 4.49 Punts d'acompliment per al mur exterior

A diferència de La Seu, aquest mur és de molta menys alçada, per tant, com la seva esveltesa és menor, els resultats obtinguts tornen a ser els d'un element molt rígid. El dany és lleu.

La volta no col·lapsa per al desplaçament últim del mur.

4.4.2.3 Comparació amb el mètode dels índex de vulnerabilitat

Si mirem les acceleracions d'activació obtingudes per als mecanismes estudiats, observem que son totes considerablement més grans que l'acceleració del mètode dels índex de vulnerabilitat. Com a Poblet i a la Seu, caldria estudiar els altres elements de l'església per fer-se una idea de quina és l'acceleració d'activació de l'element més sensible i poder avaluar la bondat del valor obtingut amb la Guia.

Comparant les acceleracions obtingudes amb el mètode dels índex, l'església que resulta més sensible és Poblet, mentre que si observem els resultats dels mètodes d'anàlisi límit, l'església més vulnerable és clarament La Seu d'Urgell.

Ordenant els índex de dany, en canvi, els resultats sí que estan d'acord amb el que s'ha vist en les visites a les esglésies. L'índex de dany més gran és el de La Seu, després el de Vilabertran i per últim el de Poblet. Podem dir que en aquest sentit, la Guia ofereix una eina fiable de comparació, com és un dels seus objectius.

5 CONCLUSIONS

Conclusions respecte a l'anàlisi dels índex de vulnerabilitat

El mètode compleix les funcions bàsiques per a les que ha estat ideat: És una eina d'aplicació senzilla i és útil per examinar un gran nombre d'esglésies sense necessitat de càlculs complexes ni assajos invasius.

A més, els resultats que s'han obtingut coincideixen amb el que es pot observar i amb els resultats de l'anàlisi de manera qualitativa. Per tant, també compleix la funció d'eina de comparació entre les vulnerabilitats de diferents esglésies.

L'anàlisi dels índex de dany també concorda amb l'observació, per tant, es por dir que per a fer una anàlisi qualitativa, l'ajust dels paràmetres per a Itàlia és d'aplicació, tot i que s'hauria de comptar amb més exemples per afirmar-ho.

Tot i així, a l'hora d'aplicar el mètode s'han detectat certes deficiències que es podrien corregir en versions futures, com el fet de no tenir en compte les possibles asimetries en els elements, o la falta de mecanismes específics per a tots els elements de l'església, per exemple, la per la volta central es diferencia entre la fallida per tallant i la fallida per bolcament del mur, en canvi aquesta distinció no existeix per les altres voltes.

El mètode de la Guia, a més, és molt útil per destriar quins son els elements més sensibles i per quin mecanisme fallaran.

Conclusions respecte a l'anàlisi límit

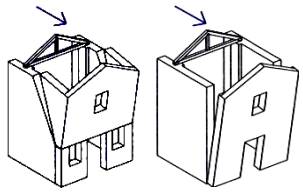
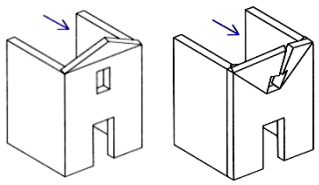
Tot i que s'han obtingut valors de l'ordre d'aquells dels espectres de resposta, en alguns casos el s'ha arribat a valors de l'acceleració massa grans. Tot i així, els resultats obtinguts es poden emprar com a mínim, com a element de comparació. En aquest sentit, s'han fet observacions molt interessants.

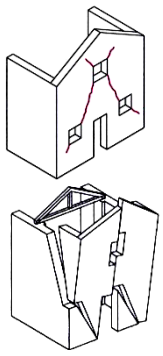
- El factor que més influeix la vulnerabilitat dels elements verticals és l'esveltesa, molt més que la càrrega.
- Els arcs i les voltes apuntats tenen més resistència sísmica que els arcs de mig punt i les voltes de canó.
- En general, la fallida de les voltes es produeix abans pel bolcament del mur que per la seva desestabilització geomètrica

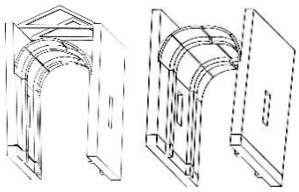
- Les voltes poden arribar a partir grans deformacions i presentar grans esquerdes i estar encara molt lluny del desequilibri
- Tret de per valors molt grans, el replè de les voltes actua com a càrrega estabilitzadora
- Les façanes bolcaran senceres, abans que els seus trams superiors si el seu comportament és el d'un sòlid rígid.

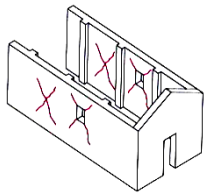
ANNEXE I. TAULES DELS ÍNDEX DE VULNERABILITAT

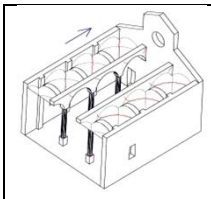
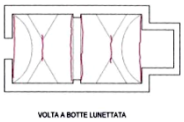
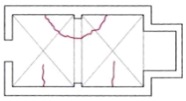
POBLET

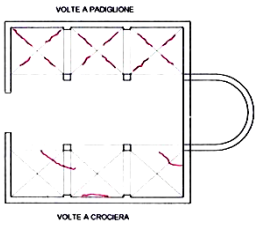
Macroelement: FAÇANA		
Mecanisme 1: Bolcament de la façana 	Mesures antisísmiques - Edificis col·lindants, la façana original està coberta per una façana barroca unida a la muralla exterior. - Bons elements d'unió entre la façana i les parets de les naus.	Indicadors de vulnerabilitat - Cap dels indicats
	Efectivitat: Alta, és molt difícil el bolcament complet de la façana quan està reforçada frontalment. $efectivitat = 2$	Efectivitat: Nul·la, la volta no es recolza sobre la façana. $efectivitat = 0$
Paràmetres del mecanisme 1		
$\rho_k = \rho_1 = 1$	$v_{kp} = v_{1p} = 3$	$v_{ki} = v_{1i} = 0$
Dany pel mecanisme 1 L'estructura no presenta afectació per aquest mecanisme. $d_1 = 0$		
Mecanisme 2: Dany a la capçalera de la façana 	Mesures antisísmiques - No hi ha mesures específiques	Indicadors de vulnerabilitat: - Presència d'una gran obertura: Rosetó
	Efectivitat: Cap, per sobre de la unió entre façana i muralla, sí que es pot produir el bolcament. $efectivitat = 0$	Efectivitat: Alta, la part exposada de la façana no té reforços $efectivitat = 3$

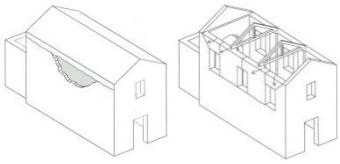
Paràmetres del mecanisme 2		
$\rho_k = \rho_2 = 1$	$v_{kp} = v_{2p} = 0$	$v_{ki} = v_{2i} = 3$
Dany pel mecanisme 2 L'estructura presenta esquerdes, però no dany estructural degut a aquest mecanisme. $d_2 = 1$		
Mecanisme 3: Efectes de tallant a la façana 	Mesures antisísmiques - Edificis adjacents: La façana barroca que uneix la façana original a la muralla	Indicadors de vulnerabilitat - Presència de grans obertures: Porta i rosetó
	Efectivitat: Mitja, només protegeix una part de la façana. $efectivitat = 2$	Efectivitat: Mitja, les obertures són grans en relació a la dimensió de la façana, però no és esvelta i els murs son gruixos. $efectivitat = 2$
Paràmetres del mecanisme 3		
$\rho_k = \rho_3 = 1$	$v_{kp} = v_{3p} = 2$	$v_{ki} = v_{3i} = 2$
Dany pel mecanisme 3 L'estructura presenta esquerdes importants a les obertures, el rosetó i la porta original. $d_3 = 2$		

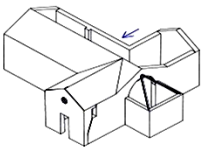
Macroelement: NAU CENTRAL		
Mecanisme 4: Vibració transversal de la nau 	Mesures antisísmiques - Presència d'arcbotants (paret sud) - Edificis adjacents: No n'hi ha, però les naus laterals actuen com a suport	Indicadors de vulnerabilitat - Presència de volta de canó que s'hi recolza
	Efectivitat: Baixa, només hi ha arcbotants d'una banda, i de	Efectivitat: Alta, històricament l'edifici ha tingut problemes de

	construcció tardana, deguda a problemes de deformació. $efectivitat = 1$	deformació i va haver de ser reforçat. $efectivitat = 2$
Paràmetres del mecanisme 4		
$\rho_k = \rho_4 = 1$	$v_{kp} = v_{4p} = 2$	$v_{ki} = v_{4i} = 2$
Dany pel mecanisme 4 Actualment, l'edifici no presenta danys estructurals per aquest mecanisme. $d_4 = 1$		
Mecanisme 5: Efectes de tallant a les parets de les naus (inclou naus laterals) 	Mesures antisísmiques - Maçoneria de qualitat, nau construïda en una sola fase. - Les naus laterals actuen com a suport	Indicadors de vulnerabilitat - Presència de finestres
	Efectivitat: Mitja, tot i les obertures de les finestres, els murs son molt gruixos $efectivitat = 2$	Efectivitat: Baixa, les finestres són petites i la coberta no és especialment pesada ni hi ha bigues que facin empenta. $efectivitat = 1$
Paràmetres del mecanisme 5		
$\rho_k = \rho_5 = 1$	$v_{kp} = v_{5p} = 2$	$v_{ki} = v_{5i} = 1$
Dany pel mecanisme 5 L'estructura presenta algunes esquerdes, tot i que no hi ha danys estructurals. $d_5 = 1$		
Mecanisme 6: Resposta longitudinal de la columnata	Mesures antisísmiques - Presència de fortes unions longitudinals - Presència d'unions de la façana amb la muralla que actuen con a contraforts	Indicadors de vulnerabilitat - Volta de la nau central pesada

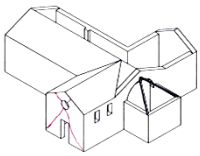
	Efectivitat: Alta, les columnes son molt gruixes i els elements d'unió entre elles, molt rígids $efectivitat = 2$	Efectivitat: Baixa, hi ha gran rigidesa longitudinal a les columnes. $efectivitat = 1$
Paràmetres del mecanisme 6		
$\rho_k = \rho_6 = 1$	$v_{kp} = v_{6p} = 3$	$v_{ki} = v_{6i} = 1$
Dany pel mecanisme 6 L'estructura no presenta afectació per aquest mecanisme. $d_6 = 0$		
Mecanisme 7: Esquerdes a la volta de la nau   	Mesures antisísimiques - Presència d'arcbotants	Indicadors de vulnerabilitat - Presència de càrrega concentrada al creuer, deguda al pes del cimbori
	Efectivitat: Baixa, només hi ha arcbotants de la banda sud. $efectivitat = 1$	Efectivitat: Mitja, el cimbori és de grans dimensions, però la volta és molt rígida i sense obertures ni irregularitats. $efectivitat = 2$
Paràmetres del mecanisme 7		
$\rho_k = \rho_7 = 1$	$v_{kp} = v_{7p} = 1$	$v_{ki} = v_{7i} = 2$
Dany pel mecanisme 7 L'estructura presenta esquerdes en diversos trams de la volta central. $d_7 = 2$		

Macroelement: NAUS LATERALS		
Mecanisme 8: Esquerdes a les voltes de les naus laterals  	Mesures antisísmiques - Presència de contraforts a la banda sud i del claustre a la banda nord.	Indicadors de vulnerabilitat - Cap dels indicats: No hi ha càrregues puntuals a la coberta, les voltes no son primes i no tenen obertures.
	Efectivitat: Alta, a més dels suports exteriors, la volta de les naus lateral cobreix poca llum i és molt rígida. $efectivitat = 3$	Efectivitat: Cap. $efectivitat = 0$

Paràmetres del mecanisme 8		
$\rho_k = \rho_8 = 1$	$v_{kp} = v_{8p} = 3$	$v_{ki} = v_{8i} = 0$
Dany pel mecanisme 8 L'estructura presenta esquerdes en diversos trams de les naus laterals. $d_8 = 2$		
Mecanisme 9: Coberta de les naus laterals i central 	Mesures antisísmiques - No es poden observar els mecanismes de la coberta	Indicadors de vulnerabilitat - La coberta no és especialment pesada
	Efectivitat: Considerem el cas més desfavorable, que no hi hagi mesures $efectivitat = 0$	Efectivitat: Baixa, no hi ha càrregues puntuals a la coberta $efectivitat = 1$
Paràmetres del mecanisme 9		
$\rho_k = \rho_9 = 1$	$v_{kp} = v_{9p} = 0$	$v_{ki} = v_{9i} = 1$
Dany pel mecanisme 9 No es pot observar el dany en aquest element, es suposa un valor sense dany estructural. $d_9 = 1$		

Macroelement: TRANSSEPTE		
Mecanisme 10: Bolcament de les façanes del transsepte 	Mesures antisísimiques: - Elements que suportin la façana: Tant a la façana nord com a la façana sud hi ha edificis adjacents	Indicadors de vulnerabilitat - Obertures a la façana: Portes i rosetons - A la façana nord, presència d'un campanar de paret a sobre. A la banda sud, presència d'una torre de campanar sobre la volta.
	Efectivitat: Alta, el bolcament queda molt impedit per la presència d'edificis adjacents, tot i que es podria produir a la part superior. $efectivitat = 3$	Efectivitat: Alta, degut a la presència dels campanars $efectivitat = 3$

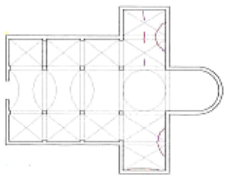
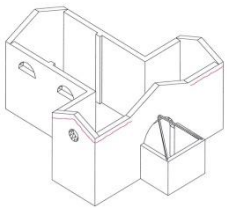
<table>
<tr><td colspan="3">Paràmetres del mecanisme 10</td></tr>
<tr><td>$\rho_k = \rho_{10} = 0{,}8$

Estructuralment, el col·lapse de les façanes del transsepte no implicaria el col·lapse de la resta de l'edifici, ja que la volta del creuer no s'hi recolza.</td><td>$v_{kp} = v_{10p} = 3$</td><td>$v_{ki} = v_{10i} = 3$</td></tr>
<tr><td colspan="3">Dany pel mecanisme 10
No s'aprecia afectació per aquest mecanisme.
$d_{10} = 0$</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Mecanisme 11: Efectes de tallant a les parets del transsepte
  </td><td>Mesures antisísmiques
- No hi ha mesures antisísmiques.</td><td>Indicadors de vulnerabilitat
- La volta és pesada i a més, a la banda sud hi ha el campanar
- Hi ha grans obertures per accedir a les naus laterals i les capelles.
- A més, la maçoneria, tot i ser molt gruixa, no és uniforme, hi ha vàries fases de construcció</td></tr>
<tr><td>Efectivitat: Cap

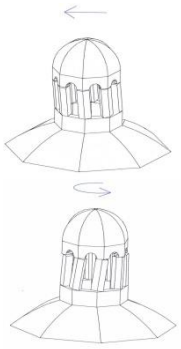
$efectivitat = 0$</td><td>Efectivitat: Alta, perquè els murs no son uniformes, hi ha vàries fases de construcció.

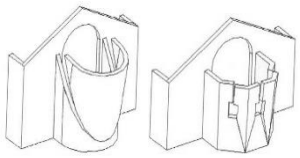
$efectivitat = 2$</td></tr>
<tr><td colspan="3">Paràmetres del mecanisme 11</td></tr>
<tr><td>$\rho_k = \rho_{11} = 1$

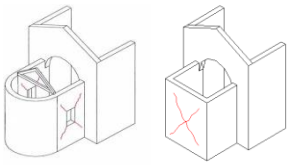
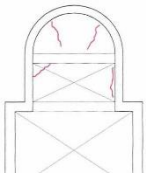
La fallida de les parets del transsepte implicaria la caiguda de la volta de la nau del creuer i la possible fallida de la volta central que suporta el cimbori. Per tant, no es minora el coeficient.</td><td>$v_{kp} = v_{12p} = 0$</td><td>$v_{ki} = v_{12i} = 3$</td></tr>
<tr><td colspan="3">Dany pel mecanisme 11
L'estructura presenta esquerdes degudes a aquest mecanisme, tot i que han estat reparades
$d_{11} = 2$</td></tr>
</table>

Mecanisme 12: Esquerdes a les voltes del transsepte 	Mesures antisísmiques - No hi ha mesures anitisísmiques	Indicadors de vulnerabilitat - Càrregues concentrades sobre la volta: campanar de paret al creuer nord i torre de campanar al creuer sud
	Efectivitat: Cap $efectivitat = 0$	Efectivitat: Alta, especialment la torre, és una càrrega important $efectivitat = 3$
Paràmetres del mecanisme 12		
$\rho_k = \rho_{12} = 1$ La fallida de la volta implicaria la possible fallida de la volta central que suporta el cimbori. No es minora el coeficient.	$v_{kp} = v_{13p} = 0$	$v_{ki} = v_{13i} = 3$
Dany pel mecanisme 12 L'estructura presenta esquerdes per aquest mecanisme, tot i que han estat reparades. $d_{12} = 2$		
Mecanisme 13: Coberta del transsepte 	Mesures antisísimiques - No es poden observar els mecanismes de la coberta	Indicadors de vulnerabilitat - La coberta no és especialment pesada
	Efectivitat: Considerem el cas més desfavorable, que no hi hagi mesures $efectivitat = 0$	Efectivitat: Baixa $efectivitat = 1$
Paràmetres del mecanisme 13		
$\rho_k = \rho_{13} = 0{,}6$ La fallida de la coberta no implica necessàriament la caiguda de la volta, en aquest cas, l'efecte sobre l'estructura global no seria greu.	$v_{kp} = v_{14p} = 0$	$v_{ki} = v_{14i} = 1$
Dany pel mecanisme 13 No es pot observar el mecanisme, es suposa una afectació sense dany estructural.		

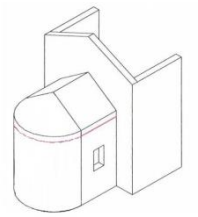
$d_{13} = 1$

Macroelement: CIMBORI		
Mecanisme 14: Esquerdes al cimbori, rotació o desplaçament 	Mesures antisísmiques - Cap	Indicadors de vulnerabilitat - Grans obertures - Càrrega de la coberta
	Efectivitat: Cap $efectivitat = 0$	Efectivitat: Alta, tot i que l'estructura principal és molt rígida, els pilars interns de les finestres son molt esvelts. $efectivitat = 3$
Paràmetres del mecanisme 14		
$\rho_k = \rho_{14} = 0{,}8$ Tot i el seu valor artístic, no és un element essencial de l'estructura, tot i que la seva fallida podria afectar a les voltes de les naus o el transsepte	$v_{kp} = v_{14p} = 0$	$v_{ki} = v_{14i} = 3$
Dany pel mecanisme 14 L'estructura no presenta afectació a nivell estructural per aquest mecanisme $d_{14} = 1$		

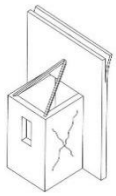
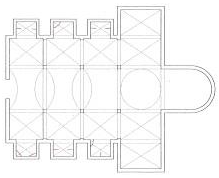
Macroelement: ABSIS		
Mecanisme 15: Bolcament de l'absis 	Mesures antisísmiques - Presència d'anells de reforçament: els murs concèntrics del deambulatori - Presència de capelles exteriors	Indicadors de vulnerabilitat - Grans obertures d'accés a les capelles - Empenta de les voltes
	Efectivitat: Alta, les capelles exteriors impedirien el bolcament $efectivitat = 3$	Efectivitat: Mitja, tot i les grans obertures d'accés a les capelles, els murs son molt gruixuts. $efectivitat = 2$

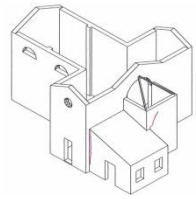
<table>
<tr><td colspan="3">Paràmetres del mecanisme 15</td></tr>
<tr><td>$\rho_k = \rho_{15} = 1$</td><td>$v_{kp} = v_{15p} = 3$</td><td>$v_{ki} = v_{15i} = 3$</td></tr>
<tr><td colspan="3">Dany pel mecanisme 15
No s’aprecia dany a nivell estructural per aquest mecanisme.
$d_{15} = 1$</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Mecanisme 16: Mecanismes de tallant a l’absis
  </td><td>Mesures antisísmiques
- Maçoneria de bona qualitat, en una sola fase de construcció
- Arcs de gran resistència sobre les obertures</td><td>Indicadors de vulnerabilitat
- Pes de la volta i de la coberta
- Grans obertures als murs per accedir a les capelles</td></tr>
<tr><td>Efectivitat: Alta, els murs son molt gruixuts.
$efectivitat = 2$</td><td>Efectivitat: Mitja, tot i les obertures, els murs presenten gran resistència.
$efectivitat = 1$</td></tr>
<tr><td colspan="3">Paràmetres del mecanisme 16</td></tr>
<tr><td>$\rho_k = \rho_{16} = 1$</td><td>$v_{kp} = v_{16p} = 3$</td><td>$v_{ki} = v_{16i} = 2$</td></tr>
<tr><td colspan="3">Dany pel mecanisme 16
No s’aprecia dany estructural degut a aquest mecanisme.
$d_{16} = 0$</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Mecanisme 17: Esquerdes a la volta de l’absis
  </td><td>Mesures antisísmiques
- Suports externs: Les capelles exteriors actuen com a contraforts</td><td>Indicadors de vulnerabilitat
- Cap dels indicats: No hi ha càrregues puntuals a la coberta, la volta no és prima i no te obertures.</td></tr>
<tr><td>Efectivitat: Alta, La volta, més, te uns nervis de reforç que van de la clau fins a la base.</td><td>Efectivitat: Cap.</td></tr>
<tr><td colspan="3">Paràmetres del mecanisme 17</td></tr>
<tr><td>$\rho_k = \rho_{17} = 1$

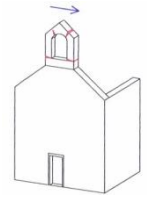
La fallida de la volta de l’absis implicaria la possible fallida de la volta central, i per tant, es un mecanisme molt important en l’estructura global de l’edifici.</td><td>$v_{kp} = v_{17p} = 2$</td><td>$v_{ki} = v_{17i} = 0$</td></tr>
<tr><td colspan="3">Dany pel mecanisme 17
L’estructura presenta una esquerda important a la base de la volta.
$d_{17} = 2$</td></tr>
</table>

Mecanisme 18: Coberta de l'absis 	Mesures antisísmiques - No es poden observar els mecanismes de la coberta	Indicadors de vulnerabilitat - La coberta no és especialment pesada
	Efectivitat: Es considera el cas més desfavorable, que no n'hi hagi cap $efectivitat = 0$	Efectivitat: Baixa $efectivitat = 1$
Paràmetres del mecanisme 18		
$\rho_k = \rho_{18} = 0{,}6$ Si la fallida de la coberta no implica la fallida de la volta de l'absis, aquest mecanisme tindria poca contribució a la fallida total de l'edifici.	$v_{kp} = v_{18p} = 0$	$v_{ki} = v_{18i} = 1$
Dany pel mecanisme 18 No es pot observar el mecanisme, es suposa una dany no estructural. $d_{18} = 1$		

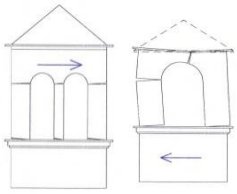
Macroelement: CAPELLES		
Mecanisme 19: Bolcament de les capelles	Mesures antisísmiques - Cap, no hi ha suports externs que l'impedeixin.	Indicadors de vulnerabilitat - Hi ha obertures a les parets
	Efectivitat: $efectivitat = 0$	Efectivitat: Baixa, aquestes obertures son de petites dimensions $efectivitat = 1$
Paràmetres del mecanisme 19		
$\rho_k = \rho_{19} = 0{,}7$ La fallida de les capelles no implica la fallida total de l'edifici, per tant, es minora el coeficient.	$v_{kp} = v_{19p} = 0$	$v_{ki} = v_{19i} = 1$
Dany pel mecanisme 19 No s'aprecia dany degut a aquest mecanisme $d_{19} = 0$		
Mecanisme 20: Mecanismes de tallant als murs de les capelles	Mesures antisísmiques - Cap de les llistades: Hi ha	Indicadors de vulnerabilitat - Els murs suporten la

	diferents fases de construcció, no hi ha reforços a sobre de les obertures ni reforços contra tallant	càrrega de la volta i de la coberta - Hi ha obertures
	Efectivitat: $efectivitat = 0$	Efectivitat: Baixa, tot i que hi hagi vàries fases de construcció, els murs son gruixos i les obertures no molt grans $efectivitat = 1$
Paràmetres del mecanisme 20		
$\rho_k = \rho_{20} = 0{,}7$ La fallida de les parets de les capelles no implicaria el col·lapse de l'edifici, per tant, es minora el coeficient.	$v_{kp} = v_{20p} = 0$	$v_{ki} = v_{20i} = 2$
Dany pel mecanisme 20 No s'aprecia dany estructural degut a aquest mecanisme. $d_{20} = 1$		
Mecanisme 21: Esquerdes a les voltes de les capelles 	Mesures antisísmiques - Cap de les indicades: no hi ha reforços ni suports externs	Indicadors de vulnerabilitat - Cap dels indicats: No hi càrregues puntuals a la coberta, les voltes no son primes ni tenen obertures
	Efectivitat: Cap $efectivitat = 0$	Efectivitat: Cap $efectivitat = 0$
Paràmetres del mecanisme 21		
$\rho_k = \rho_{21} = 0{,}7$ La fallida de les voltes de les capelles no implica la fallida de les voltes de les naus laterals, i per tant, no contribuiria al col·lapse total de l'edifici.	$v_{kp} = v_{21p} = 0$	$v_{ki} = v_{21i} = 0$
Dany pel mecanisme 21 Algunes voltes de les capelles tenen esquerdes importants. $d_{21} = 2$		

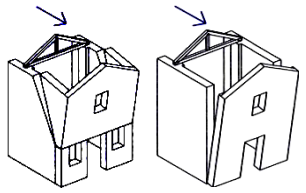
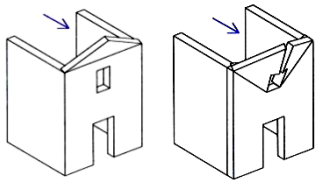
Macroelement: EDIFICIS ADJACENTS		
Mecanisme 22: Esquerdes i desplaçaments a les discontinuïtats, colpeig 	Mesures antisísmiques - Cap	Indicadors de vulnerabilitat - Diferència entre la rigidesa de les construccions adjacents
	Efectivitat: $efectivitat = 0$	Efectivitat: Baixa, els edificis adjacents també son de maçoneria $efectivitat = 1$
Paràmetres del mecanisme 22		
$\rho_k = \rho_{22} = 0{,}6$ Els edificis adjacents es troben a la façana principal, façanes del transsepte i al claustre, però en cap cas la seva fallida implicaria afectar a l'estructura principal.	$v_{kp} = v_{22p} = 0$	$v_{ki} = v_{22i} = 1$
Dany pel mecanisme 22 No es pot observar el mecanisme amb claredat, es suposa que hi ha dany no estructural. $d_{22} = 1$		

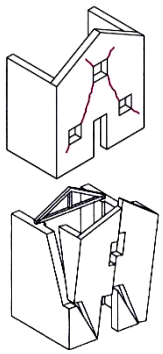
Macroelement: CAMPANAR DE PARET		
Mecanisme 23: Esquerdes, rotació o desplaçament del campanar de paret 	Mesures antisísmiques - Maçoneria monolítica: carreus quadrats	Indicadors de vulnerabilitat - L'element és prim i esvelt, a més, te una gran obertura central.
	Efectivitat: Baixa, tot i ser quadrats, son de petites dimensions. $efectivitat = 1$	Efectivitat: Alta $efectivitat = 3$
Paràmetres del mecanisme 23		
$\rho_k = \rho_{23} = 0{,}6$ Es recolza sobre la façana nord del transsepte, en cas de col·lapse, no afectaria a l'estructura de l'església	$v_{kp} = v_{23p} = 1$	$v_{ki} = v_{23i} = 3$
Dany pel mecanisme 23 L'estructura es veu molt afectada, amb diverses reparacions, hi ha dany estructural a l'element.		

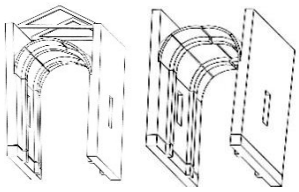
$d_{23} = 3$

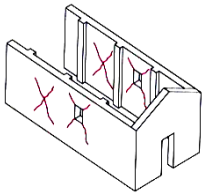
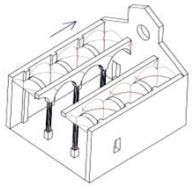
Macroelement: CAMPANAR DE TORRE		
Mecanisme 24: Esquerdes a la torre del campanar 	Mesures antisísmiques - Maçoneria de bona qualitat, construït en una sola fase.	Indicadors de vulnerabilitat - Suport asimètric a la nau sobre la que es recolza.
	Efectivitat: Mitja $efectivitat = 1$	Efectivitat: Mitja $efectivitat = 1$
Paràmetres del mecanisme 24		
$\rho_k = \rho_{24} = 0{,}7$ No forma part de l'estructura fonamental de l'edifici i el seu col·lapse no implica directament el de la nau del transsepte, tot i que suposa un risc	$v_{kp} = v_{24p} = 1$	$v_{ki} = v_{24i} = 1$
Dany pel mecanisme 24 No es pot observar el mecanisme amb claredat, es suposa un mínim dany estructural. $d_{24} = 2$		

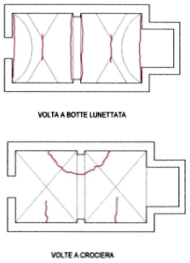
LA SEU D'URGELL

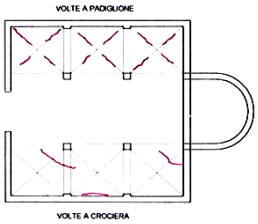
<table>
<tr><td colspan="3">Macroelement: FAÇANA</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Mecanisme 1: Bolcament de la façana
  </td><td>Mesures antisísmiques
- Edificis col·lindants, la façana original està coberta per una façana barroca unida a la muralla exterior.
- Bons elements d'unió entre la façana i les parets de les naus.</td><td>Indicadors de vulnerabilitat
- Cap dels indicats</td></tr>
<tr><td>Efectivitat: Alta, és molt difícil el bolcament complet de la façana quan està reforçada frontalment.
$efectivitat = 2$</td><td>Efectivitat: Nul·la, la volta no es recolza sobre la façana.
$efectivitat = 0$</td></tr>
<tr><td colspan="3">Paràmetres del mecanisme 1</td></tr>
<tr><td>$\rho_k = \rho_1 = 1$</td><td>$v_{kp} = v_{1p} = 3$</td><td>$v_{ki} = v_{1i} = 0$</td></tr>
<tr><td colspan="3">Dany pel mecanisme 1
L'estructura no presenta afectació per aquest mecanisme.
$d_1 = 0$</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Mecanisme 2: Dany a la capçalera de la façana
  </td><td>Mesures antisísmiques
- No hi ha mesures específiques</td><td>Indicadors de vulnerabilitat:
- Presència d'una gran obertura: Rosetó</td></tr>
<tr><td>Efectivitat: Cap, per sobre de la unió entre façana i muralla, sí que es pot produir el bolcament.
$efectivitat = 0$</td><td>Efectivitat: Alta, la part exposada de la façana no té reforços
$efectivitat = 3$</td></tr>
<tr><td colspan="3">Paràmetres del mecanisme 2</td></tr>
<tr><td>$\rho_k = \rho_2 = 1$</td><td>$v_{kp} = v_{2p} = 0$</td><td>$v_{ki} = v_{2i} = 3$</td></tr>
<tr><td colspan="3">Dany pel mecanisme 2
L'estructura presenta esquerdes, però no dany estructural degut a aquest mecanisme.
$d_2 = 1$</td></tr>
</table>

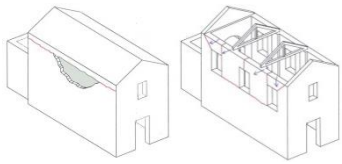
Mecanisme 3: Efectes de tallant a la façana 	Mesures antisísmiques - Edificis adjacents: La façana barroca que uneix la façana original a la muralla	Indicadors de vulnerabilitat - Presència de grans obertures: Porta i rosetó
	Efectivitat: Mitja, només protegeix una part de la façana. $efectivitat = 2$	Efectivitat: Mitja, les obertures són grans en relació a la dimensió de la façana, però no és esvelta i els murs son gruixos. $efectivitat = 2$
Paràmetres del mecanisme 3		
$\rho_k = \rho_3 = 1$	$v_{kp} = v_{3p} = 2$	$v_{ki} = v_{3i} = 2$
Dany pel mecanisme 3 L'estructura presenta esquerdes importants a les obertures, el rosetó i la porta original. $d_3 = 2$		

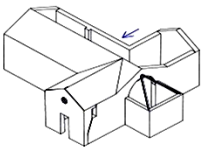
Macroelement: NAU CENTRAL		
Mecanisme 4: Vibració transversal de la nau 	Mesures antisísmiques - Presència d'arcbotants (paret sud) - Edificis adjacents: No n'hi ha, però les naus laterals actuen com a suport	Indicadors de vulnerabilitat - Presència de volta de canó que s'hi recolza
	Efectivitat: Baixa, només hi ha arcbotants d'una banda, i de construcció tardana, deguda a problemes de deformació. $efectivitat = 1$	Efectivitat: Alta, històricament l'edifici ha tingut problemes de deformació i va haver de ser reforçat. $efectivitat = 2$
Paràmetres del mecanisme 4		
$\rho_k = \rho_4 = 1$	$v_{kp} = v_{4p} = 2$	$v_{ki} = v_{4i} = 2$
Dany pel mecanisme 4 Actualment, l'edifici no presenta danys estructurals per aquest mecanisme. $d_4 = 1$		

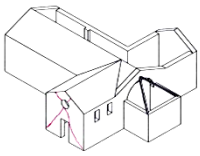
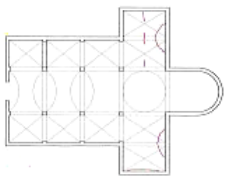
Mecanisme 5: Efectes de tallant a les parets de les naus (inclou naus laterals) 	Mesures antisísmiques - Maçoneria de qualitat, nau construïda en una sola fase. - Les naus laterals actuen com a suport	Indicadors de vulnerabilitat - Presència de finestres
	Efectivitat: Mitja, tot i les obertures de les finestres, els murs son molt gruixos $efectivitat = 2$	Efectivitat: Baixa, les finestres són petites i la coberta no és especialment pesada ni hi ha bigues que facin empenta. $efectivitat = 1$
Paràmetres del mecanisme 5		
$\rho_k = \rho_5 = 1$	$v_{kp} = v_{5p} = 2$	$v_{ki} = v_{5i} = 1$
Dany pel mecanisme 5 L'estructura presenta algunes esquerdes, tot i que no hi ha danys estructurals. $d_5 = 1$		
Mecanisme 6: Resposta longitudinal de la columnata 	Mesures antisísmiques - Presència de fortes unions longitudinals - Presència d'unions de la façana amb la muralla que actuen con a contraforts	Indicadors de vulnerabilitat - Volta de la nau central pesada
	Efectivitat: Alta, les columnes son molt gruixes i els elements d'unió entre elles, molt rígids $efectivitat = 2$	Efectivitat: Baixa, hi ha gran rigidesa longitudinal a les columnes. $efectivitat = 1$
Paràmetres del mecanisme 6		
$\rho_k = \rho_6 = 1$	$v_{kp} = v_{6p} = 3$	$v_{ki} = v_{6i} = 1$
Dany pel mecanisme 6 L'estructura no presenta afectació per aquest mecanisme. $d_6 = 0$		
	Mesures antisísimiques	Indicadors de vulnerabilitat

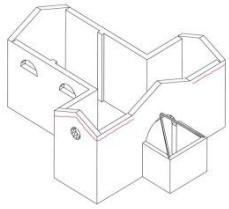
Mecanisme 7: Esquerdes a la volta de la nau  	- Presència d'arcbotants	- Presència de càrrega concentrada al creuer, deguda al pes del cimbori
	Efectivitat: Baixa, només hi ha arcbotants de la banda sud. $efectivitat = 1$	Efectivitat: Mitja, el cimbori és de grans dimensions, però la volta és molt rígida i sense obertures ni irregularitats. $efectivitat = 2$
Paràmetres del mecanisme 7		
$\rho_k = \rho_7 = 1$	$v_{kp} = v_{7p} = 1$	$v_{ki} = v_{7i} = 2$
Dany pel mecanisme 7 L'estructura presenta esquerdes en diversos trams de la volta central. $d_7 = 2$		

Macroelement: NAUS LATERALS		
Mecanisme 8: Esquerdes a les voltes de les naus laterals  	Mesures antisísmiques - Presència de contraforts a la banda sud i del claustre a la banda nord.	Indicadors de vulnerabilitat - Cap dels indicats: No hi ha càrregues puntuals a la coberta, les voltes no son primes i no tenen obertures.
	Efectivitat: Alta, a més dels suports exteriors, la volta de les naus lateral cobreix poca llum i és molt rígida. $efectivitat = 3$	Efectivitat: Cap. $efectivitat = 0$
Paràmetres del mecanisme 8		
$\rho_k = \rho_8 = 1$	$v_{kp} = v_{8p} = 3$	$v_{ki} = v_{8i} = 0$
Dany pel mecanisme 8 L'estructura presenta esquerdes en diversos trams de les naus laterals. $d_8 = 2$		
Mecanisme 9: Coberta de les naus laterals i central	Mesures antisísmiques - No es poden observar els mecanismes de la coberta	Indicadors de vulnerabilitat - La coberta no és especialment pesada

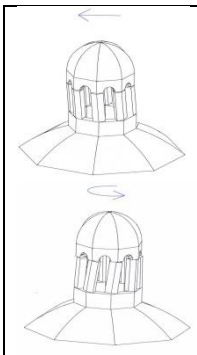
	Efectivitat: Considerem el cas més desfavorable, que no hi hagi mesures $efectivitat = 0$	Efectivitat: Baixa, no hi ha càrregues puntuals a la coberta $efectivitat = 1$
Paràmetres del mecanisme 9		
$\rho_k = \rho_9 = 1$	$v_{kp} = v_{9p} = 0$	$v_{ki} = v_{9i} = 1$
Dany pel mecanisme 9 No es pot observar el dany en aquest element, es suposa un valor sense dany estructural. $d_9 = 1$		

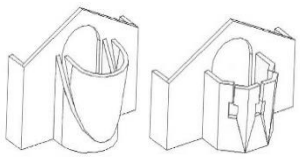
Macroelement: TRANSSEPTE		
Mecanisme 10: Bolcament de les façanes del transsepte 	Mesures antisísimiques: - Elements que suportin la façana: Tant a la façana nord com a la façana sud hi ha edificis adjacents	Indicadors de vulnerabilitat - Obertures a la façana: Portes i rosetons - A la façana nord, presència d'un campanar de paret a sobre. A la banda sud, presència d'una torre de campanar sobre la volta.
	Efectivitat: Alta, el bolcament queda molt impedit per la presència d'edificis adjacents, tot i que es podria produir a la part superior. $efectivitat = 3$	Efectivitat: Alta, degut a la presència dels campanars $efectivitat = 3$
Paràmetres del mecanisme 10		
$\rho_k = \rho_{10} = 0{,}8$ Estructuralment, el col·lapse de les façanes del transsepte no implicaria el col·lapse de la resta de l'edifici, ja que la volta del creuer no s'hi recolza.	$v_{kp} = v_{10p} = 3$	$v_{ki} = v_{10i} = 3$
Dany pel mecanisme 10 No s'aprecia afectació per aquest mecanisme.		

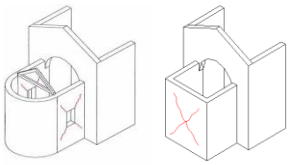
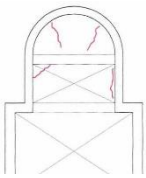
$d_{10} = 0$		
Mecanisme 11: Efectes de tallant a les parets del transsepte 	Mesures antisísmiques - No hi ha mesures antisísmiques.	Indicadors de vulnerabilitat - La volta és pesada i a més, a la banda sud hi ha el campanar - Hi ha grans obertures per accedir a les naus laterals i les capelles. - A més, la maçoneria, tot i ser molt gruixa, no és uniforme, hi ha vàries fases de construcció
	Efectivitat: Cap $efectivitat = 0$	Efectivitat: Alta, perquè els murs no son uniformes, hi ha vàries fases de construcció. $efectivitat = 2$
Paràmetres del mecanisme 11		
$\rho_k = \rho_{11} = 1$ La fallida de les parets del transsepte implicaria la caiguda de la volta de la nau del creuer i la possible fallida de la volta central que suporta el cimbori. Per tant, no es minora el coeficient.	$v_{kp} = v_{12p} = 0$	$v_{ki} = v_{12i} = 3$
Dany pel mecanisme 11 L'estructura presenta esquerdes degudes a aquest mecanisme, tot i que han estat reparades $d_{11} = 2$		
Mecanisme 12: Esquerdes a les voltes del transsepte 	Mesures antisísmiques - No hi ha mesures anitisísmiques	Indicadors de vulnerabilitat - Càrregues concentrades sobre la volta: campanar de paret al creuer nord i torre de campanar al creuer sud

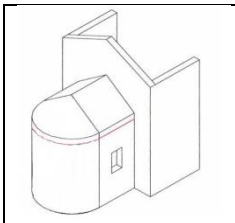
	Efectivitat: Cap $efectivitat = 0$	Efectivitat: Alta, especialment la torre, és una càrrega important $efectivitat = 3$
Paràmetres del mecanisme 12		
$\rho_k = \rho_{12} = 1$ La fallida de la volta implicaria la possible fallida de la volta central que suporta el cimbori. No es minora el coeficient.	$v_{kp} = v_{13p} = 0$	$v_{ki} = v_{13i} = 3$
Dany pel mecanisme 12 L'estructura presenta esquerdes per aquest mecanisme, tot i que han estat reparades. $d_{12} = 2$		
Mecanisme 13: Coberta del transsepte 	Mesures antisísimiques - No es poden observar els mecanismes de la coberta	Indicadors de vulnerabilitat - La coberta no és especialment pesada
	Efectivitat: Considerem el cas més desfavorable, que no hi hagi mesures $efectivitat = 0$	Efectivitat: Baixa $efectivitat = 1$
Paràmetres del mecanisme 13		
$\rho_k = \rho_{13} = 0{,}6$ La fallida de la coberta no implica necessàriament la caiguda de la volta, en aquest cas, l'efecte sobre l'estructura global no seria greu.	$v_{kp} = v_{14p} = 0$	$v_{ki} = v_{14i} = 1$
Dany pel mecanisme 13 No es pot observar el mecanisme, es suposa una afectació sense dany estructural. $d_{13} = 1$		

Macroelement: CIMBORI		
Mecanisme 14: Esquerdes al cimbori, rotació o desplaçament	Mesures antisísmiques - Cap	Indicadors de vulnerabilitat - Grans obertures - Càrrega de la coberta
	Efectivitat: Cap $efectivitat = 0$	Efectivitat: Alta, tot i que l'estructura principal és molt

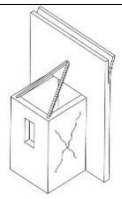
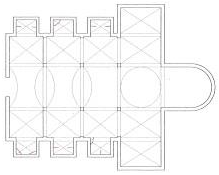
		rígida, els pilars interns de les finestres son molt esvelts. $efectivitat = 3$
Paràmetres del mecanisme 14		
$\rho_k = \rho_{14} = 0{,}8$ Tot i el seu valor artístic, no és un element essencial de l'estructura, tot i que la seva fallida podria afectar a les voltes de les naus o el transsepte	$v_{kp} = v_{14p} = 0$	$v_{ki} = v_{14i} = 3$
Dany pel mecanisme 14 L'estructura no presenta afectació a nivell estructural per aquest mecanisme $d_{14} = 1$		

Macroelement: ABSIS		
Mecanisme 15: Bolcament de l'absis 	Mesures antisísmiques - Presència d'anells de reforçament: els murs concèntrics del deambulatori - Presència de capelles exteriors	Indicadors de vulnerabilitat - Grans obertures d'accés a les capelles - Empenta de les voltes
	Efectivitat: Alta, les capelles exteriors impedirien el bolcament $efectivitat = 3$	Efectivitat: Mitja, tot i les grans obertures d'accés a les capelles, els murs son molt gruixuts. $efectivitat = 2$
Paràmetres del mecanisme 15		
$\rho_k = \rho_{15} = 1$	$v_{kp} = v_{15p} = 3$	$v_{ki} = v_{15i} = 3$
Dany pel mecanisme 15 No s'aprecia dany a nivell estructural per aquest mecanisme. $d_{15} = 1$		
	Mesures antisísmiques	Indicadors de vulnerabilitat

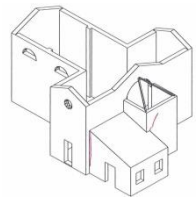
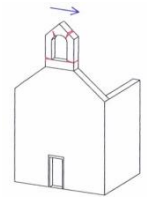
Mecanisme 16: Mecanismes de tallant a l'absis 	- Maçoneria de bona qualitat, en una sola fase de construcció - Arcs de gran resistència sobre les obertures	- Pes de la volta i de la coberta - Grans obertures als murs per accedir a les capelles
	Efectivitat: Alta, els murs son molt gruixuts. $efectivitat = 2$	Efectivitat: Mitja, tot i les obertures, els murs presenten gran resistència. $efectivitat = 1$
Paràmetres del mecanisme 16		
$\rho_k = \rho_{16} = 1$	$v_{kp} = v_{16p} = 3$	$v_{ki} = v_{16i} = 2$
Dany pel mecanisme 16 No s'aprecia dany estructural degut a aquest mecanisme. $d_{16} = 0$		
Mecanisme 17: Esquerdes a la volta de l'absis 	Mesures antisísmiques - Suports externs: Les capelles exteriors actuen com a contraforts	Indicadors de vulnerabilitat - Cap dels indicats: No hi ha càrregues puntuals a la coberta, la volta no és prima i no te obertures.
	Efectivitat: Alta, La volta, més, te uns nervis de reforç que van de la clau fins a la base.	Efectivitat: Cap.
Paràmetres del mecanisme 17		
$\rho_k = \rho_{17} = 1$ La fallida de la volta de l'absis implicaria la possible fallida de la volta central, i per tant, es un mecanisme molt important en l'estructura global de l'edifici.	$v_{kp} = v_{17p} = 2$	$v_{ki} = v_{17i} = 0$
Dany pel mecanisme 17 L'estructura presenta una esquerda important a la base de la volta. $d_{17} = 2$		
Mecanisme 18: Coberta de l'absis	Mesures antisísmiques - No es poden observar els mecanismes de la coberta	Indicadors de vulnerabilitat - La coberta no és especialment pesada

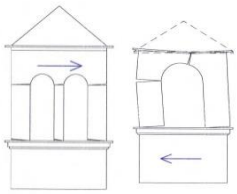
	Efectivitat: Es considera el cas més desfavorable, que no n'hi hagi cap $efectivitat = 0$	Efectivitat: Baixa $efectivitat = 1$
Paràmetres del mecanisme 18		
$\rho_k = \rho_{18} = 0{,}6$ Si la fallida de la coberta no implica la fallida de la volta de l'absis, aquest mecanisme tindria poca contribució a la fallida total de l'edifici.	$v_{kp} = v_{18p} = 0$	$v_{ki} = v_{18i} = 1$
Dany pel mecanisme 18 No es pot observar el mecanisme, es suposa una dany no estructural. $d_{18} = 1$		

Macroelement: CAPELLES		
Mecanisme 19: Bolcament de les capelles 	Mesures antisísmiques - Cap, no hi ha suports externs que l'impedeixin.	Indicadors de vulnerabilitat - Hi ha obertures a les parets
	Efectivitat: $efectivitat = 0$	Efectivitat: Baixa, aquestes obertures son de petites dimensions $efectivitat = 1$
Paràmetres del mecanisme 19		
$\rho_k = \rho_{19} = 0{,}7$ La fallida de les capelles no implica la fallida total de l'edifici, per tant, es minora el coeficient.	$v_{kp} = v_{19p} = 0$	$v_{ki} = v_{19i} = 1$
Dany pel mecanisme 19 No s'aprecia dany degut a aquest mecanisme $d_{19} = 0$		
Mecanisme 20: Mecanismes de tallant als murs de les capelles	Mesures antisísmiques - Cap de les llistades: Hi ha diferents fases de construcció, no hi ha reforços a sobre de les	Indicadors de vulnerabilitat - Els murs suporten la càrrega de la volta i de la coberta - Hi ha obertures

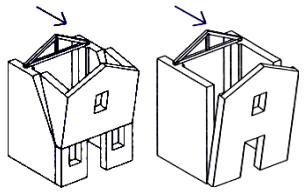
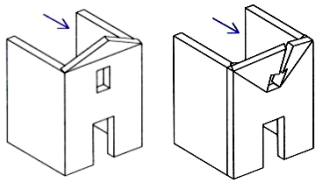
	obertures ni reforços contra tallant	
	Efectivitat: $efectivitat = 0$	Efectivitat: Baixa, tot i que hi hagi vàries fases de construcció, els murs son gruixos i les obertures no molt grans $efectivitat = 1$
Paràmetres del mecanisme 20		
$\rho_k = \rho_{20} = 0{,}7$ La fallida de les parets de les capelles no implicaria el col·lapse de l'edifici, per tant, es minora el coeficient.	$v_{kp} = v_{20p} = 0$	$v_{ki} = v_{20i} = 2$
Dany pel mecanisme 20 No s'aprecia dany estructural degut a aquest mecanisme. $d_{20} = 1$		
Mecanisme 21: Esquerdes a les voltes de les capelles 	Mesures antisísmiques - Cap de les indicades: no hi ha reforços ni suports externs	Indicadors de vulnerabilitat - Cap dels indicats: No hi càrregues puntuals a la coberta, les voltes no son primes ni tenen obertures
	Efectivitat: Cap $efectivitat = 0$	Efectivitat: Cap $efectivitat = 0$
Paràmetres del mecanisme 21		
$\rho_k = \rho_{21} = 0{,}7$ La fallida de les voltes de les capelles no implica la fallida de les voltes de les naus laterals, i per tant, no contribuiria al col·lapse total de l'edifici.	$v_{kp} = v_{21p} = 0$	$v_{ki} = v_{21i} = 0$
Dany pel mecanisme 21 Algunes voltes de les capelles tenen esquerdes importants. $d_{21} = 2$		

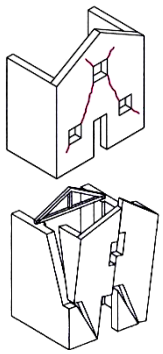
Macroelement: EDIFICIS ADJACENTS		
	Mesures antisísmiques	Indicadors de vulnerabilitat

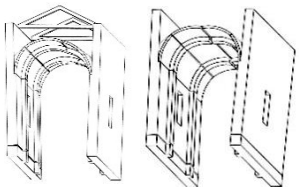
Mecanisme 22: Esquerdes i desplaçaments a les discontinuïtats, colpeig 	- Cap	- Diferència entre la rigidesa de les construccions adjacents
	Efectivitat: $efectivitat = 0$	Efectivitat: Baixa, els edificis adjacents també son de maçoneria $efectivitat = 1$
Paràmetres del mecanisme 22		
$\rho_k = \rho_{22} = 0{,}6$ Els edificis adjacents es troben a la façana principal, façanes del transsepte i al claustre, però en cap cas la seva fallida implicaria afectar a l'estructura principal.	$v_{kp} = v_{22p} = 0$	$v_{ki} = v_{22i} = 1$
Dany pel mecanisme 22 No es pot observar el mecanisme amb claredat, es suposa que hi ha dany no estructural. $d_{22} = 1$		
Macroelement: CAMPANAR DE PARET		
Mecanisme 23: Esquerdes, rotació o desplaçament del campanar de paret 	Mesures antisísmiques - Maçoneria monolítica: carreus quadrats	Indicadors de vulnerabilitat - L'element és prim i esvelt, a més, te una gran obertura central.
	Efectivitat: Baixa, tot i ser quadrats, son de petites dimensions. $efectivitat = 1$	Efectivitat: Alta $efectivitat = 3$
Paràmetres del mecanisme 23		
$\rho_k = \rho_{23} = 0{,}6$ Es recolza sobre la façana nord del transsepte, en cas de col·lapse, no afectaria a l'estructura de l'església	$v_{kp} = v_{23p} = 1$	$v_{ki} = v_{23i} = 3$
Dany pel mecanisme 23 L'estructura es veu molt afectada, amb diverses reparacions, hi ha dany estructural a l'element. $d_{23} = 3$		

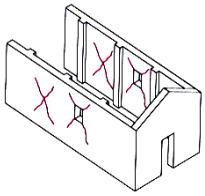
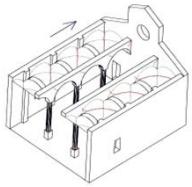
Macroelement: CAMPANAR DE TORRE		
Mecanisme 24: Esquerdes a la torre del campanar 	Mesures antisísmiques - Maçoneria de bona qualitat, construït en una sola fase.	Indicadors de vulnerabilitat - Suport asimètric a la nau sobre la que es recolza.
	Efectivitat: Mitja $efectivitat = 1$	Efectivitat: Mitja $efectivitat = 1$
Paràmetres del mecanisme 24		
$\rho_k = \rho_{24} = 0{,}7$ No forma part de l'estructura fonamental de l'edifici i el seu col·lapse no implica directament el de la nau del transsepte, tot i que suposa un risc	$v_{kp} = v_{24p} = 1$	$v_{ki} = v_{24i} = 1$
Dany pel mecanisme 24 No es pot observar el mecanisme amb claredat, es suposa un mínim dany estructural. $d_{24} = 2$		

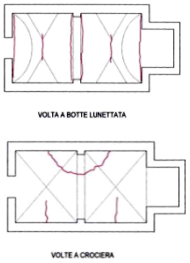
VILABERTRAN

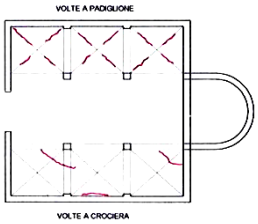
Macroelement: FAÇANA		
Mecanisme 1: Bolcament de la façana 	Mesures antisísmiques - Edificis col·lindants, la façana original està coberta per una façana barroca unida a la muralla exterior. - Bons elements d'unió entre la façana i les parets de les naus.	Indicadors de vulnerabilitat - Cap dels indicats
	Efectivitat: Alta, és molt difícil el bolcament complet de la façana quan està reforçada frontalment. $efectivitat = 2$	Efectivitat: Nul·la, la volta no es recolza sobre la façana. $efectivitat = 0$
Paràmetres del mecanisme 1		
$\rho_k = \rho_1 = 1$	$v_{kp} = v_{1p} = 3$	$v_{ki} = v_{1i} = 0$
Dany pel mecanisme 1 L'estructura no presenta afectació per aquest mecanisme. $d_1 = 0$		
Mecanisme 2: Dany a la capçalera de la façana 	Mesures antisísmiques - No hi ha mesures específiques	Indicadors de vulnerabilitat: - Presència d'una gran obertura: Rosetó
	Efectivitat: Cap, per sobre de la unió entre façana i muralla, sí que es pot produir el bolcament. $efectivitat = 0$	Efectivitat: Alta, la part exposada de la façana no té reforços $efectivitat = 3$
Paràmetres del mecanisme 2		
$\rho_k = \rho_2 = 1$	$v_{kp} = v_{2p} = 0$	$v_{ki} = v_{2i} = 3$
Dany pel mecanisme 2 L'estructura presenta esquerdes, però no dany estructural degut a aquest mecanisme. $d_2 = 1$		

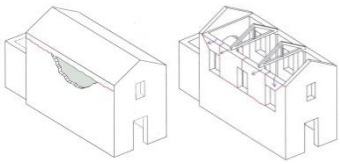
Mecanisme 3: Efectes de tallant a la façana 	Mesures antisísmiques - Edificis adjacents: La façana barroca que uneix la façana original a la muralla	Indicadors de vulnerabilitat - Presència de grans obertures: Porta i rosetó
	Efectivitat: Mitja, només protegeix una part de la façana. $efectivitat = 2$	Efectivitat: Mitja, les obertures són grans en relació a la dimensió de la façana, però no és esvelta i els murs son gruixos. $efectivitat = 2$
Paràmetres del mecanisme 3		
$\rho_k = \rho_3 = 1$	$v_{kp} = v_{3p} = 2$	$v_{ki} = v_{3i} = 2$
Dany pel mecanisme 3 L'estructura presenta esquerdes importants a les obertures, el rosetó i la porta original. $d_3 = 2$		

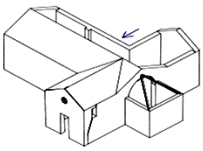
Macroelement: NAU CENTRAL		
Mecanisme 4: Vibració transversal de la nau 	Mesures antisísmiques - Presència d'arcbotants (paret sud) - Edificis adjacents: No n'hi ha, però les naus laterals actuen com a suport	Indicadors de vulnerabilitat - Presència de volta de canó que s'hi recolza
	Efectivitat: Baixa, només hi ha arcbotants d'una banda, i de construcció tardana, deguda a problemes de deformació. $efectivitat = 1$	Efectivitat: Alta, històricament l'edifici ha tingut problemes de deformació i va haver de ser reforçat. $efectivitat = 2$
Paràmetres del mecanisme 4		
$\rho_k = \rho_4 = 1$	$v_{kp} = v_{4p} = 2$	$v_{ki} = v_{4i} = 2$
Dany pel mecanisme 4 Actualment, l'edifici no presenta danys estructurals per aquest mecanisme. $d_4 = 1$		

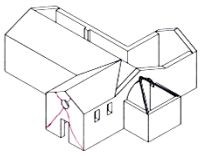
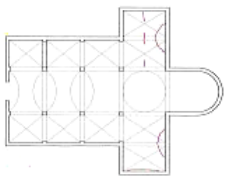
Mecanisme 5: Efectes de tallant a les parets de les naus (inclou naus laterals) 	Mesures antisísmiques - Maçoneria de qualitat, nau construïda en una sola fase. - Les naus laterals actuen com a suport	Indicadors de vulnerabilitat - Presència de finestres
	Efectivitat: Mitja, tot i les obertures de les finestres, els murs son molt gruixos $efectivitat = 2$	Efectivitat: Baixa, les finestres són petites i la coberta no és especialment pesada ni hi ha bigues que facin empenta. $efectivitat = 1$
Paràmetres del mecanisme 5		
$\rho_k = \rho_5 = 1$	$v_{kp} = v_{5p} = 2$	$v_{ki} = v_{5i} = 1$
Dany pel mecanisme 5 L'estructura presenta algunes esquerdes, tot i que no hi ha danys estructurals. $d_5 = 1$		
Mecanisme 6: Resposta longitudinal de la columnata 	Mesures antisísmiques - Presència de fortes unions longitudinals - Presència d'unions de la façana amb la muralla que actuen con a contraforts	Indicadors de vulnerabilitat - Volta de la nau central pesada
	Efectivitat: Alta, les columnes son molt gruixes i els elements d'unió entre elles, molt rígids $efectivitat = 2$	Efectivitat: Baixa, hi ha gran rigidesa longitudinal a les columnes. $efectivitat = 1$
Paràmetres del mecanisme 6		
$\rho_k = \rho_6 = 1$	$v_{kp} = v_{6p} = 3$	$v_{ki} = v_{6i} = 1$
Dany pel mecanisme 6 L'estructura no presenta afectació per aquest mecanisme. $d_6 = 0$		
	Mesures antisísimiques	Indicadors de vulnerabilitat

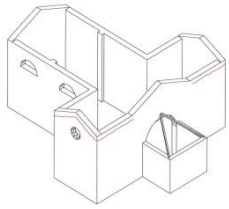
Mecanisme 7: Esquerdes a la volta de la nau  	- Presència d'arcbotants	- Presència de càrrega concentrada al creuer, deguda al pes del cimbori
	Efectivitat: Baixa, només hi ha arcbotants de la banda sud. $efectivitat = 1$	Efectivitat: Mitja, el cimbori és de grans dimensions, però la volta és molt rígida i sense obertures ni irregularitats. $efectivitat = 2$
Paràmetres del mecanisme 7		
$\rho_k = \rho_7 = 1$	$v_{kp} = v_{7p} = 1$	$v_{ki} = v_{7i} = 2$
Dany pel mecanisme 7 L'estructura presenta esquerdes en diversos trams de la volta central. $d_7 = 2$		

Macroelement: NAUS LATERALS		
Mecanisme 8: Esquerdes a les voltes de les naus laterals  	Mesures antisísmiques - Presència de contraforts a la banda sud i del claustre a la banda nord.	Indicadors de vulnerabilitat - Cap dels indicats: No hi ha càrregues puntuals a la coberta, les voltes no son primes i no tenen obertures.
	Efectivitat: Alta, a més dels suports exteriors, la volta de les naus lateral cobreix poca llum i és molt rígida. $efectivitat = 3$	Efectivitat: Cap. $efectivitat = 0$
Paràmetres del mecanisme 8		
$\rho_k = \rho_8 = 1$	$v_{kp} = v_{8p} = 3$	$v_{ki} = v_{8i} = 0$
Dany pel mecanisme 8 L'estructura presenta esquerdes en diversos trams de les naus laterals. $d_8 = 2$		
Mecanisme 9: Coberta de les naus laterals i central	Mesures antisísmiques - No es poden observar els mecanismes de la coberta	Indicadors de vulnerabilitat - La coberta no és especialment pesada

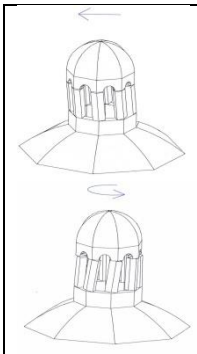
	Efectivitat: Considerem el cas més desfavorable, que no hi hagi mesures $efectivitat = 0$	Efectivitat: Baixa, no hi ha càrregues puntuals a la coberta $efectivitat = 1$
Paràmetres del mecanisme 9		
$\rho_k = \rho_9 = 1$	$v_{kp} = v_{9p} = 0$	$v_{ki} = v_{9i} = 1$
Dany pel mecanisme 9 No es pot observar el dany en aquest element, es suposa un valor sense dany estructural. $d_9 = 1$		

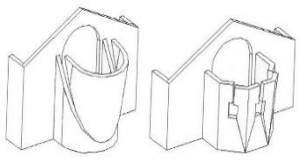
Macroelement: TRANSSEPTE		
Mecanisme 10: Bolcament de les façanes del transsepte 	Mesures antisísimiques: - Elements que suportin la façana: Tant a la façana nord com a la façana sud hi ha edificis adjacents	Indicadors de vulnerabilitat - Obertures a la façana: Portes i rosetons - A la façana nord, presència d'un campanar de paret a sobre. A la banda sud, presència d'una torre de campanar sobre la volta.
	Efectivitat: Alta, el bolcament queda molt impedit per la presència d'edificis adjacents, tot i que es podria produir a la part superior. $efectivitat = 3$	Efectivitat: Alta, degut a la presència dels campanars $efectivitat = 3$
Paràmetres del mecanisme 10		
$\rho_k = \rho_{10} = 0{,}8$ Estructuralment, el col·lapse de les façanes del transsepte no implicaria el col·lapse de la resta de l'edifici, ja que la volta del creuer no s'hi recolza.	$v_{kp} = v_{10p} = 3$	$v_{ki} = v_{10i} = 3$
Dany pel mecanisme 10 No s'aprecia afectació per aquest mecanisme.		

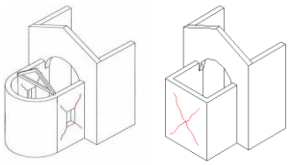
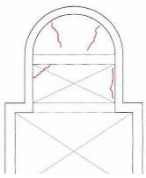
$d_{10} = 0$		
Mecanisme 11: Efectes de tallant a les parets del transsepte 	Mesures antisísmiques - No hi ha mesures antisísmiques.	Indicadors de vulnerabilitat - La volta és pesada i a més, a la banda sud hi ha el campanar - Hi ha grans obertures per accedir a les naus laterals i les capelles. - A més, la maçoneria, tot i ser molt gruixa, no és uniforme, hi ha vàries fases de construcció
	Efectivitat: Cap $efectivitat = 0$	Efectivitat: Alta, perquè els murs no son uniformes, hi ha vàries fases de construcció. $efectivitat = 2$
Paràmetres del mecanisme 11		
$\rho_k = \rho_{11} = 1$ La fallida de les parets del transsepte implicaria la caiguda de la volta de la nau del creuer i la possible fallida de la volta central que suporta el cimbori. Per tant, no es minora el coeficient.	$v_{kp} = v_{12p} = 0$	$v_{ki} = v_{12i} = 3$
Dany pel mecanisme 11 L'estructura presenta esquerdes degudes a aquest mecanisme, tot i que han estat reparades $d_{11} = 2$		
Mecanisme 12: Esquerdes a les voltes del transsepte 	Mesures antisísmiques - No hi ha mesures anitisísmiques	Indicadors de vulnerabilitat - Càrregues concentrades sobre la volta: campanar de paret al creuer nord i torre de campanar al creuer sud

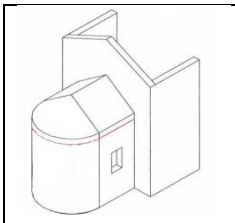
	Efectivitat: Cap $efectivitat = 0$	Efectivitat: Alta, especialment la torre, és una càrrega important $efectivitat = 3$
Paràmetres del mecanisme 12		
$\rho_k = \rho_{12} = 1$ La fallida de la volta implicaria la possible fallida de la volta central que suporta el cimbori. No es minora el coeficient.	$v_{kp} = v_{13p} = 0$	$v_{ki} = v_{13i} = 3$
Dany pel mecanisme 12 L'estructura presenta esquerdes per aquest mecanisme, tot i que han estat reparades. $d_{12} = 2$		
Mecanisme 13: Coberta del transsepte 	Mesures antisísimiques - No es poden observar els mecanismes de la coberta	Indicadors de vulnerabilitat - La coberta no és especialment pesada
	Efectivitat: Considerem el cas més desfavorable, que no hi hagi mesures $efectivitat = 0$	Efectivitat: Baixa $efectivitat = 1$
Paràmetres del mecanisme 13		
$\rho_k = \rho_{13} = 0{,}6$ La fallida de la coberta no implica necessàriament la caiguda de la volta, en aquest cas, l'efecte sobre l'estructura global no seria greu.	$v_{kp} = v_{14p} = 0$	$v_{ki} = v_{14i} = 1$
Dany pel mecanisme 13 No es pot observar el mecanisme, es suposa una afectació sense dany estructural. $d_{13} = 1$		

Macroelement: CIMBORI		
Mecanisme 14: Esquerdes al cimbori, rotació o desplaçament	Mesures antisísmiques - Cap	Indicadors de vulnerabilitat - Grans obertures - Càrrega de la coberta
	Efectivitat: Cap $efectivitat = 0$	Efectivitat: Alta, tot i que l'estructura principal és molt

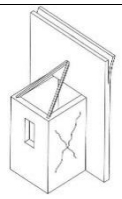
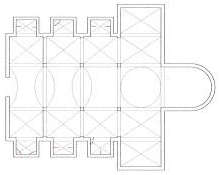
		rígida, els pilars interns de les finestres son molt esvelts. $efectivitat = 3$
Paràmetres del mecanisme 14		
$\rho_k = \rho_{14} = 0{,}8$ Tot i el seu valor artístic, no és un element essencial de l'estructura, tot i que la seva fallida podria afectar a les voltes de les naus o el transsepte	$v_{kp} = v_{14p} = 0$	$v_{ki} = v_{14i} = 3$
Dany pel mecanisme 14 L'estructura no presenta afectació a nivell estructural per aquest mecanisme $d_{14} = 1$		

Macroelement: ABSIS		
Mecanisme 15: Bolcament de l'absis 	Mesures antisísmiques - Presència d'anells de reforçament: els murs concèntrics del deambulatori - Presència de capelles exteriors	Indicadors de vulnerabilitat - Grans obertures d'accés a les capelles - Empenta de les voltes
	Efectivitat: Alta, les capelles exteriors impedirien el bolcament $efectivitat = 3$	Efectivitat: Mitja, tot i les grans obertures d'accés a les capelles, els murs son molt gruixuts. $efectivitat = 2$
Paràmetres del mecanisme 15		
$\rho_k = \rho_{15} = 1$	$v_{kp} = v_{15p} = 3$	$v_{ki} = v_{15i} = 3$
Dany pel mecanisme 15 No s'aprecia dany a nivell estructural per aquest mecanisme. $d_{15} = 1$		
	Mesures antisísmiques	Indicadors de vulnerabilitat

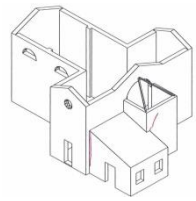
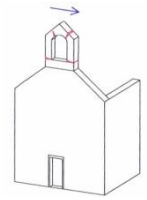
Mecanisme 16: Mecanismes de tallant a l'absis 	- Maçoneria de bona qualitat, en una sola fase de construcció - Arcs de gran resistència sobre les obertures	- Pes de la volta i de la coberta - Grans obertures als murs per accedir a les capelles
	Efectivitat: Alta, els murs son molt gruixuts. $efectivitat = 2$	Efectivitat: Mitja, tot i les obertures, els murs presenten gran resistència. $efectivitat = 1$
Paràmetres del mecanisme 16		
$\rho_k = \rho_{16} = 1$	$v_{kp} = v_{16p} = 3$	$v_{ki} = v_{16i} = 2$
Dany pel mecanisme 16 No s'aprecia dany estructural degut a aquest mecanisme. $d_{16} = 0$		
Mecanisme 17: Esquerdes a la volta de l'absis 	Mesures antisísmiques - Suports externs: Les capelles exteriors actuen com a contraforts	Indicadors de vulnerabilitat - Cap dels indicats: No hi ha càrregues puntuals a la coberta, la volta no és prima i no te obertures.
	Efectivitat: Alta, La volta, més, te uns nervis de reforç que van de la clau fins a la base.	Efectivitat: Cap.
Paràmetres del mecanisme 17		
$\rho_k = \rho_{17} = 1$ La fallida de la volta de l'absis implicaria la possible fallida de la volta central, i per tant, es un mecanisme molt important en l'estructura global de l'edifici.	$v_{kp} = v_{17p} = 2$	$v_{ki} = v_{17i} = 0$
Dany pel mecanisme 17 L'estructura presenta una esquerda important a la base de la volta. $d_{17} = 2$		
Mecanisme 18: Coberta de l'absis	Mesures antisísmiques - No es poden observar els mecanismes de la coberta	Indicadors de vulnerabilitat - La coberta no és especialment pesada

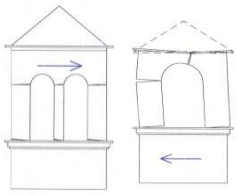
	Efectivitat: Es considera el cas més desfavorable, que no n'hi hagi cap $efectivitat = 0$	Efectivitat: Baixa $efectivitat = 1$
Paràmetres del mecanisme 18		
$\rho_k = \rho_{18} = 0{,}6$ Si la fallida de la coberta no implica la fallida de la volta de l'absis, aquest mecanisme tindria poca contribució a la fallida total de l'edifici.	$v_{kp} = v_{18p} = 0$	$v_{ki} = v_{18i} = 1$
Dany pel mecanisme 18 No es pot observar el mecanisme, es suposa una dany no estructural. $d_{18} = 1$		

Macroelement: CAPELLES		
Mecanisme 19: Bolcament de les capelles 	Mesures antisísmiques - Cap, no hi ha suports externs que l'impedeixin.	Indicadors de vulnerabilitat - Hi ha obertures a les parets
	Efectivitat: $efectivitat = 0$	Efectivitat: Baixa, aquestes obertures son de petites dimensions $efectivitat = 1$
Paràmetres del mecanisme 19		
$\rho_k = \rho_{19} = 0{,}7$ La fallida de les capelles no implica la fallida total de l'edifici, per tant, es minora el coeficient.	$v_{kp} = v_{19p} = 0$	$v_{ki} = v_{19i} = 1$
Dany pel mecanisme 19 No s'aprecia dany degut a aquest mecanisme $d_{19} = 0$		
Mecanisme 20: Mecanismes de tallant als murs de les capelles	Mesures antisísmiques - Cap de les llistades: Hi ha diferents fases de construcció, no hi ha reforços a sobre de les	Indicadors de vulnerabilitat - Els murs suporten la càrrega de la volta i de la coberta - Hi ha obertures

	obertures ni reforços contra tallant	
	Efectivitat: $efectivitat = 0$	Efectivitat: Baixa, tot i que hi hagi vàries fases de construcció, els murs son gruixos i les obertures no molt grans $efectivitat = 1$
Paràmetres del mecanisme 20		
$\rho_k = \rho_{20} = 0{,}7$ La fallida de les parets de les capelles no implicaria el col·lapse de l'edifici, per tant, es minora el coeficient.	$v_{kp} = v_{20p} = 0$	$v_{ki} = v_{20i} = 2$
Dany pel mecanisme 20 No s'aprecia dany estructural degut a aquest mecanisme. $d_{20} = 1$		
Mecanisme 21: Esquerdes a les voltes de les capelles 	Mesures antisísmiques - Cap de les indicades: no hi ha reforços ni suports externs	Indicadors de vulnerabilitat - Cap dels indicats: No hi càrregues puntuals a la coberta, les voltes no son primes ni tenen obertures
	Efectivitat: Cap $efectivitat = 0$	Efectivitat: Cap $efectivitat = 0$
Paràmetres del mecanisme 21		
$\rho_k = \rho_{21} = 0{,}7$ La fallida de les voltes de les capelles no implica la fallida de les voltes de les naus laterals, i per tant, no contribuiria al col·lapse total de l'edifici.	$v_{kp} = v_{21p} = 0$	$v_{ki} = v_{21i} = 0$
Dany pel mecanisme 21 Algunes voltes de les capelles tenen esquerdes importants. $d_{21} = 2$		

Macroelement: EDIFICIS ADJACENTS		
	Mesures antisísmiques	Indicadors de vulnerabilitat

Mecanisme 22: Esquerdes i desplaçaments a les discontinuïtats, colpeig 	- Cap	- Diferència entre la rigidesa de les construccions adjacents
	Efectivitat: $efectivitat = 0$	Efectivitat: Baixa, els edificis adjacents també son de maçoneria $efectivitat = 1$
Paràmetres del mecanisme 22		
$\rho_k = \rho_{22} = 0{,}6$ Els edificis adjacents es troben a la façana principal, façanes del transsepte i al claustre, però en cap cas la seva fallida implicaria afectar a l'estructura principal.	$v_{kp} = v_{22p} = 0$	$v_{ki} = v_{22i} = 1$
Dany pel mecanisme 22 No es pot observar el mecanisme amb claredat, es suposa que hi ha dany no estructural. $d_{22} = 1$		
Macroelement: CAMPANAR DE PARET		
Mecanisme 23: Esquerdes, rotació o desplaçament del campanar de paret 	Mesures antisísmiques - Maçoneria monolítica: carreus quadrats	Indicadors de vulnerabilitat - L'element és prim i esvelt, a més, te una gran obertura central.
	Efectivitat: Baixa, tot i ser quadrats, son de petites dimensions. $efectivitat = 1$	Efectivitat: Alta $efectivitat = 3$
Paràmetres del mecanisme 23		
$\rho_k = \rho_{23} = 0{,}6$ Es recolza sobre la façana nord del transsepte, en cas de col·lapse, no afectaria a l'estructura de l'església	$v_{kp} = v_{23p} = 1$	$v_{ki} = v_{23i} = 3$
Dany pel mecanisme 23 L'estructura es veu molt afectada, amb diverses reparacions, hi ha dany estructural a l'element. $d_{23} = 3$		

<table>
<tr><td colspan="3">Macroelement: CAMPANAR DE TORRE</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Mecanisme 24: Esquerdes a la torre del campanar
  </td><td>Mesures antisísmiques
- Maçoneria de bona qualitat, construït en una sola fase.</td><td>Indicadors de vulnerabilitat
- Suport asimètric a la nau sobre la que es recolza.</td></tr>
<tr><td>Efectivitat: Mitja
$efectivitat = 1$</td><td>Efectivitat: Mitja
$efectivitat = 1$</td></tr>
<tr><td colspan="3">Paràmetres del mecanisme 24</td></tr>
<tr><td>$\rho_k = \rho_{24} = 0{,}7$

No forma part de l’estructura fonamental de l’edifici i el seu col·lapse no implica directament el de la nau del transsepte, tot i que suposa un risc</td><td>$v_{kp} = v_{24p} = 1$</td><td>$v_{ki} = v_{24i} = 1$</td></tr>
<tr><td colspan="3">Dany pel mecanisme 24
No es pot observar el mecanisme amb claredat, es suposa un mínim dany estructural.

$d_{24} = 2$</td></tr>
</table>

ANNEXE II. TAULES DE DEFORMACIÓ DE VOLTES APUNTADES

α=60º

Espesor(m)	Desplazamiento Límite(m)
0,28	0,00
0,40	0,52
0,50	0,90
0,60	1,60
0,80	2,63

α=70º

Espesor(m)	Desplazamiento Límite(m)
0,34	0,00
0,40	0,36
0,50	0,78
0,60	1,15
0,80	2,65

α=80º

Espesor(m)	Desplazamiento Límite(m)
0,37	0,00
0,40	0,15
0,50	0,65
0,60	1,10
0,80	2,50
1,00	3,30

α=90º

e/R	e/L	Incremento de luz
0,10	0,10	6,60 %
0,12	0,12	17,00 %
0,16	0,16	35,00 %
0,20	0,20	53,00 %