



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH
Escola d'Enginyeria de Barcelona Est

TREBALL FI DE GRAU

Grau en Enginyeria Mecànica

COMPARATIVA D'AFECTACIÓ SÍSMICA EN DIFERENTS TIPOLOGIES D'EDIFICIS DE L'EIXAMPLE



Memòria

Autor: Dídac Sánchez Coll

Director: Jorge Arturo Ávila Haro

Convocatòria: Gener de 2019

Resum

Els efectes devastadors que pot causar un sisme en les grans ciutats ha esdevingut una preocupació, no només pels catastròfics danys materials sinó per les vides humanes de les persones que viuen en ciutats on la densitat de població és tant alta.

A Barcelona, tot i que és territori d'activitat sísmica lleu-moderada, hi ha una sèrie de factors que han generat un interrogant sobre la vulnerabilitat dels edificis, concretament, en el nostre barri d'estudi, l'Eixample. Factors com ara la manca de normativa referent a aquest fenomen en edificis fins fa relativament pocs anys, l'antiguitat d'aquest, els sistemes constructius de maçoneria amb recrescuts o els endèmics enderrocs d'edificis per la construcció de nous. Tot això sumat pot ser un potencial problema de cara als edificis d'aquesta època on la majoria d'ells ja han complert el seu període de vida útil.

És per això, que l'objectiu d'aquest treball és analitzar com reaccionaria una agregat de tres edificis als moviments sísmics referents a un terratrèmol, aplicant la normativa estatal actual i estudiant els diferents escenaris d'aïllar-los entre ells per comprovar l'afectació dels espais romanents dels enderrocs.

El marc normatiu respectat serà la norma espanyola NCSE-02, tot i que es compararà en alguns punts amb la europea, EC-8, i es veuran les diferències amb estudis locals de micro-zonació. La metodologia emprada per l'anàlisi de les estructures serà el mètode N2, i pel qual, s'utilitzarà el programa de càlcul estructural 3Muri i Matlab per l'anàlisi i post-processat de les dades. Finalment es verificarà la fragilitat dels edificis seguint el procediment exposat en el projecte RISK-UE.

El cas d'estudi d'aquest treball consisteix en un agregat compost per dos edificis de banda i un de cantonada (xamfrà), centrant l'atenció en l'edifici de cantonada, el qual també és modelat de forma independent. La selecció d'aquest edifici atén per la seva repetitivitat en totes les illes de la ciutat projectades en el Pla Cerdà.

Resumen

Los efectos devastadores que puede causar un sismo en las grandes ciudades se ha convertido en una preocupación, no sólo por los catastróficos daños materiales sino por las vidas humanas de las personas que viven en ciudades donde la densidad de población es tan alta.

En Barcelona, aunque es territorio de actividad sísmica leve-moderada, hay una serie de factores que han generado un interrogante sobre la vulnerabilidad de los edificios, concretamente, en nuestro barrio de estudio, el Ensanche. Factores como la falta de normativa referente a este fenómeno en edificios hasta hace relativamente pocos años, la antigüedad de éstos, los sistemas constructivos de mampostería con recrecidos o los endémicos derribos de edificios para la construcción de nuevos. Todo esto sumado puede ser un potencial problema de cara a los edificios de esta época donde la mayoría de ellos ya han cumplido su periodo de vida útil.

Es por ello, que el objetivo de este trabajo es analizar cómo reaccionaría una agregado de tres edificios a los movimientos sísmicos referentes a un terremoto, aplicando la normativa estatal actual y estudiando los diferentes escenarios de aislarlos entre ellos para comprobar la afectación de los espacios remanentes de los derribos.

El marco normativo respetado será la norma española NCSE-02, aunque se comparará en algunos puntos con la europea, EC-8, y se verán las diferencias con estudios locales de micro-zonación. La metodología empleada para el análisis de las estructuras será el método N2, y para lo cual, se utilizará el programa de cálculo estructural 3Muri y Matlab para el análisis y postprocesado de los datos. Finalmente se verificará la fragilidad de los edificios siguiendo el procedimiento expuesto en el proyecto RISK-UE.

El caso de estudio para este Trabajo consiste en un agregado compuesto de dos edificios de banda y uno de esquina (chaflán), centrando la atención en el edificio de esquina el cual también es modelado de forma independiente. La selección de estos edificios atiende por su repetitividad en todas las manzanas de la ciudad proyectadas en el Plan Cerdá.

Abstract

The devastating earthquake's effects can cause in the big cities has become a concern, not only for the catastrophic material damage but also for the human lives of people living in them, where population density is so high.

In Barcelona, Where is a mild-moderate seismic activity territory, there are a numerous factors that have generated a question about the vulnerability of buildings, specifically, in our study district, the Eixample. Factors such as the lack of regulations regarding this phenomenon in buildings until relatively few years ago, the age of these, the constructive systems of masonry with floor increases or the endemic buildings demolition for the construction of new ones. All this mixed can be a potential problem in regard to the buildings of this era where most of them have already reached their useful life.

For all these reasons, the objective of this project is to analyze how an aggregate of three buildings would react to seismic movements referring to an earthquake, applying the current state regulations and studying the different scenarios of disjoining them to check the remaining spaces affectation of the demolitions.

The normative framework respected will be the Spanish standard NCSE-02, although it will be compared in some points with the European standard, EC-8, and the micro-zoning local studies. The structure analysis methodology used will be the N2, which will be carried out with the 3Muri structural computation software and Matlab software for the post processed and data analysis. Finally, the vulnerability and fragility of the buildings will be verified following the procedure outlined in the RISK-EU project.

The study case of this project consists of an aggregate composed of two band buildings and one corner building (chamfer), focusing attention on the last one, which is also modeled independently. The reason of the building selection it is because of its repetitiveness in all the apples of the city projected in the Cerdà Plan.

Agraïments

Primer de tot, m'agradaria agrair a tota la gent que ha estat al meu costat en el transcurs del Treball de Fi de Grau i que en algun moment m'he hagut d'excusar en motiu d'aquest per deixar de fer alguna cosa amb ells, contretament a la meva parella i als meus amics.

Agraïments també a la família, qui m'han pressionat de forma positiva i encoratjadora per prendre aquest treball amb més empenta.

I per descomptat, agrair al meu tutor del treball, no solament per ser l'instigador del mateix, sinó per tota la ajuda proporcionada i totes les directrius facilitades per realitzar un bon treball.

Gràcies,

Glossari

Glossari d'abreviacions:

| Abreviació | Descripció |
|------------|--|
| NCSE-94 | Norma de Construcció Sismoterrestre Espanyola 1994 |
| NCSE-02 | Norma de Construcció Sismoterrestre Espanyola 2002 |
| EC-8 | Eurocodi 8 |
| PGA | Peak Ground Acceleration |
| ADRS | Acceleration Displacement Response Spectra |
| NSP | Non Static Procedure |
| PP | Performance Point |
| N2 | Mètode estàtic no lineal |

Glossari de símbols:

| Símbol | Unitats | Descripció |
|------------|--------------------|--|
| Ψ | Adimensional | Distribució de càrregues laterals |
| ρ | N | Magnitud de les càrregues laterals |
| P | N | Vector de càrregues laterals |
| T_e | s | Període corresponent a l'espectre elàstic |
| μ_p | Adimensional | Factor de demanda de ductilitat |
| $R\mu$ | Adimensional | Factor de conversió de l'espectre de demanda |
| S_{a_p} | g | Acceleració del punt d'acompliment |
| S_{d_p} | cm | Desplaçament punt d'acompliment |
| S_{a_e} | g | Acceleració espectral per comportament elàstic |
| S_{d_e} | cm | Desplaçament per comportament elàstic |
| S_{a_u} | g | Acceleració de punt últim |
| S_{a_y} | g | Acceleració de punt de fluència |
| G_k | daN/m ² | Càrregues mortes |
| Q_k | daN/m ² | Càrregues vives |
| τ | N/cm ² | Resistència a tallant |
| G | N/cm ² | Mòdul a tallant |
| E | N/cm ² | Mòdul elàstic |
| f_m | N/cm ² | Resistència a compressió |
| V_{base} | N | Tallant a la base |
| D_{roof} | cm | Desplaçament al sostre |
| S_{d_u} | cm | Desplaçament de punt últim |
| S_{d_y} | cm | Desplaçament de punt de fluència |
| g | cm/s ² | Acceleració de la gravetat |
| S_d | cm | Resposta espectral de desplaçament |
| S_b | Adimensional | Factor de terreny |
| e | m | Gruix del terreny |
| C | Adimensional | Coefficient del terreny |
| ϕ | Adimensional | Forma del desplaçament assumit |
| \ddot{U} | cm | Vector de desplaçaments |

| | | |
|-------------------------------------|--------------|---|
| R | N | Vector de forces internes |
| T | Adimensional | Factor de participació modal |
| D* | cm | Desplaçament equivalent del SDOF |
| F* | N | Força equivalent del SDOF |
| m* | Kg | Massa equivalent del SDOF |
| V _s | m/s | Velocitat de les ones elàstiques de tallant |
| K | Adimensional | Coefficient de distribució |
| T _b | s | Període característic de l'espectre de resposta |
| T _c | s | Període característic de l'espectre de resposta |
| T _d | s | Període característic de l'espectre de resposta |
| ξ | % | Amortiment |
| η | Adimensional | Factor de correcció del amortiment |
| S | Adimensional | Factor de terreny |
| a _g /a ₀ /PGA | g | Acceleració pic |
| T | s | Període de vibració |
| S _a (T) | g | Acceleració de l'espectre de resposta elàstica |

Índex de figures i taules

Figures:

| | |
|--|----|
| Figura 1: Plànol de la ciutat de Barcelona, previ a l'Eixample, original de Cerdà | 18 |
| Figura 2: Districtes de Barcelona en l'actualitat | 19 |
| Figura 3: Diferències entre un carrer de l'Eixample i un de la ciutat antiga | 20 |
| Figura 4: Diferències entre un carrer de l'Eixample i un de la ciutat antiga | 21 |
| Figura 5: Diferències entre una illa de l'Eixample i una de la ciutat antiga | 21 |
| Figura 6: Diferències entre illes de l'Eixample i illes de la ciutat antiga | 22 |
| Figura 7: Diferències entre infraestructures del transport a l'Eixample i a la ciutat vella | 22 |
| Figura 8: Plànol original del Pla Cerdà | 23 |
| Figura 9: Evolució de l'altura dels edificis | 23 |
| Figura 10: Pla original de Cerdà amb 2 rengleres d'edificis construïts i jardí d'illa | 24 |
| Figura 11: Evolució de l'estructura d'illa del concepte a l'actualitat | 24 |
| Figura 12: Representació 3D de la planta baixa i planta tipus del edifici ED02 de xamfrà amb els elements característics. | 25 |
| Figura 13: Sostre de forjat de bigueta i revoltó típic de la construcció de l'època | 26 |
| Figura 14: Casa Josep Padró i Casa Batlló com exemples d'edificis de xamfrà i de línia respectivament. | 28 |
| Figura 15: Vista frontal dels edificis d'estudi per aquest treball ubicats a l'eixample esquerra de Barcelona | 29 |
| Figura 16: Vista posterior dels edificis d'estudi per aquest treball ubicats a l'eixample esquerra de Barcelona | 30 |
| Figura 17: Plànol CAD de la planta baixa o tova del ED01 | 31 |
| Figura 18: Plànol CAD de la planta tipus del ED01 | 32 |
| Figura 19: Plànol CAD de la secció del ED01 | 33 |
| Figura 20: Plànol CAD planta baixa del ED02 | 34 |
| Figura 21: Plànol CAD planta tipus del ED02 | 35 |
| Figura 22: Secció CAD del edifici ED02 | 36 |
| Figura 23: Plànol CAD planta baixa del conjunt dels edificis ED01, ED02, ED01 | 37 |
| Figura 24: Plànol CAD planta tipus del conjunt dels edificis ED01, ED02, ED01 | 38 |
| Figura 25: Sostre del agregat d'edificis amb bigueta metàl·lica i revoltó ceràmic | 39 |
| Figura 26: Mapa de perillositat sísmica on s'aprecia el PGA i K | 43 |
| Figura 27: Espectres de resposta elàstica, per 5% d'amortiment, $K=1$, per als diferents tipus de terra en els diferents casos per PGA (Peak Ground Acceleration) = 0.1, 0.2, 0.3 segons la NCSE-02 | 46 |
| Figura 28: Espectres de resposta de tipus 1 compresos en l'Eurocodi EC-08, normalitzat i pels casos de PGA = 0.1, 0.2, 0.4g per a $\eta = 1$ | 50 |
| Figura 29: Espectres de resposta de tipus 2 compresos en l'Eurocodi EC-08, normalitzat i pels casos de PGA = 0.1, 0.2, 0.4g per a $\eta=1$ | 50 |
| Figura 30: Diferents zones locals de Barcelona segons Irizarry | 52 |
| Figura 31: Espectres de resposta del Institut Geològic de Catalunya. Cas determinista i probabilista | 53 |
| Figura 32: Espectre de resposta elàstica en format ADSR Sa-Sd corresponent a un escenari probabilista (475 anys) per a la ciutat de Barcelona | 54 |
| Figura 33: Espectres de resposta per dos escenaris específics desenvolupats per l'institut Geològic de Catalunya per a la ciutat de Barcelona en format Sa-T | 54 |
| Figura 34: Exemple d'accelerograma extret de la base de dades del Institut Geogràfic Nacional. Representades les dades corregides i sense corregir i també els espectres de amplituds de Fourier. | 55 |
| Figura 35: Exemple d'accelerograma extret de la base de dades del Institut Geogràfic Nacional. Representades les dades corregides i sense corregir i també els espectres de amplituds de Fourier. | 56 |
| Figura 36: Espectres de resposta normalitzats corresponents a 70 accelerogrames ocorreguts a Espanya. Representats els espectres definits per a terra tipus roca de la norma NCSE-02 i els espectres tipus 1 i 2 del EC-8. | 56 |

| | |
|--|----|
| Figura 37: Figura conceptual d'una corba Pushover on està representada la força aplicada per proporcionar un desplaçament en el sostre i un tallant en la base | 57 |
| Figura 38: Corbes Pushover amb i sense pretractament | 58 |
| Figura 39: Modelització 3Muri del ED01 de maçoneria | 59 |
| Figura 40: Modelització Planta Baixa ED01 | 60 |
| Figura 41: Modelització Planta tipus ED01 | 60 |
| Figura 42: Modelització 3Muri del ED02 frontal | 61 |
| Figura 43: Modelització 3Muri del ED02 posterior | 61 |
| Figura 44: Modelització Planta baixa ED02 | 61 |
| Figura 45: Modelització planta tipus ED02 | 61 |
| Figura 46: Modes 1, 2 i 3 de vibració fonamental en els edificis. | 62 |
| Figura 47: Patró de distribució de càrregues laterals seguint el moviment de l'estructura | 64 |
| Figura 48: Esquematització del sistema equivalent SDOF (D_{roof} vs. F_{base}) | 66 |
| Figura 49: Gràfic del mètode N2 per un sistema SDOF | 66 |
| Figura 50: Cas lineal on PP en format ADSR per a ED01 amb $PGA=0.04g$ recau en zona elàstica | 67 |
| Figura 51: Cas no lineal on PP en format ADSR per a ED01 amb $PGA=0.194g$ recau en zona no elàstica | 68 |
| Figura 52: Llindars d'afectació representats en la forma bilineal | 70 |
| Figura 53: Exemples de corbes de fragilitat del ED01 per empenta positiva en l'eix de les Y | 71 |
| Figura 54: Exemple de probabilitats per cada un dels estats de dany per $PGA=0,194$ i $0,04g$ | 72 |
| Figura 55: Exemples d'índex de danys per al PP de 0.04 i $0,194g$ (Primer desplaçament i segon respectivament) | 72 |
| Figura 56: Desplaçament de la 7ª planta de ED01 amb una empenta $X+$ | 73 |
| Il·lustració 57: Corba Pushover del edifici ED02 i de l'agregat per a $X-NEG$ | 74 |
| Figura 58: Vista aèria del conjunt d'edificis amb el seu sistema de eixos coordenats | 75 |
| Figura 59: Espectre de capacitat X-Push Tallant basal vs. Desplaçament al sostre del agregat | 77 |
| Figura 60: Capacitat acceleració vs. desplaçament | 77 |
| Figura 61: Capacitat força vs. desplaçament | 77 |
| Figura 62: Espectre de capacitat Y-Push Tallant basal vs. Desplaçament al sostre del agregat | 78 |
| Figura 63: Capacitat acceleració vs. desplaçament | 78 |
| Figura 64: Capacitat força vs. desplaçament | 78 |
| Figura 65: Espectre de capacitat X-Push Tallant basal vs. Desplaçament al sostre del ED01 | 79 |
| Figura 66: Capacitat acceleració vs. desplaçament | 79 |
| Figura 67: Capacitat força vs. desplaçament | 79 |
| Figura 68: Espectre de capacitat Y-Push Tallant basal vs. Desplaçament al sostre del ED01 | 80 |
| Figura 69: Capacitat acceleració vs. desplaçament | 80 |
| Figura 70: Capacitat força vs. desplaçament | 80 |
| Figura 71: Espectre de capacitat X-Push Tallant basal vs. Desplaçament al sostre del ED02 | 81 |
| Figura 72: Capacitat acceleració vs. desplaçament | 81 |
| Figura 73: Capacitat força vs. desplaçament | 81 |
| Figura 74: Espectre de capacitat Y-Push Tallant basal vs. Desplaçament al sostre del ED02 | 82 |
| Figura 75: Capacitat acceleració vs. desplaçament | 82 |
| Figura 76: Capacitat força vs. desplaçament | 82 |
| Figura 77: Punt d'acompliment PP per l'agregat en X-Push per $PGA=0.040g$ (NCSE-02) | 83 |
| Figura 78: Punt d'acompliment PP per l'agregat en X-Push per $PGA=0.194g$ (NCSE-02) | 83 |
| Figura 79: Punt d'acompliment PP per l'agregat en Y-Push per $PGA=0.040g$ (NCSE-02) | 84 |
| Figura 80: Punt d'acompliment PP per l'agregat en Y-Push per $PGA=0.194g$ (NCSE-02) | 84 |
| Figura 81: Punt d'acompliment PP per ED01 en X-Push per $PGA=0.040g$ (NCSE-02) | 85 |
| Figura 82: Punt d'acompliment PP per ED01 en X-Push per $PGA=0.194g$ (NCSE-02) | 85 |
| Figura 83: Punt d'acompliment PP per ED01 en Y-Push per $PGA=0.040g$ (NCSE-02) | 86 |
| Figura 84: Punt d'acompliment PP per ED01 en Y-Push per $PGA=0.194g$ (NCSE-02) | 86 |
| Figura 85: Punt d'acompliment PP per ED02 en X-Push per $PGA=0.040g$ (NCSE-02) | 87 |
| Figura 86: Punt d'acompliment PP per ED02 en X-Push per $PGA=0.194g$ (NCSE-02) | 87 |
| Figura 87: Punt d'acompliment PP per ED02 en Y-Push per $PGA=0.040g$ (NCSE-02) | 88 |
| Figura 88: Punt d'acompliment PP per ED02 en Y-Push per $PGA=0.194g$ (NCSE-02) | 88 |
| Figura 89: Corba de fragilitat X-Push per l'agregat segons NCSE-02 | 89 |
| Figura 90: Corba de fragilitat Y-Push per l'agregat segons NCSE-02 | 89 |
| Figura 91: Corba de fragilitat X-Push per ED01 segons NCSE-02 | 90 |
| Figura 92: Corba de fragilitat Y-Push per ED01 segons NCSE-02 | 91 |
| Figura 93: Corba de fragilitat X-Push per ED02 segons NCSE-02 | 92 |

| | | |
|---|---------------------------------------|-----|
| Figura 94: Corba de fragilitat Y-Push per ED02 segons NCSE-02 | 92 | |
| Figura 95: Estats de dany per l'agregat sotmès a X-Push amb un PGA=0.040g segons NCSE-02 | 94 | |
| Figura 96: Estats de dany per l'agregat sotmès a X-Push amb un PGA=0.194g segons NCSE-02 | 94 | |
| Figura 97: Estats de dany per l'agregat sotmès a Y-Push amb un PGA=0.040g segons NCSE-02 | 94 | |
| Figura 98: Estats de dany per l'agregat sotmès a Y-Push amb un PGA=0.194g segons NCSE-02 | 94 | |
| Figura 99: Estats de dany per ED01 sotmès a X-Push amb un PGA=0.040g segons NCSE-02 | 95 | |
| Figura 100: Estats de dany per ED01 sotmès a X-Push amb un PGA=0.194g segons NCSE-02 | 95 | |
| Figura 101: Estats de dany per ED01 sotmès a Y-Push amb un PGA=0.040g segons NCSE-02 | 95 | |
| Figura 102: Estats de dany per ED01 sotmès a Y-Push amb un PGA=0.194g segons NCSE-02 | 95 | |
| Figura 103: Estats de dany per ED02 sotmès a X-Push amb un PGA=0.040g segons NCSE-02 | 96 | |
| Figura 104: Estats de dany per ED02 sotmès a X-Push amb un PGA=0.194g segons NCSE-02 | 96 | |
| Figura 105: Estats de dany per ED02 sotmès a Y-Push amb un PGA=0.040g segons NCSE-02 | 97 | |
| Figura 106: Estats de dany per ED02 sotmès a Y-Push amb un PGA=0.194g segons NCSE-02 | 97 | |
| Figura 107: Índex de dany X-Push per cada desplaçament espectral del agregat segons NCSE-02 | 98 | |
| Figura 108: Índex de dany Y-Push per cada desplaçament espectral del agregat segons NCSE-02 | 99 | |
| Figura 109: Índex de dany X-Push per cada desplaçament espectral del ED01 segons NCSE-02 | 100 | |
| Figura 110: Índex de dany Y-Push per cada desplaçament espectral del ED01 segons NCSE-02 | 100 | |
| Figura 111: Índex de dany X-Push per cada desplaçament espectral del ED02 segons NCSE-02 | 101 | |
| Figura 112: Índex de dany X-Push per cada desplaçament espectral del ED02 segons NCSE-02 | 101 | |
| Figura 113: Desplaçaments per Push X+ | Figura 114: Desplaçaments per Push Y+ | 102 |
| Figura 115: Desplaçaments per Push X- | Figura 116: Desplaçaments per Push Y- | 103 |
| Figura 117: Desplaçaments per Push X+ | Figura 118: Desplaçaments per Push Y+ | 104 |
| Figura 119: Desplaçaments per Push X- | Figura 120: Desplaçaments per Push Y- | 104 |
| Figura 121: Corbes pushover del ED02 i l'agregat per X-POS | 106 | |
| Figura 122: Corbes pushover del ED02 i l'agregat per X-NEG | 107 | |
| Figura 123: Corbes pushover del ED02 i l'agregat per Y-POS | 107 | |
| Figura 124: Corbes pushover del ED02 i l'agregat per Y-NEG | 108 | |

Taules:

| | |
|---|-----|
| Taula 1: Diversos gruixos representatius e l'edifici ED01 | 34 |
| Taula 2: Diversos gruixos representatius e l'edifici ED01 | 36 |
| Taula 3: Tipus de terreny y la seva respectiva C segons NCSE-02 | 44 |
| Taula 4: Diferències entre els tipus de terrenys segons la norma espanyola NCSE-02 i l'Eurocodi EC-08 segons la velocitat mitja | 49 |
| Taula 5: Paràmetres dels espectres de resposta corresponents als escenaris determinista i probabilista per a la ciutat de Barcelona | 52 |
| Taula 6: Propietats mecàniques de la maçoneria dels 3 edificis | 59 |
| Taula 7: Definició dels llindars de dany segons Lagomarsindo | 69 |
| Taula 8: Probabilitat dels estats de dany esperats quan es fixa en 50% la probabilitat per cada estat de dany | 71 |
| Taula 9: Desviacions entre paràmetres d'estudi de l'agregat ED01-02-01 | 76 |
| Taula 10: Punts característics de les corbes pushover per ED01-02-01 | 78 |
| Taula 11: Punts característics de les corbes pushover per ED01 | 80 |
| Taula 12: Punts característics de les corbes pushover per ED02 | 82 |
| Taula 13: PP de ED01-02-01 per les diferents Normatives i PGAs per X positiu | 83 |
| Taula 14: PP de ED01-02-01 per les diferents Normatives i PGAs per Y positiu | 84 |
| Taula 15: PP de ED01 per les diferents Normatives i PGAs per X positiu | 85 |
| Taula 16: PP de ED01 per les diferents Normatives i PGAs per Y positiu | 86 |
| Taula 17: PP de ED02 per les diferents Normatives i PGAs per X positiu | 87 |
| Taula 18: PP de ED02 per les diferents Normatives i PGAs per Y positiu | 88 |
| Taula 19: Fragilitat de ED01-02-01 pels diferents marcs normatius, direccions i PGAs | 90 |
| Taula 20: Fragilitat de ED01 pels diferents marcs normatius, direccions i PGAs | 91 |
| Taula 21: Fragilitat de ED02 pels diferents marcs normatius, direccions i PGAs | 93 |
| Taula 22: Estats de dany de ED01-02-01 per les diferents direccions i PGAs | 95 |
| Taula 23: Estats de dany de ED01 per les diferents direccions i PGAs | 96 |
| Taula 24: Estats de dany de ED02 per les diferents direccions i PGAs | 97 |
| Taula 25: Índex de danys per ED01-02-01 pels diferents PGAs i direccions | 99 |
| Taula 26: Índex de danys per ED01 pels diferents PGAs i direccions | 100 |
| Taula 27: Índex de danys per ED02 pels diferents PGAs i direccions | 101 |
| Taula 28: Valors modals per al conjunt d'edificis en ambdues direccions per els 3 primers modes de vibració | 102 |
| Taula 29: Valors modals per al conjunt d'edificis en ambdues direccions per els 3 primers modes de vibració | 103 |
| Taula 30: Valors modals per al conjunt d'edificis en ambdues direccions per els 3 primers modes de vibració | 105 |
| Taula 31: Tallants i desplaçaments del ED02 i l'agregat per totes les direccions i sentits | 108 |
| Taula 32: Comparativa de la capacitat de les diferents tipologies d'edifici per la norma NCSE-02 | 109 |
| Taula 33: Comparativa del PP de les diferents tipologies d'edifici per la norma NCSE-02 | 110 |
| Taula 34: Desplaçaments espectrals i períodes per cada PP ambdues direccions | 111 |
| Taula 35: Comparativa de la fragilitat de les diferents tipologies d'edifici per la norma NCSE-02 | 112 |
| Taula 36: Comparativa dels estats de dany de les diferents tipologies d'edifici per la norma NCSE-02 | 113 |
| Taula 37: Comparativa del Índex de dany de les diferents tipologies d'edifici per la norma NCSE-02 | 113 |
| Taula 38: Comparativa dels valors modals de les diferents tipologies d'edifici per la norma NCSE-02 | 114 |
| Taula 399: Tallants i desplaçaments del ED02 i l'agregat per totes les direccions i sentits | 116 |
| Taula 401: Consums i emissions per una HONDA PCX 125 durant el transcurs del treball | 118 |
| Taula 412: Taula de costos de la realització d'aquest treball | 119 |

Índex

| | |
|--|------------|
| RESUM | I |
| RESUMEN | II |
| ABSTRACT | III |
| AGRAÏMENTS | IV |
| GLOSSARI | V |
| ÍNDEX DE FIGURES I TAULES | VII |
| 1. PREFACI | 15 |
| 1.1 Origen del treball..... | 15 |
| 1.2 Motivació..... | 15 |
| 1.3 Requeriments previs | 15 |
| 2. INTRODUCCIÓ | 16 |
| 2.1 Objectius del treball | 16 |
| 2.2 Abast del treball | 17 |
| 2.3 Introducció històrica..... | 17 |
| 2.3.1 Barcelona i el Pla Cerdà..... | 17 |
| 2.3.2 L'Eixample..... | 19 |
| 2.3.3 Sistemes constructius dels edificis | 25 |
| 2.3.4 Problemàtica actual..... | 26 |
| 3. PRESENTACIÓ DELS EDIFICIS | 28 |
| 3.1 Tipus d'edificis de Barcelona..... | 28 |
| 3.2 Edificis escollits (ED01- ED02 - ED01) | 29 |
| 3.2.1 ED01..... | 31 |
| 3.2.2 ED02..... | 34 |
| 3.2.3 Conjunt ED01 – ED02 – ED01 | 37 |
| 4. ESTAT DE L'ART | 41 |
| 4.1 Descripció de la demanda | 41 |
| 4.1.1 Intensitat-acceleració. Model uni-paramètric..... | 41 |
| 4.1.2 Espectres de resposta. Model multi-paramètric..... | 42 |
| 4.2 Descripció de la capacitat..... | 57 |
| 4.2.1 Corba <i>pushover</i> | 57 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 4.2.2 | 3Muri..... | 58 |
| 4.3 | Descripció del mètode estàtic no lineal (N2)..... | 62 |
| 4.3.1 | Performance Point (Punt d'acompliment) | 67 |
| 4.3 | Fragilitat..... | 69 |
| 4.3.1 | Llindars de dany | 69 |
| 4.3.2 | Corbes de fragilitat..... | 70 |
| 4.5 | Anàlisi modal | 73 |
| 4.6 | Anàlisi de fragilitat i ductilitat | 74 |
| 4.7 | Simetria de l'agregat | 75 |
| 5. | RESULTATS | 77 |
| 5.1 | Corbes de capacitat..... | 77 |
| 5.1.1 | Pushover dels ED01-ED02-ED01..... | 77 |
| 5.1.1 | Pushover del ED01 | 79 |
| 5.1.2 | Pushover del ED02 | 81 |
| 5.2 | Capacitat i demanda..... | 83 |
| 5.2.1 | Capacitat i demanda de ED01-ED02-ED01 | 83 |
| 5.2.2 | Capacitat i demanda de ED01..... | 85 |
| 5.2.3 | Capacitat i demanda de ED02..... | 87 |
| 5.3 | Corbes de fragilitat | 89 |
| 5.3.1 | Fragilitat de ED01-ED02-ED01 | 89 |
| 5.3.2 | Fragilitat de ED01..... | 90 |
| 5.3.3 | Fragilitat de ED02..... | 92 |
| 5.4 | Estats de dany | 94 |
| 5.4.1 | Estats de dany per ED01-ED02-ED01..... | 94 |
| 5.4.2 | Estats de dany per ED01 | 95 |
| 5.4.3 | Estats de dany per ED02 | 96 |
| 5.5 | Índex de dany | 98 |
| 5.5.1 | Índex de dany per ED01-ED02-ED01 | 98 |
| 5.5.2 | Índex de dany per ED01 | 100 |
| 5.5.3 | Índex de dany per ED02..... | 101 |
| 5.6 | Anàlisi modal | 102 |
| 5.6.1 | Anàlisi modal per ED01-ED02-ED01 | 102 |
| 5.6.2 | Anàlisi modal per ED01..... | 102 |
| 5.6.3 | Anàlisi modal per ED02..... | 104 |
| 5.7 | Anàlisi de fragilitat i ductilitat | 106 |
| 5.7.1 | X-POS..... | 106 |

| | | |
|------------|--|------------|
| 5.7.2 | X-NEG | 107 |
| 5.7.3 | Y-POS..... | 107 |
| 5.7.4 | Y-NEG | 108 |
| 6. | COMPARATIVA DE LES DIFERENTS TIPOLOGIES | 109 |
| 6.1 | Anàlisi estàtic no lineal..... | 109 |
| 6.2 | Fragilitat..... | 112 |
| 6.3 | Anàlisi modal | 114 |
| 6.4 | Anàlisi de fragilitat i ductilitat | 116 |
| 7. | CONCLUSIONS | 117 |
| 8. | ANÀLISI DE L'IMPACTE AMBIENTAL | 118 |
| 9. | PRESSUPOST I/O ANÀLISI ECONÒMICA | 119 |
| 10. | BIBLIOGRAFIA | 121 |

1. Prefaci

1.1 Origen del treball

El present treball neix de la col·laboració del redactant amb el professor Jorge Ávila, del departament de Resistència de Materials i Estructures a l'Enginyeria, qui va proposar aquesta temàtica degut als seus coneixements en aquest camp, concretament en tot el referent a la vulnerabilitat i el risc sísmic en edificis de maçoneria sense reforçar al Districte de l'Eixample de Barcelona.

1.2 Motivació

La motivació principal per tirar endavant aquest treball, ha estat la curiositat sobre el tema proposat. És un camp que potser no involucra l'enginyeria mecànica pròpiament, però sí que és un tema interessant per qualsevol enginyer mecànic.

Després de cursar assignatures de la carrera com són Resistència de Materials o Estructures, se'm va despertar un gran interès en la temàtica de tot el que estava relacionat amb les estructures i la seva capacitat a resistir.

A part, des de ben petit que he estat un apassionat de l'enginyeria, tant del motor, com de l'arquitectura o de civil. Per tant, aquest tema m'ha empenyat a agafar-me aquest treball amb motivació de conèixer un camp que no s'hi entra durant la carrera, però que ara podré aprendre i documentar.

1.3 Requeriments previs

Respecte a aquest apartat, no s'ha necessitat coneixements previs profunds sobre cap temàtica en concret, ja que es considera que la intenció del treball és la recerca i l'autoaprenentatge dels coneixements i eines necessàries per desenvolupar el treball en sí. Tot i així, ha sigut de gran ajuda tenir nocions de programes com són Matlab o Autocad i òbviament coneixements de software d'ofimàtica com és el Word, Excel o PowePoint.

D'altra banda, com he comentat al apartat anterior, en aquest treball s'ha vist temari cursat en assignatures de l'escola com són, Estructures i Construccions Industrials, Resistència dels Materials, Elasticitat o Sistemes mecànics.

2. Introducció

Des del punt de vista de les estructures, els terratrèmols consisteixen en moviments aleatoris horitzontals i verticals en la superfície de la terra. A mesura que el terreny es mou, la inèrcia tendeix a mantenir l'estructura en el seu lloc original, la qual cosa comporta a la imposició de desplaçaments i de forces que poden tenir resultats catastròfics.

Per aquesta raó, davant d'un fenomen natural com un terratrèmol, tot edifici i infraestructura té una vulnerabilitat inherent que necessita ser estudiada.

Aquest treball es centra, doncs, en l'estudi dels efectes sísmics que patirien els edificis de l'Eixample en el cas d'un suposat terratrèmol. Més concretament, en l'anàlisi de tres edificis que conformen un xamfrà, tot estudiant les combinatòries d'aïllar-los o ajuntar-los per comprovar les diferències en quant a capacitat estructural.

Aquests tres edificis daten de principis del segle passat, quan la tècnica de construcció per defecte era la maçoneria amb un disseny encarat únicament a suportar càrregues verticals. Si això se li suma que no existia normativa sísmica estatal alguna (Primera regulació sísmica del 1968 amb la PGS-1), esdevé un interrogant sobre la capacitat per suportar càrregues horitzontals d'aquestes construccions a dia d'avui, i, conseqüentment, ens preguntem si s'haurien de prendre mesures al respecte.

Tot i que en un primer moment les possibilitats de que ocorri un terratrèmol a Barcelona són baixes, doncs el territori del Barcelonès no és zona de risc sísmic elevat, no es pot subestimar un fenomen tant imprevisible com és un terratrèmol. És per aquest motiu que els sismes amb les conseqüències més devastadores han ocorregut en les ciutats menys preparades al respecte, Lorca (2011, Espanya), Amatrice (2016, Itàlia)...etc. Tampoc podem obviar que, cada cop més, ens trobem amb enderroc d'edificis antics per donar lloc a noves construccions. El punt anterior, i degut a les tècniques i usos constructius de l'època on una gran quantitat de construccions compartien les seves parets mitgeres, conformant agregats d'edificis que podien estendre's inclús per tota l'illa, provocaria una ruptura en la continuïtat de susdits agregats, podent tenir efectes que podrien minvar la seva capacitat o estabilitat.

2.1 Objectius del treball

L'objectiu d'aquest treball és l'estudi sísmic de diferents edificacions de l'Eixample. Concretament s'estudiaran tres edificis ubicats en un xamfrà amb edificis adjacents a banda i banda.

Aquests tres edificis conformen un xamfrà, s'estudiarà llavors els efectes sísmics de l'agregat i dels edificis de forma aïllada per verificar el fenomen d'enfortiment per unió.

D'aquesta manera, seguint les regulacions i estudis actuals en la matèria, s'avaluaran les diferències de capacitat estructural que presenten els edificis en el seu conjunt i l'edifici sol. Analitzant i enfrontant aquestes dades amb la demanda sísmica, s'extrauran les conclusions pertinents juntament amb les dades de vulnerabilitat, fragilitat i dany.

2.2 Abast del treball

En quant a l'abast de l'estudi, es farà un estudi teòric i històric de les característiques constructives dels edificis de l'Eixample.

Com a mètode de treball s'introduirà el mètode estàtic no lineal (NSP-N2) i diferents conceptes teòrics que es presentaran en el treball, com són la demanda, la capacitat o la fragilitat.

Per dur-ho a terme, s'utilitzaran plànols en format CAD dels edificis. Aquests plànols han estat proporcionats pel tutor i serviran per localitzar els principals elements estructurals de cada edifici. Tenint aquesta informació es pot fer un model dels edificis amb el software 3Muri, que serà l'encarregat de definir la capacitat de cada una de les construccions. Amb aquestes dades i utilitzant el programari Matlab, disposarem totes les capacitats estructurals envers la demanda del sisme i altres gràfiques d'interès com a fragilitat o els danys.

D'aquesta manera podrem saber com es comporta cada edifici en cada moment fins el instant de col·lapse. D'aquí s'extrauran totes les conclusions referents a la situació actual de l'Eixample per evidenciar aquest estudi.

2.3 Introducció històrica

2.3.1 Barcelona i el Pla Cerdà

Per entendre la decisió de tirar endavant un projecte de tal envergadura com va ser el de la construcció de l'Eixample, s'han de presentar alguns antecedents històrics.

Remuntant-nos a l'època d'interès, mitjans del segle XIX, Barcelona era una ciutat fortificada i reprimida entre muralles, que havia crescut de forma concèntrica des de la seva primera ciutat romana, construïda al segle III en la vall del cim Tabor, arribant a expandir-se fins les 300 Ha de superfície. Aquesta àrea correspon pràcticament amb el que avui coneixem com la Ciutat Vella.

La població de la ciutat era d'uns 300.000 Habitants, xifra altíssima si es considera una densitat de població de 1.000 habitants per Ha. Si a més tenim en compte la falta de condicions higièniques en els habitatges i els serveis públics, i el poc desenvolupament de la ciència mèdica fins al moment, era evident que la població tenia necessitat d'una modernització i d'una expansió territorial.¹

S'oposaven a aquest desig ciutadà, raons de caràcter militar, ja que encara durava en la memòria de la gent, els atacs de les tropes franceses. Per aquest motiu, el govern es mostrava advers a la supressió del recinte emmurallat.²

Així i tot, les possibilitats d'expansió eren abundants i profitoses. Tota la plana des de les conques dels rius Besos i Llobregat, i limitant pel Mar mediterrani i la muntanya del Tibidabo (veure figura 1). Tota aquesta extensió de terreny ofería un ventall immens de possibilitats, en una època de

¹ D. José Soteras Mauri, "Barcelona y El Plan Cerdà," 1960, 5.

² Ridruejo, F. Saenz. "Ildefonso Cerdà y La Evolución Urbana de Barcelona.", 1972, 386.

desenvolupament industrial i comercial, on la ciutat antiga ja havia arribat al seu màxim desenvolupament i creixement, i demanava una ciutat nova.¹

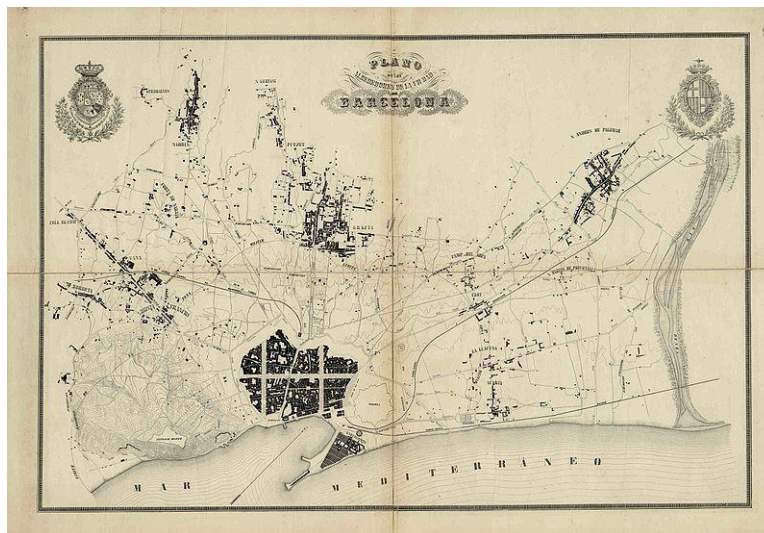


Figura 1: Plànol de la ciutat de Barcelona, previ a l'Eixample, original de Cerdà²

A causa d'una epidèmia de colera que va afectar greument a la població de Barcelona, el 12 d'agost de 1854 es va presentar una R.O que estableix que *“las murallas de Barcelona que miran a la parte de tierra y que constituyen el recinto de la plaza, serán demolidas”*. Això els hi va treure el poder als enginyers militars, per fer sorgir el Ministeri de Foment.

Per això, el 27 de desembre de 1854, el governador militar de Barcelona, complint ordres del govern, va encarregar al enginyer de camins Ildefonso Cerdà la redacció d'un plànol topogràfic dels voltants de Barcelona en un termini de 12 mesos. Cerdà s'hi va llençar amb tot l'entusiasme ja no com a topògraf, sinó com a visionari urbanista.

El resultat va ser una recopilació completa i urbanística de tots i cada un dels aspectes necessaris per d'ur a terme el futur projecte de la moderna Eixample. El ajuntament de Barcelona llavors, el 12 de febrer de 1859, va convocar un concurs de plans d'Eixample, entregant a cada concursant una còpia litogràfica del plànol aixecat per Cerdà.

El Ministeri de Foment, paral·lelament i coincidint quasi amb la mateixa data, 15 de febrer de 1859, va autoritzar a Cerdà perquè en el termini de 12 mesos presentés el seu Pla de l'Eixample. Només transcorreguts 4 mesos, l'enginyer Ildefonso Cerdà, va presentar el seu projecte facultatiu de l'Eixample de la ciutat de Barcelona. L'ajuntament de Barcelona va protestar per la R.O de 7 de juny de 1859 on s'aprovava el Pla Cerdà, al·legant la intromissió del govern en les facultats del municipi, però la seva protesta no va ser atesa. L'opinió pública s'oposava totalment al Pla Cerdà, potser per la imposició d'aquest, o potser per motius polítics i tècnics, ja que el pla de Cerdà era massa innovador per l'època.

Cerdà va titular el seu projecte amb el nom de *“Plano de los alrededores de Barcelona y proyecto de su reforma y ensanche”*. El pla abastava tota la plana exterior de la ciutat antiga, absorbint els

¹ E. Gimeno and F. Magrinyà, “La Intervenció de Cerdà En La Construcció de l'Eixample,” 1970, 167.

² Arxiu Històric de la Ciutat de Barcelona

pobles limítrofs que l'envoltaven (per exemple Gràcia), i la reforma del nucli antic amb l'obertura de tres vies. Això el va convertir no només en un pla d'eixamplament i reforma urbana, sinó en un pla comarcal.

2.3.2 L'Eixample

En l'actualitat, sense ser el districte més extens (7,46 Km² de superfície) és el districte més poblat de Barcelona amb 266.754 habitants¹ i amb una densitat de població de 35.630 habitants/km². A més és el districte més monumental de la ciutat, contenint molts dels atractius turístics més coneguts com és el Passeig de Gràcia, Les Rambles, Plaça Catalunya...

L'Eixample és un dels 10 districtes de la Barcelona actual, gràcies al decret de 1854 on es permetia derruir les muralles de la ciutat. A partir d'aquí comença el creixement de la ciutat, ja que es permet augmentar i urbanitzar totes les zones adjacents com serien; Horta, Gràcia, Sarrià, Sants o Sant Andreu (veure figura 2). Per aquest motiu la ciutat va començar una ràpida i forta expansió i va agrupar tots els pobles veïns amb el nom de Barcelona.



Figura 2: Districtes de Barcelona en l'actualitat²

Cerdà va traçar un pla modular, amb mòduls que permetia unitats de 400x400 m (160.000 m² de superfície) que comprenia 3x3 illes, cada illa de 133,33m entre eixos de carrers, i 113,33m de longitud d'illa quadrada (12.500m² de superfície d'illa). Els carrers que formaven la malla son de 20m d'amplada, molt innovador i visionari per l'imminent problema de circulació que patiria Barcelona, i amb la incorporació de xamfrans també de 20m (1931,2m² de superfície). A més a més, el pla contava amb zones enjardinades (un total de 77Ha), boscos (un total de 800Ha) i places.³

¹ Ajuntament de Barcelona "El districte i els seus barris", 2018.

² Wikipedia "Distrito del Ensanche", 2009.

³ Mauri, D. José Soteras. "Barcelona y El Plan Cerdà," 1960, 9.

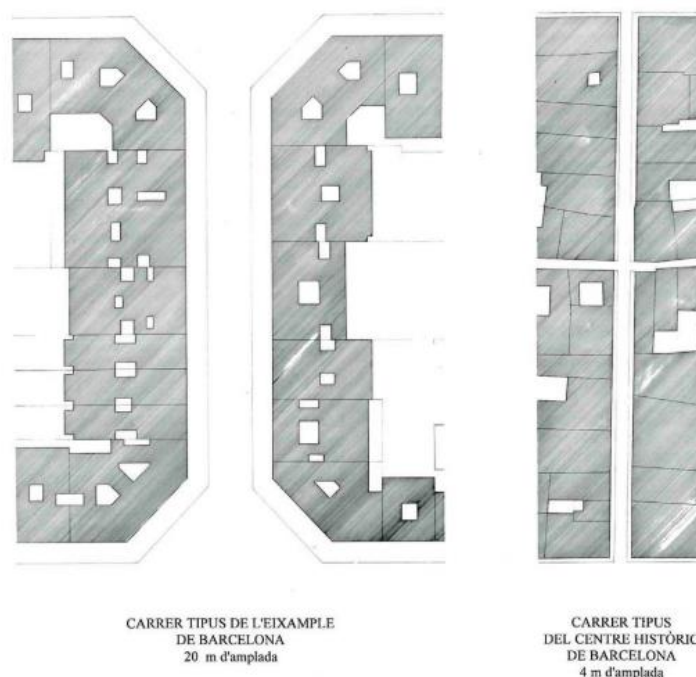


Figura 3: Diferències entre un carrer de l'Eixample i un de la ciutat antiga¹

El Pla Cerdà era la posada en escena d'un projecte que pretenia l'ordenació de la construcció, l'aprofitament i l'optimització de l'espai (veure figura 3). La sort que va tenir Cerdà i la ciutat de Barcelona, és que partia d'un projecte en blanc i d'extensió il·limitada, i això li permetia projectar tenint en compte tots els factors que podrien afectar a una ciutat, tant presents com futurs, i realitzar un projecte íntegre pensant de dalt a baix. És comú el problema que han tingut des de sempre les grans ciutats en relació al creixement i la construcció, ja que a vegades no es construeix amb projecció pel dia de demà, més aviat es va apedaçant la ciutat a mesura que van apareixent problemes o inconvenients. I és normal, ja que les ciutats estan en constant creixement, i per la seva naturalesa és molt difícil construir amb previsió de futur.

¹ Serratosa, Albert. "El Valor de l'Eixample de Cerdà, Avui," 1972, 48.

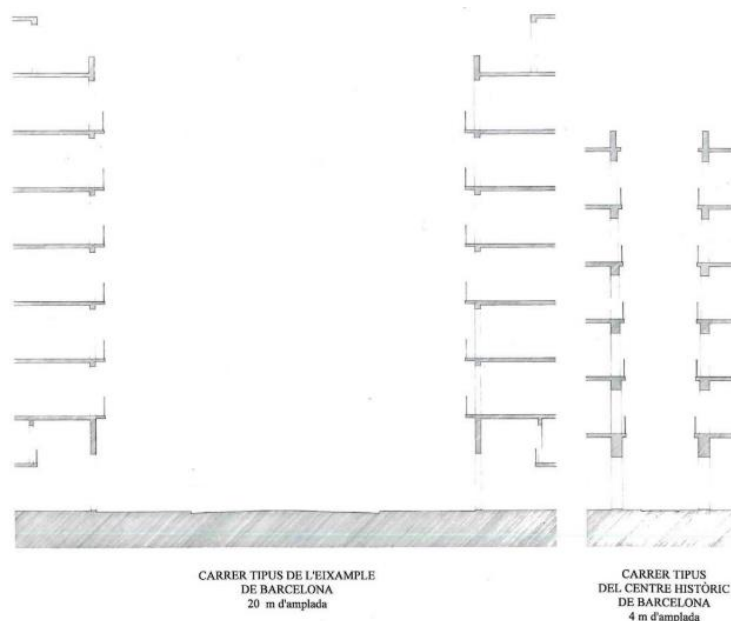


Figura 4: Diferències entre un carrer de l'Eixample i un de la ciutat antiga¹

A part, va fer créixer la ciutat pel que fa a l'amplada dels carrers i altura dels edificis (veure figura 4). Enrere quedava l'essència de ciutat medieval de carrers estrets i atapeïts d'edificis de mitjana altura. Això li donava un aire més diàfan i modern.

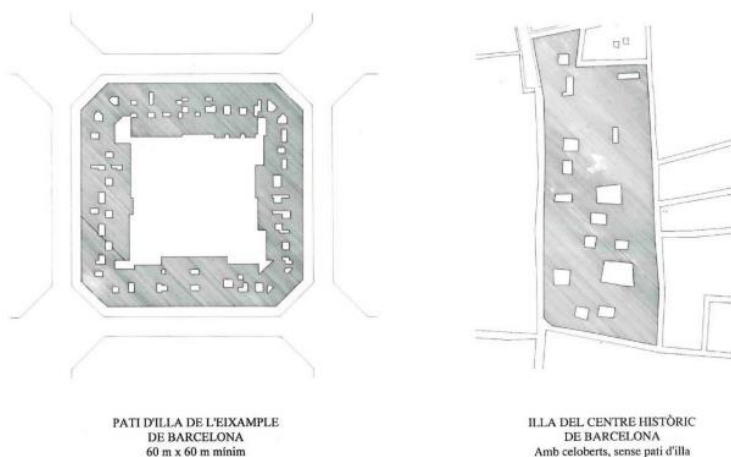


Figura 5: Diferències entre una illa de l'Eixample i una de la ciutat antiga²

Una innovació constructiva va ser el pati d'illa, que inicialment estaven dissenyats com jardí interior, amb la intenció de donar-li un pulmó a cada illa, però que en la realitat no ha proliferat (veure figura 5). De totes maneres, això li proporciona als edificis més lluminositat i ventilació, ja que els edificis donen a 2 vents.

¹ Serratosa, Albert. "El Valor de l'Eixample de Cerdà, Avui," 1972, 49.

² Serratosa, Albert. "El Valor de l'Eixample de Cerdà, Avui," 1972, 50.

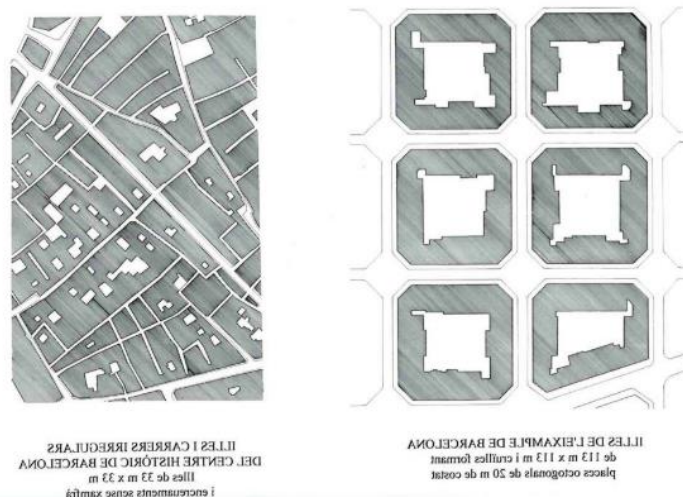


Figura 6: Diferències entre illes de l'Eixample i illes de la ciutat antiga¹

Va ser un pla urbanístic molt polèmic on la gent es va mostrar en desacord, no només pel projecte en si, que no acabava d'agradar, sinó perquè l'aprovació va ser imposada pel Regne d'Espanya en contra del projecte d'Antonio Rovira i Tries que havia guanyat el concurs de l'Ajuntament de Barcelona. Tot i això però, avui en dia és admirat com una obra d'ordenació meticulosa i igualitària. Patent queda quan veiem que tots els carrers són traçats amb paral·leles i perpendiculars formant una quadricula oberta (veure figura 6).²

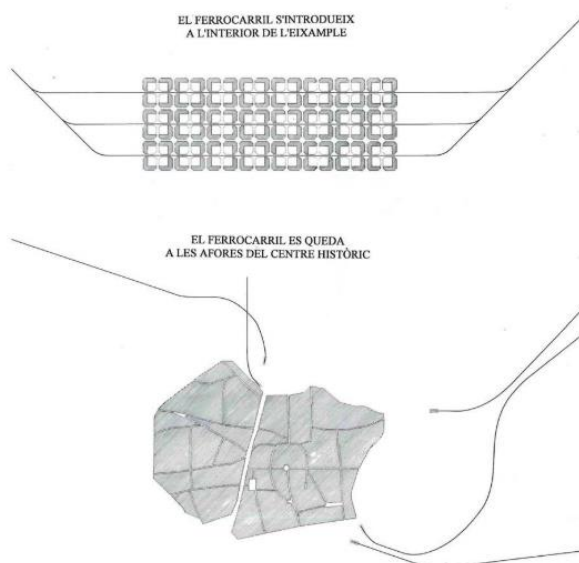


Figura 7: Diferències entre infraestructures del transport a l'Eixample i a la ciutat vella³

A part dels aspectes d'higienitzar la ciutat, a Cerdà també li preocupava la mobilitat. Va dissenyar una amplada de via inusual per l'època, no només pensant en un futur de mobilitat motoritzada,

¹ Serratosa, Albert. "El Valor de l'Eixample de Cerdà, Avui," 1972, 51.

² Lluís Permanyer, *L'Eixample, 150 Anys d'Història* (Barcelona: Viena Edicions i Ajuntament de Barcelona., 2008).

³ Serratosa, Albert. "El Valor de l'Eixample de Cerdà, Avui," 1972, 52.

sinó pensant en introduir el ferrocarril a dins de la ciutat, tot i tenir present que tenien que anar soterrades en un futur (veure figura 7).¹

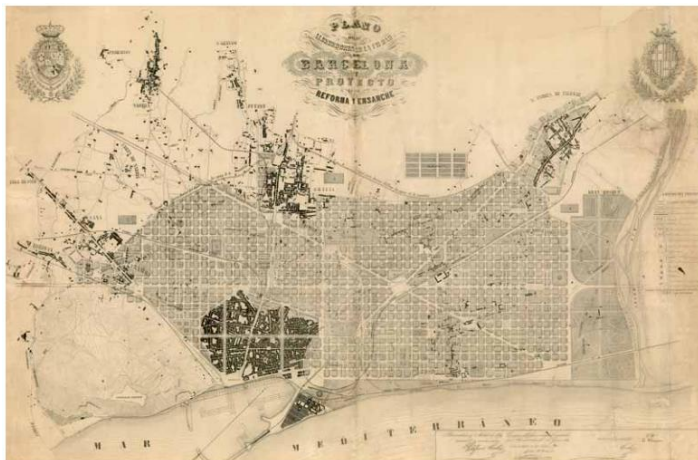


Figura 8: Plànol original del Pla Cerdà²

El problema d'un projecte de tanta envergadura i durada és que es va acabar desvirtuant i corrompent amb activitats especulatives per augmentar la superfície construïda.

El primer va ser augmentar l'altura dels edificis de 16 a 20m, ja que si els carrers feien 20m d'ample, i això no produiria cap ombra als edificis del voltant (veure figura 9) considerant una incidència solar de 45°.³

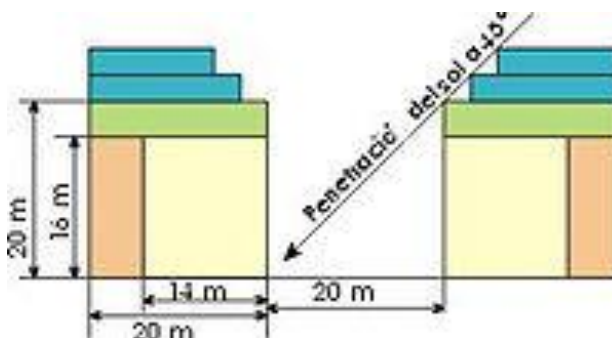


Figura 9: Evolució de l'altura dels edificis⁴

Posteriorment es va decidir tancar per complet les illes, ja que en el projecte de Cerdà cada illa només tenia 2 rengleres d'edificis, confrontats o oposants depenent de l'illa (veure figura 10).

¹Javier Muñoz Alvarez, "La Modernidad de Cerdà: Más Allá Del Ensanche," 2009, 95.

² Arxiu Històric de la Ciutat de Barcelona

³ Francesc Muñoz, "La Razon de La Ciudad: El Plan Cerda," *Metropolis*, no. 76 (2009).

⁴ Font Web



Figura 10: Pla original de Cerdà amb 2 rengleres d'edificis construïts i jardí d'illa¹

També es va ocupar el pati d'illa amb edificacions baixes, normalment tallers, quan inicialment havien de ser zones enjardinades. Finalment, tenint en compte la teoria anterior, si es construïa sobre l'edifici un pis més, però amb la façana retirada cap a l'interior, s'augmentava la superfície construïda sense ombrejar cap edifici veí. Així naixia el concepte d'àtic, i la de sobreàtic (veure figura 9 i 11)²

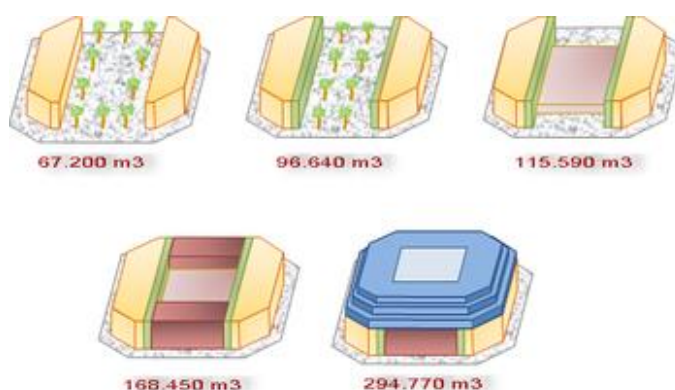


Figura 11: Evolució de l'estructura d'illa del concepte a l'actualitat³

La superfície d'una illa normal del Pla Cerdà és de 12.500 m² dels quals es destinaven 5.000 m² a edificació i 7.500 m² a jardins, o sigui el 40% de l'illa. Referint-nos al volum edificable previst per edificis de 16 m d'altura, tenim: 67.200 m³ originals envers els 294.770 m³ actuals, que dividits pels 12.500 m² de l'illa, es tradueix en un coeficient d'edificabilitat de 5,376 m³ per metre quadrat de solar referit de la línia de façana, comparat amb els 23,582 m³ reals.⁴

¹ Font Web

² Glòria Santa-Maria, *Decidir La Ciutat Futura. Barcelona 1859* (Barcelona: Ayuntamiento de Barcelona, 2009).

³ Font Web

⁴ Mauri, D. José Soteras. "Barcelona y El Plan Cerdá," 1960, 10.

2.3.3 Sistemes constructius dels edificis

En el desenvolupament constructiu de l'Eixample es va utilitzar el maó com a resolució de gairebé tots els elements arquitectònics dels edificis. Gràcies a això es van produir canvis tecnològics en la manera de produir-los i utilitzar-los. Originàriament es fabricaven manualment de forma repetitiva, però per culpa de la immensa demanda es van començar a produir de manera mecanitzada per extrusió.

Els primers habitatges de l'Eixample distaven de la típica construcció de l'època, ja que augmentaven de mida, sobretot en profunditat, que rondava els 25m. A part, com ja esmentat, el moviment higienista va crear el pati de llums com a sistema constructiu, i això provocarà que la construcció giri al voltant d'aquest pati (Veure figura 12).

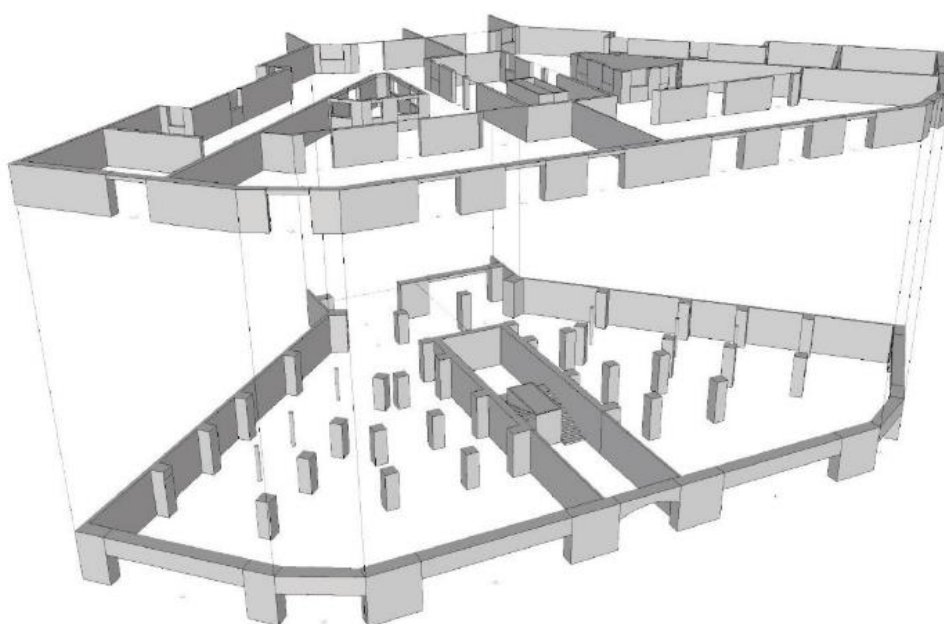


Figura 12: Representació 3D de la planta baixa i planta tipus del edifici ED02 de xamfrà amb els elements característics.¹

A mode de resum, els edificis es regien per els següents trets constructius:

- Edificis de maçoneria no reforçada o fàbrica.
- Altura entre 4 i 7 plantes .
- Murs de maó, amb gruixos de 30, 45 o 60 cm per façanes i de 15 a 30 cm per altres murs.
- Tenien per norma general 3 murs principals, dos corresponents a les façanes i una altre paral·lela a la façana frontal.
- Estaven dotats d'un pati de llums i un calaix d'escalas en el centre del edifici.

¹ Jorge Ávila

- Tenien el que s'anomena mitgeres. Són les parets laterals perpendiculars a la façana i que en moltes ocasions es compartien amb els edificis adjacents. S'hi afegien nervis perquè al construir els futurs edificis, les seves mitgeres, al unir-se, actuessin com un sol mur per millorar la capacitat davant de forces exteriors.
- Per la planta soterrani s'utilitzaven pilars de fosa o jàsseres on es recolzen els murs portants de l'estructura. Els pilars es recolzen en un dau recolzat alhora a un bloc de maçoneria de morter de cal. Es considera un node de l'estructura molt deformable.
- Per plantes inferiors, depenent de l'època de construcció s'utilitzaven procediments diferents, però pel cas dels nostres edificis s'utilitzen forjats de biguetes metàl·liques i revoltós ceràmics recolzats en jàsseres metàl·liques i pilars de fosa. Veure la figura següent:

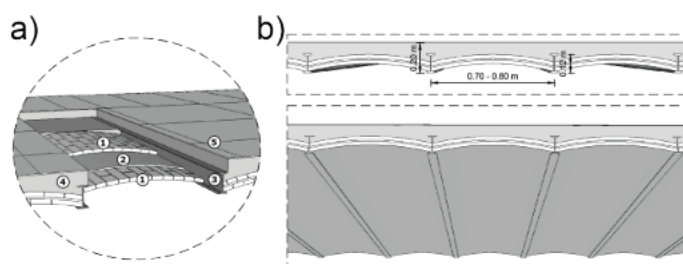


Figura 13: Sostre de forjat de bigueta i revoltó típic de la construcció de l'època¹

Aquest estil fa referència a la primera planta, per les consegüents s'utilitza forjats amb bigueta de fusta, reomplert amb morter, cal i paviment a sobre.

2.3.4 Problemàtica actual

Pel motiu comentat anteriorment, la sobre-construcció de les illes en l'últim segle, ha esdevingut un augment de la població de forma dràstica i amb un creixement exponencial de la ciutat. El resultat de la proposta de Cerdà i les modificacions afegides posteriorment, deriva en una ciutat dinàmica on consegüentment en l'actualitat s'han arribat a xifres de fins a 3.000 habitants per illa.

Un potencial problema que ha sorgit, i que serà el que ens incumbeixi en aquest treball, és la resposta d'aquests edificis enfront a una possible demanda sísmica. Tenint en compte que una gran part dels edificis daten d'abans del 1900, que la tècnica de construcció era la maçoneria o construcció de totxo i que eren edificis dissenyats únicament a càrrega vertical, mancants de qualsevol contemplació sismoterrestre, ja que no hi havia cap normativa referent als terratrèmols. La primera normativa a nivell estatal va entrar en vigor el 1968 amb la PGS-1, que va donar antecedents a la posterior PDS-1 (1974) i que va ser substituïda per la NCSE-94 ("Norma de Construcció sismoterrestre" de 1994). Actualment la NCSE-02 (2002) segueix en vigor i és la regulació per la que es regirà el present treball.

¹ J. A. Avila-Haro, J. Mácá, "A COMPARISON BETWEEN METHODOLOGIES IN THE SEISMIC ASSESSMENT OF URM BUILDINGS," 2015, 4.

Una altre contemplació a tenir en compte en la construcció de l'Eixample, és el posterior aixecament de plantes suplementaries de les que estaven projectades inicialment (àtics i sobreàtics) en els edificis, per intentar optimitzar al màxim els metres quadrats de construcció vertical.

En quant a sistemes constructius, generalment aquests edificis de construcció antiga tenen forjats de bigues de fusta, formigó o acer, i depenent de l'època de construcció amb revoltó de ceràmica. A part, una gran majoria d'aquests edificis tenen el que s'anomena pisos blancs, que correspon al pis planta on s'ubicaven comerços. Es caracteritza per espais més amplis i alts a causa de l'ús de pilars i bigues en lloc de murs de càrrega. Tot això suposa una reducció important de la rigidesa de l'edifici i deixa patent la seva vulnerabilitat.¹

Un altre problema que està esdevenint en l'actualitat, és que un percentatge elevat dels edificis de l'Eixample, de la tipologia estudiada en aquest treball, ja han complert amb el període de vida útil. Aquest punt és més difícil de mesurar degut als diferents factors, però tot i així hem de tenir present que molts d'ells sobrepassen els 100 anys. Una part discreta dels edificis són d'obra nova, i un dels motius és perquè s'han demolit d'antics. Aquest punt és el que més incumbeix aquest treball ja que s'estudiaran les conseqüències dels sismes després de deixar aïllats certs edificis de diferents tipologies (Veure figura 14)



Figura 14: Vista de l'enderroc d'un edifici tipus xamfrà per a la construcció d'una altre promoció d'habitatges²

¹ Ricardo Bonett, Alex H Barbat, and Lluís Pujades, "Curvas de Fragilidad Sísmica Para Edificios Tradicionales de Mampostería No Reforzada de Barcelona, España," 2004, 16.

² Jorge Ávila

3. Presentació dels edificis

3.1 Tipus d'edificis de Barcelona

Com ja esmentat prèviament, en la geometria característica del Pla Cerdà, que des d'una vista aèria és quadriculada i uniforme, es diferencien dues tipologies d'edificis dins de cada illa:

- Els **edificis de cantonada o xamfrà** són aquells que es troben a les cantonades de l'illa. Com és d'esperar trobem 4 per illa amb una disposició de 45° respecte als carrers convergents, i una façana de 20 m (distància del xamfrà)
- Els **edificis de banda o línia** són la resta, els que trobaríem alineats en qualsevol dels 4 carrers que formen l'illa (veure figura 14).



Figura 14: Casa Josep Padró i Casa Batlló com exemples d'edificis de xamfrà i de línia respectivament.¹

Comentat amb anterioritat, molts dels edificis de l'Eixample, inclosos els implicats d'aquest estudi, són previs a qualsevol publicació de normativa sísmica-terrestre, a més s'ha de considerar que la gran majoria ja han complert i sobrepassat la seva vida útil.

Els que encara no han arribat a la seva vida útil són els de construcció posterior on ja s'havia introduït el formigó armat. Per tant, tota la construcció del segle XIX de fàbrica o maçoneria no reforçada, es podria considerar antiga, ja que en la seva naturalesa constructiva s'inclouen tècniques com els forjats de biguetes de fusta, revoltós prefabricats ceràmics o formigó amb farcit de cal.

A més s'ha de contemplar que la majoria d'aquests edificis consten del que s'anomena zones toves en la planta sòl. Aquestes plantes són les que estan dedicades a activitats comercials, per aquesta raó tenen una alçada superior a la resta de plantes (s'ha de tenir en compte a l'hora de modelar) i creixen de murs de càrrega, ja que intenten ser espais més diàfans, i s'utilitzen pilars i bigues. (Veure la figura 12 on s'aprecia la diferència d'altures).

És per això que els edificis escollits per l'estudi estan afectats per tota la problemàtica comentada anteriorment.

¹ Google StreetView.

3.2 Edificis escollits (ED01- ED02 - ED01)

Els edificis escollits per ser assajats i realitzar aquest treball són 3 edificis existents avui en dia. Com no podia ser d'una altra manera, i sense donar més detalls són els 3 edificis que formen un xamfrà a l'Eixample esquerre de Barcelona. Aquests edificis conformaven un projecte únic d'un mateix arquitecte i per aquest motiu formen una simetria. D'aquesta manera només comptem amb 2 edificis singulars, entenent que el de la dreta i esquerra (edificis línia o banda) de l'edifici xamfrà són iguals.

Aquest projecte data del 1932, coincidint amb el postmodernisme, és un edifici molt representatiu de Barcelona per les seves característiques típiques i també per la seva construcció en fàbrica sense reforçar. A continuació les figures dels susdits:



Figura 15: Vista frontal dels edificis d'estudi per aquest treball ubicats a l'eixample esquerre de Barcelona¹

Presentant l'abreviació, ED01 i ED02 faran referència als edificis d'estudi, on ED01 seran els edificis extrems i ED02 serà l'edifici xamfrà (veure figures 15 i 16)

¹ Google Earth

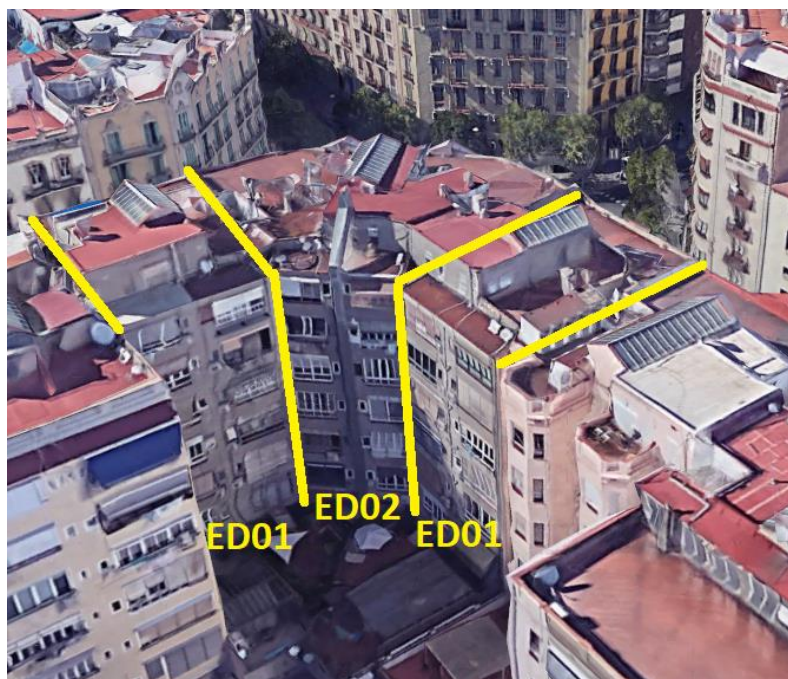


Figura 16: Vista posterior dels edificis d'estudi per aquest treball ubicats a l'eixample esquerra de Barcelona¹

Com a curiositat podem veure les lluernes o claraboies característiques del sistema constructiu del Pla Cerdà, que normalment coincideixen amb un pati de llums o una zona d'escalles.

Els edificis presentats són edificis reals existents, això donarà versemblança al treball, i ens facilitarà l'obtenció d'informació tècnica de l'estructura com serien els planells en format CAD.

¹ Google Earth

3.2.1 ED01

A continuació els plànols CAD de la planta baixa, planta tipus i de la secció del edifici.

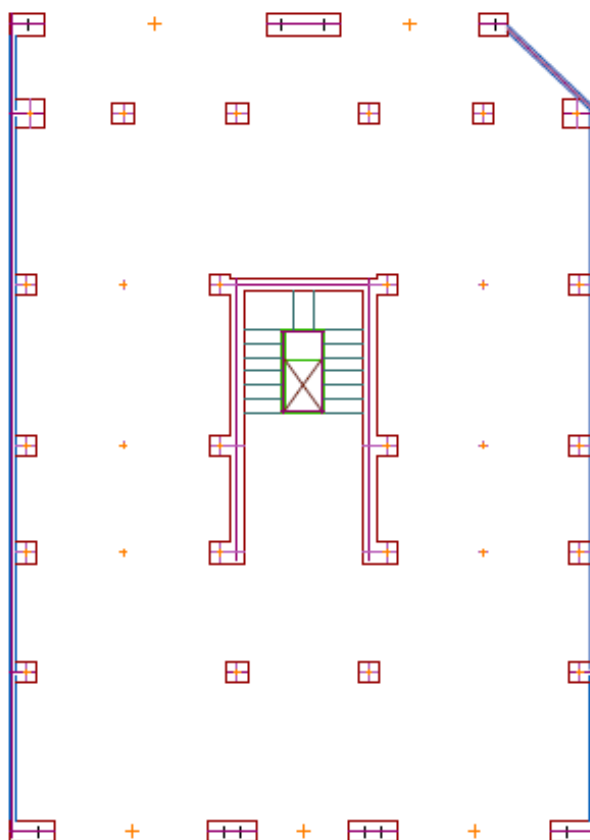


Figura 17: Plànol CAD de la planta baixa o tova del ED01¹

Aquí veiem les diferències entre la planta baixa (figura 17), dedicada a comerços, i la planta tipus (figura 18), dedicada a habitatges. En la planta tova es caracteritza per la utilització de columnes metàl·liques distribuïdes per tota la superfície sense la presència de murs de càrrega interns. Observem també el calaix d'escapes central que constitueix un element estructural.

¹ Font pròpia

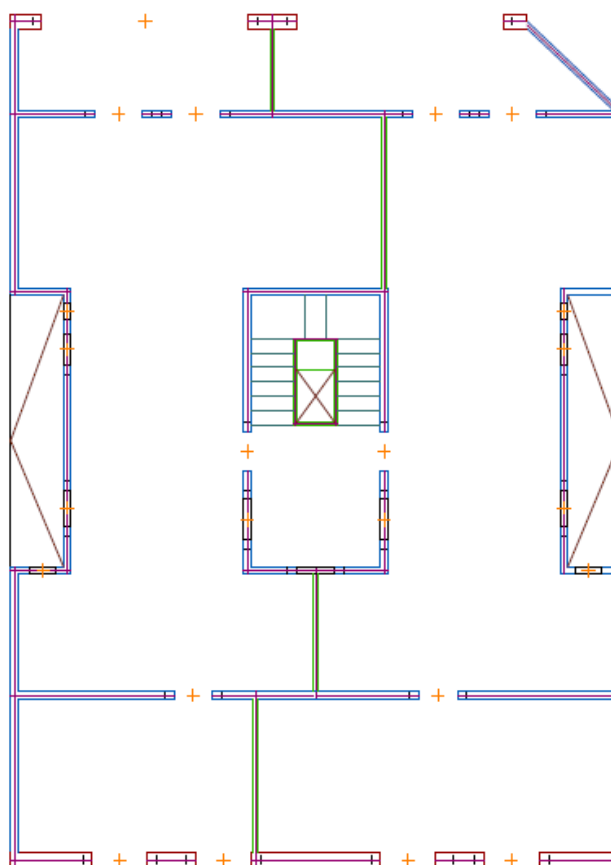


Figura 18: Plànol CAD de la planta tipus del ED01¹

En la planta tipus veiem la utilització de murs i envans en comptes de columnes metàl·liques, ja no com a mètode de separació d'ambients, sinó com a element estructural. També veiem que les obertures de la façana són més petites i l'aparició dels patis de llums laterals. Cada planta té unes dimensions lineals de gairebé 13x18 m, el que significa una superfície de 225 m² on cada planta tipus té dos habitatges de 90 m².

¹ Font pròpia

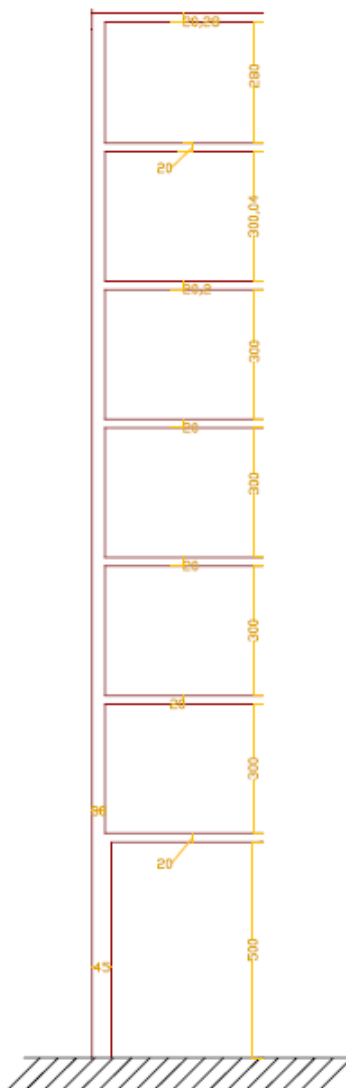


Figura 19: Plànol CAD de la secció del ED01¹

Amb 7 plantes i 24,20 d'altura, dimensions molt recurrents per la zona, podem veure en aquest plànol de secció el que s'ha esmentat anteriorment. Podem veure la diferència d'altures entre la planta baixa, de 5 m, amb les consegüents plantes d'habitatges, de 3 m. Com a detall mencionar que en la 7^a planta, l'alçada es redueix a 2,8 m (veure figura 19).

¹ Font pròpia

A continuació es presenten tots els gruixos de parets, murs i sòl que podem trobar en l'edifici:

| Parets, murs i sòl | Planta | |
|----------------------------|----------|----------|
| | Baixa | Tipus |
| Murs de separació o envans | - | < 10 cm |
| Parets de càrrega internes | - | 10-15 cm |
| Calaix de les escales | 30 cm | 15-30 cm |
| Façana | 45-60 cm | 30 cm |
| Parets laterals mitgeres | 30 cm | 15 cm |
| Sòl | - | 20 cm |

Taula 1: Diversos gruixos representatius e l'edifici ED01¹

3.2.2 ED02

A continuació els plànols CAD de la planta baixa, planta tipus i de la secció del edifici.

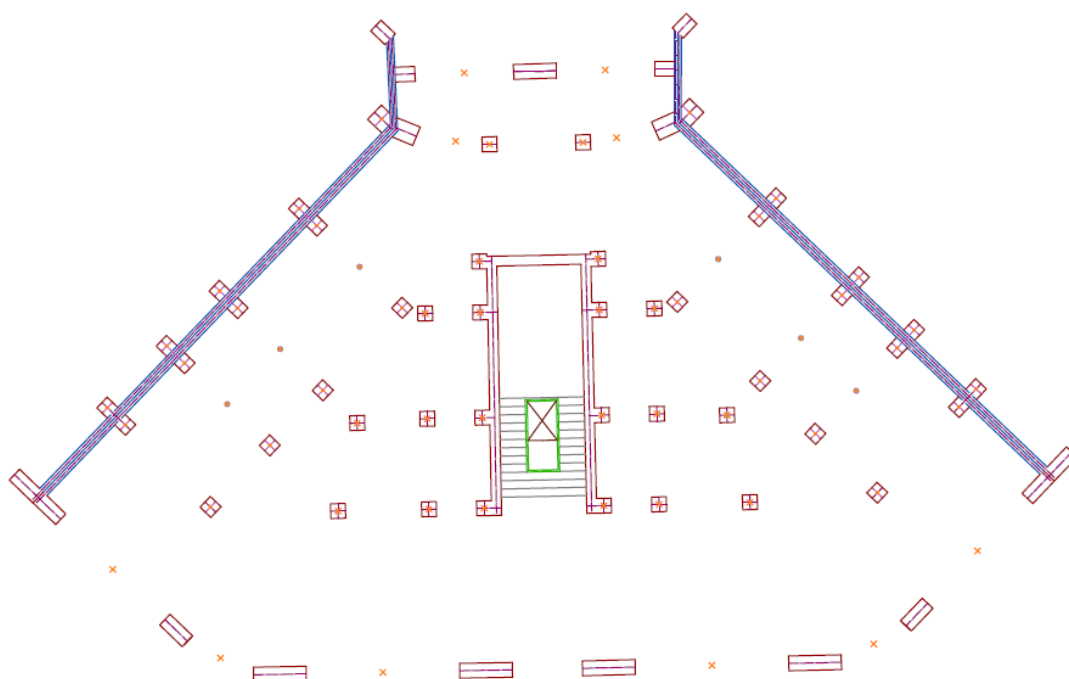


Figura 20: Plànol CAD planta baixa del ED02²

Com en l'edifici ED01, veiem les diferències entre la planta baixa (figura 20), dedicada a comerços, i la planta tipus (figura 21), dedicada a habitatges. Ja esmentat, a la planta tova es caracteritza per la utilització columnes metàl·liques distribuïdes per tota la superfície sense la presència de murs de càrrega interns, en aquest cas en trobem moltes més distribuïdes a causa de la major superfície de planta. El calaix d'escala segueix estant present com element estructural central al edifici.

¹ Realització pròpia

² Font pròpia

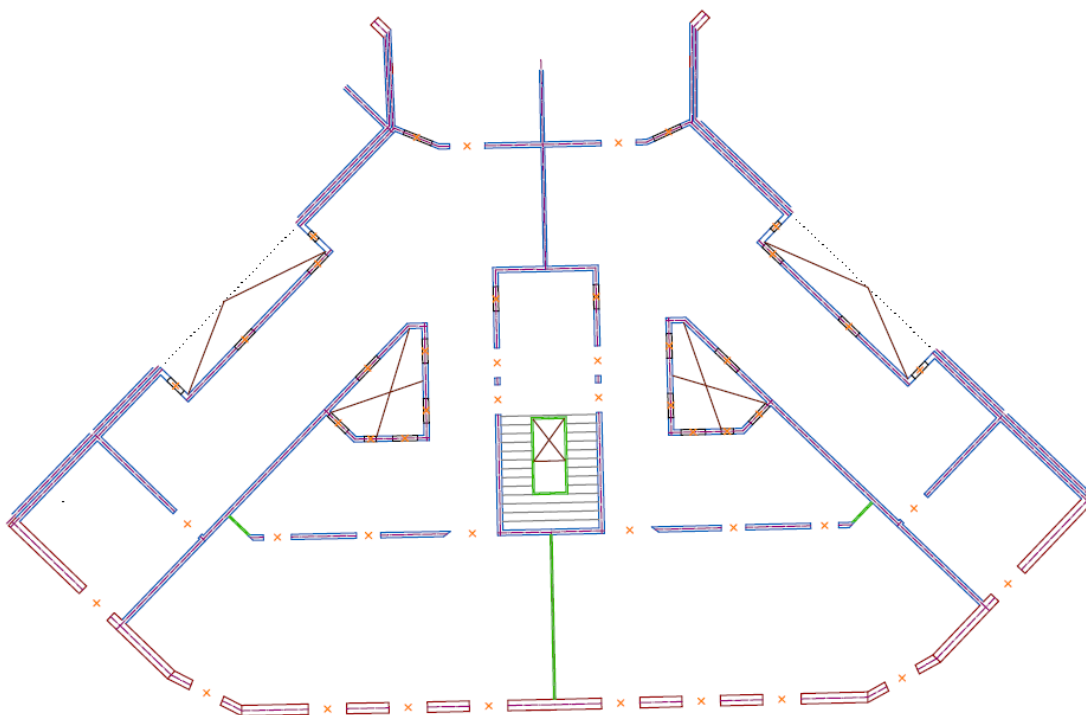


Figura 21: Plànol CAD planta tipus del ED02¹

En la planta tipus veiem la utilització de murs i envans en comptes de columnes metàl·liques com a element estructural. També veiem que les obertures de la façana són més petites, ja que la planta baixa s'hi poden trobar grans persianes per comerços. L'aparició de 4 patis de llums, 2 laterals i 2 centrals, més el buit per l'escala. Cada planta té unes dimensions de 22 m de façana frontal, 6,2 m de façana obliqua i 15,5 m de profunditat, el que es tradueix com una superfície d'uns 379 m² amb dos habitatges de 150 m².

¹ Font pròpia

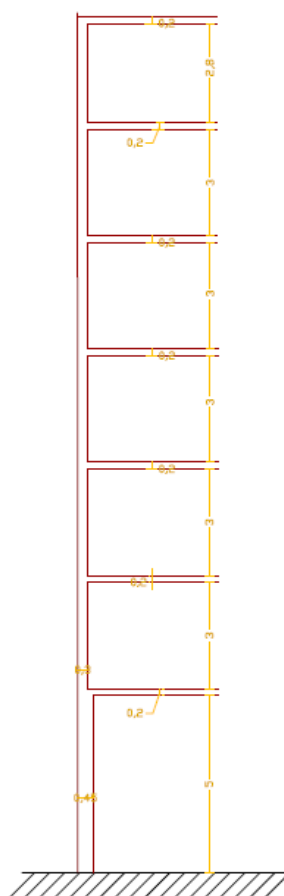


Figura 22: Secció CAD del edifici ED02¹

Exactament igual que el ED01, 7 plantes i 24,20 d'altura, podem veure en aquest plànol de secció el que s'ha esmentat anteriorment. Podem veure la diferència d'altures entre la planta baixa, de 5 m, amb les consegüents plantes d'habitatge, de 3 m.

A continuació es presenten tots els gruixos de parets, murs i sòl que podem trobar en l'edifici (Cal notar que són les mateixes dimensions que ED01):

| Parets, murs i sòl | Planta | |
|----------------------------|----------|----------|
| | Baixa | Tipus |
| Murs de separació o envans | - | < 10 cm |
| Parets de càrrega internes | - | 10-15 cm |
| Calaix de les escales | 30 cm | 15-30 cm |
| Façana | 45-60 cm | 30 cm |
| Parets laterals mitgeres | 30 cm | 15 cm |
| Sòl | - | 20 cm |

Taula 2: Diversos gruixos representatius e l'edifici ED01²

¹ Font pròpia

² Realització pròpia

3.2.3 Conjunt ED01 – ED02 – ED01

A continuació els plànols CAD del conjunt d'estudi ED01, ED02, ED01 per a la planta baixa i planta tipus (secció exactament igual que els detalls individualitzats):

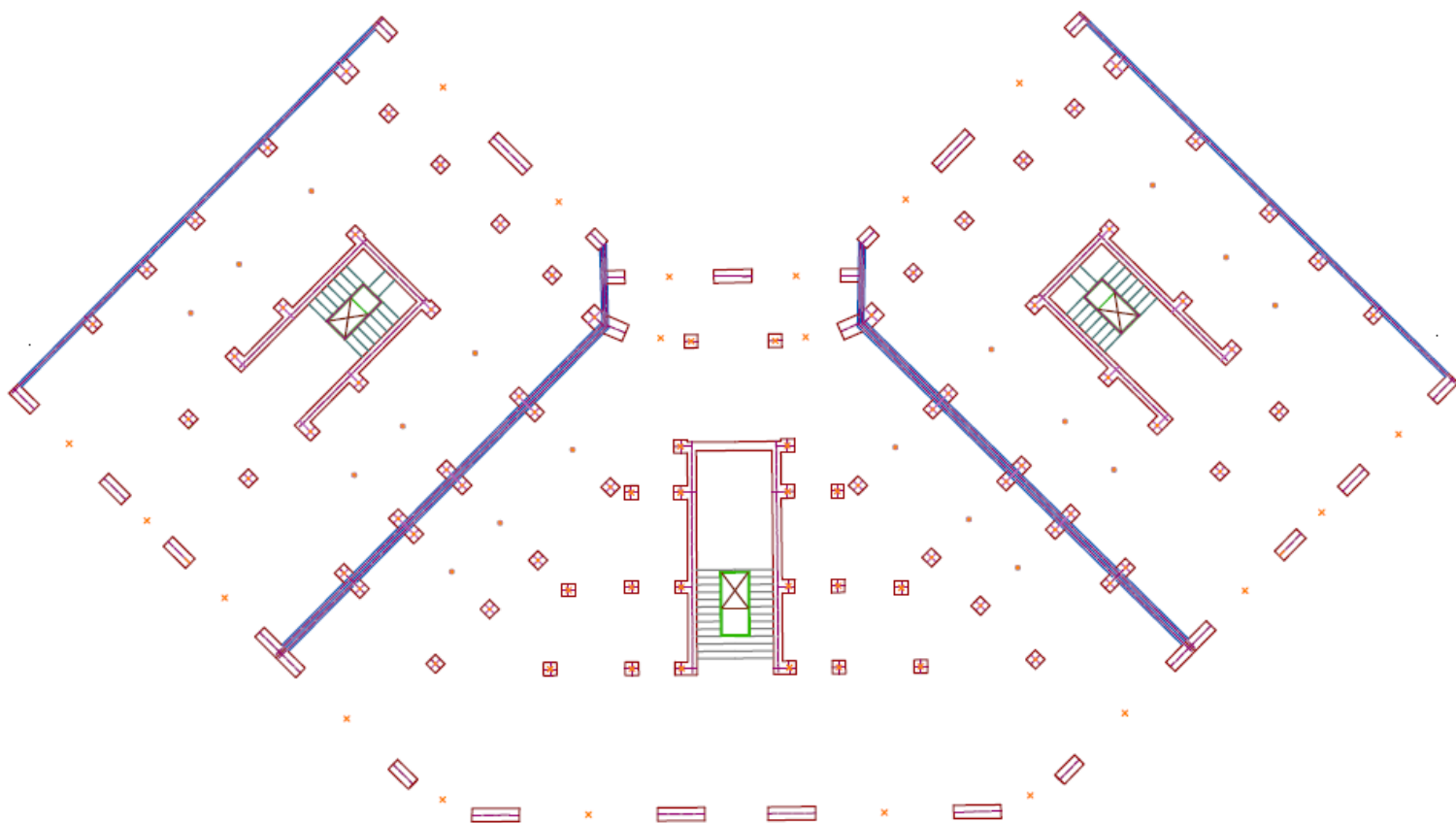


Figura 23: Plànol CAD planta baixa del conjunt dels edificis ED01, ED02, ED01 ¹

Com a detall, observar el sistema constructiu, on les parets mitjaneres és sumaven unes amb les altres, Afegint pilars verticals com a rigiditzador.

¹ Font pròpia

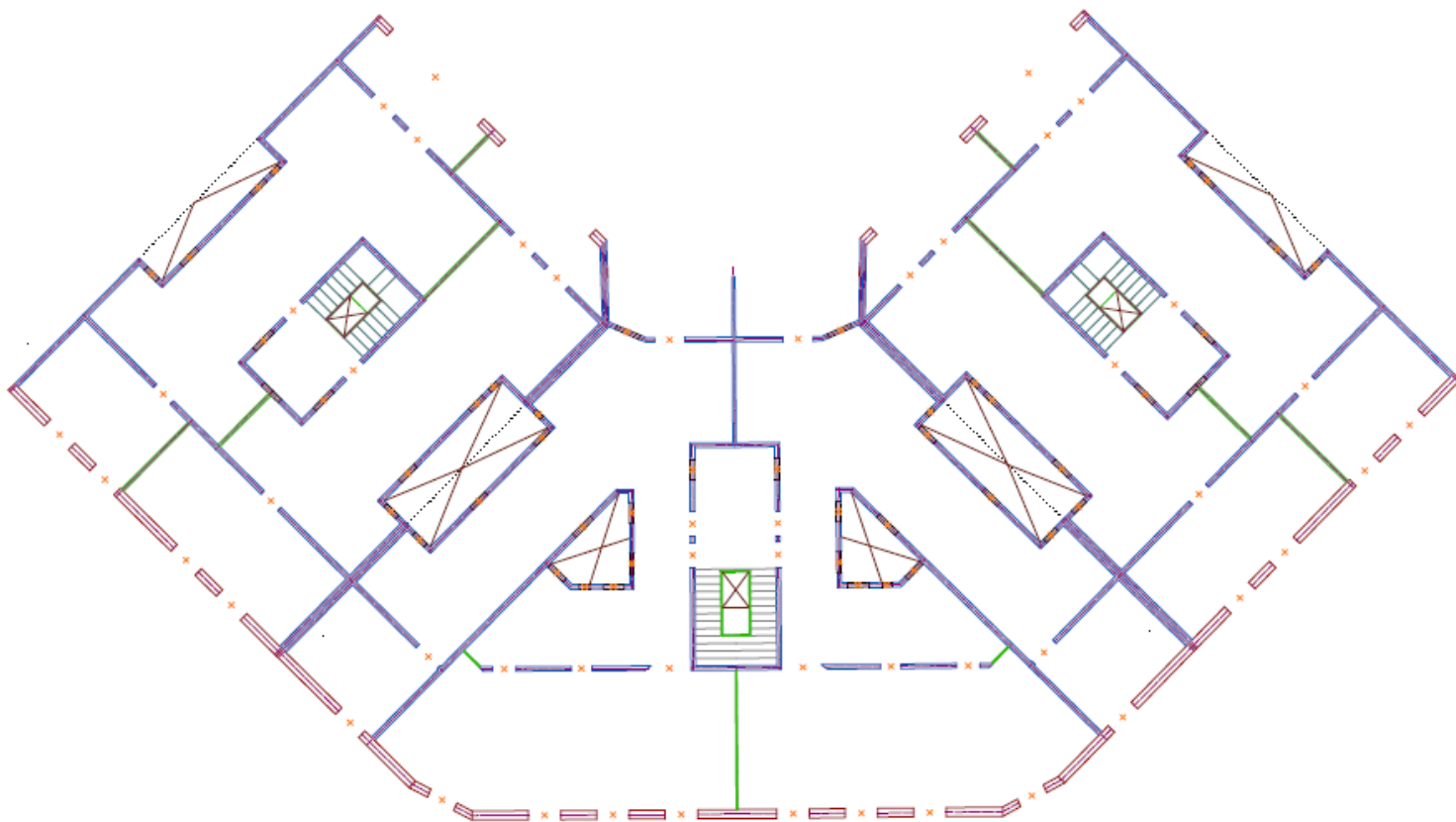


Figura 24: Plànol CAD planta tipus del conjunt dels edificis ED01, ED02, ED01¹

Esmentat amb anterioritat, el projecte d'aquests tres edificis els va dur a terme el mateix arquitecte, per això s'observa aquesta simetria i es comparteixen tants elements amb els mateixos gruixos. La superfície total per el conjunt és de 829 m² per planta i d'uns 5.803 m² per a les 7 plantes.

El sostre d'aquests edificis, com a element unificat en tot l'agregat, incorporava bigueta metàl·lica amb revoltó de dues rajoles. Aquest sostre consta de arc de maons ceràmics recolzats sobre els perfils metàl·lics que distaven 70 cm entre ells. D'amunt s'hi afegia morter i pedra per assolir un gruix adequat per poder-ho acabar amb gres per la part de sobre i formar el terra del pis superior (figura 25).

¹ Font pròpia



Figura 25: Sostre del agregat d'edificis amb bigueta metàl·lica i revoltó ceràmic¹

En quant a les obertures, aquests edificis d'època, influenciats per el modernisme, on la estètica de façana cobrava molta importància, podem trobar incorporats elements com grans finestrons, balcons, tribunes...etc. Tantes obertures en una paret mestra que a més patia la força dels balcons, justifica els gruixos vistos anteriorment.

En el nostre cas (figura 15), trobem grans obertures en la planta baixa de comerços, grans balcons en les quatre primeres plantes (28 en total), que a partir de la 5a es tornen balcons més petits amb forma de semicercle (18 en total), i finestres grans en l'àtic (108 finestres en total en la façana principal).

¹ Jorge Ávila

4. Estat de l'art

Per l'estudi i anàlisi del risc sísmic en aquest treball, s'utilitzarà l'espectre de la demanda i l'espectre de la capacitat. El primer fa referència als moviments sísmics i el segon a la resistència dels edificis. La base d'aquesta metodologia és l'encreuament d'aquests dos espectres per trobar el punt d'acompliment. Aquest mètode s'anomena Mètode no lineal N2 (Fajfar 1999), basat en el mètode ATC-40, i ens servirà per calcular la capacitat i la fragilitat dels edificis i del conjunt.

S'estudiarà els diferents espectres de demanda aplicables com són la norma espanyola, NSCE-02, la norma europea, l'Eurocodi EC-08, o estudis locals de micro-zonació. Tot i així, la normativa d'aplicació per aquest treball serà la NSCE-02, ja que és la que ens afecta en última instància.

En quant a l'espectre de capacitat, es representaran les corbes de capacitat o "Pushover" passades a la forma bilineal que ens descriuran la força tallant a la base de l'edifici enfront el desplaçament al sostre d'aquest en cada moment.

També es veurà el programa utilitzat (3Muri), quina informació extraurem d'ell, com la tractarem i interpretarem en les diferents gràfiques que es presentaran.

4.1 Descripció de la demanda

Terme referit a l'amenaça o perillositat amb la finalitat de fer referència a una probabilitat que en una determinada zona i període de temps, s'iguali o superi un moviment de terreny a causa de una acció sísmica. La demanda està directament relacionada amb l'activitat sísmica de la zona d'estudi on es localitza l'edifici.

Antigament, les escales d'intensitat eren les úniques que permetien un estudi de dany sísmic, on l'acció del terratrèmol es definia a través d'un sol paràmetre. Amb el temps, i les implementacions de noves tècniques i estacions de registre de sismes, es va implementar l'ús d'altres paràmetres com per exemple el "Peak Ground Acceleration" (PGA).

D'altra banda, els espectres de resposta s'utilitzen per modelar estructures o edificis, i això està tipificat en els codis de disseny sísmic-terrestre, que ens permeten l'avaluació de la resistència sísmica dels edificis d'estudi.

De vegades no és fàcil predir el dany esperat a causa de la manca d'informació sobre l'acceleració, per això, en zones de baixa activitat sísmica com és la ciutat de Barcelona, es poden utilitzar fórmules empíriques que ens permeten estimar les acceleracions pic en funció de la intensitat. Aleshores, actualment existeixen dues maneres d'avaluar el risc sísmic, amb models uni-paramètrics, o amb models multi-paramètrics. En aquest estudi utilitzarem el segon.¹

4.1.1 Intensitat-acceleració. Model uni-paramètric.

En aquest model, el sísmic es quantifica d'acord a un sol paràmetre com pot ser l'acceleració, o la velocitat màxima i el desplaçament permanent. Per aquest model s'utilitza l'escala Richter però són

¹ L.G. Pujades; A.H. Barbat, "Estimación de La Vulnerabilidad Sísmica de Las Tipologías Constructivas Más Representativas de Los Edificios de Importancia Especial En Cataluña," 2007.

mesures molt subjectives, ja que les escales estan fonamentades en l'observació directa i es quantifica la capacitat destructiva d'un sisme a través d'un patró. De vegades no és fàcil predir el dany esperat a causa de la manca d'informació sobre l'acceleració, per això en zones de baixa activitat sísmica com és la ciutat de Barcelona, es poden utilitzar fórmules empíriques que ens permeten estimar les acceleracions pic en funció de la intensitat.

En principi, els espectres de resposta específics per a un escenari es poden obtenir dels codis sísmics normalitzats considerant l'acceleració bàsica corresponent a l'escenari. D'altra banda, si l'escenari ve donat en intensitat, podem utilitzar la fórmula empírica que ens relaciona intensitat i acceleració tot i la seva alta incertesa. Segons la norma sísmica espanyola NCSE-94:

$$\log_{10} a = 0,30103I - 0,2321 \quad \text{Eq. 3.1.1.1}$$

4.1.2 Espectres de resposta. Model multi-paramètric.

Aquest serà el model d'estudi per avaluar els espectres de resposta. En aquest cas, s'utilitzen més d'un paràmetre per quantificar l'acció sísmica i es representa el terratrèmol mitjançant la forma espectral. En aquests espectres es caracteritza la interacció de l'edifici i el terratrèmol amb les velocitats, desplaçaments i acceleracions màximes que l'edifici experimenta. Els espectres de resposta aplicables són la norma en el marc local (Norma espanyola NCSE-02), la norma en el marc europeu (l'Eurocodi EC-08) i una petita variació d'aquesta última compresa en la tesi d'Irizarry. Tot i que la norma que aplicarem en aquest estudi és la NCSE-02, l'Eurocodi és també vàlid. Però aquestes dues normes són una generalització tant en l'àmbit peninsular com a escala europea respectivament. Per això Irizarry va fer un estudi centrat en la ciutat de Barcelona on es veien les divergències amb la norma. A més va incloure dos escenaris concrets, el determinista i el probabilista amb la col·laboració d'Institut Geològic de Catalunya per a la ciutat de Barcelona.

4.1.2.1 Espectres NCSE-02

Aquesta norma d'obligat compliment a nivell estatal, és la que ens regirà l'estudi ja que actualment està en vigor per qualsevol construcció d'obra nova o per qualsevol remodelació substancial.

Aquesta norma és una evolució de la NCSE-94, on s'hi van afegir nous tipus de sòl i es van corregir alguns coeficients de contribució.

Aquesta normativa fa també distinció entre els edificis segons la gravetat de les causes que pugui ocasionar la interrupció del seu servei:

- Moderada: baixa probabilitat de causar víctimes ni interrompre serveis primaris.
- Normal: pot causar víctimes, però no la interrupció de cap servei primari.
- Especial: causaria víctimes i la parada de serveis primaris (hospitals, estacions de bombers, distribució d'aigua o llum...etc.).

En el nostre cas establirem un grau normal en quant a gravetat de les conseqüències sísmiques.

¹ Ministerio de obras publicas transporte y medio ambiente, "NCSE-94," 1995

Espectres normalitzats

L'espectre elàstic normalitzat considerat a la Norma Sísmica Espanyola NCSE-02 (2002) es defineix per una funció a trams. Es considera per un amortiment crític $\nu=0,05$ (5%) segons:

$$S_a(T) = \begin{cases} 1 + 1,5 \frac{T}{T_A} & \text{si } T < T_A = K \frac{C}{10} \\ 2,5 & \text{si } T_A \leq T \leq T_B \\ K \frac{C}{T} & \text{si } T > T_B = K \frac{C}{2,5} \end{cases} \quad \text{Eq. 3.1.2.1.1}$$

- $S_a(T)$ [g] és el valor del espectre de resposta elàstica.
- T [s] és el període de la oscil·lació.
- K és el coeficient de distribució.
- C és el coeficient del terreny.
- T_A i T_B [s] són períodes característics del espectre.

El valor de K depenent del territori, tal i com s'observa a la figura 26, on es pot observar també l'acceleració bàsica de càlcul (PGA). Per a més precisió es pot consultar l'annex 1 de la NCSE-02 on està desglossat per poblacions de tot el territori espanyol.



Figura 26: Mapa de perillositat sísmica on s'aprecia el PGA i K^2

¹ El Ministro De Fomento, "NCSE-02," 2002, 4.

² El Ministro De Fomento, "NCSE-02," 2002, 5.

En el cas de Barcelona, el PGA correspon a 0,04g. Per manca de més informació prenem com a unitari el coeficient de distribució ($K = 1$). Però com se'n desprèn del mapa, en el sud de la península s'arriba a valors de fins a 1,3.

Per amortiments diferents del 5%, i períodes superiors a T_A , aleshores les ordenades dels espectres normalitzats es multipliquen per ξ , que el podem definir com:

$$\xi = \left(\frac{5}{\Omega}\right)^{0,4} \quad \text{Eq. 3.1.2.1.2}$$

- Ω és el percentatge del amortiment crític.

Per valors inferiors al període de T_A , interpolem linealment les ordenades espectrals entre els valors corresponents als períodes $T = 0$ i $T = T_A$.

El coeficient C té en compte les característiques geotècniques de la cimentació del terreny, la taula 3 mostra els diferents tipus de terreny amb el seu coeficient C que es considera a la norma dependent de les velocitats de propagació de les ones elàstiques o transversals (o de tallants V_s).

| TIPO DE TERRENO | COEFICIENTE C |
|-----------------|---------------|
| I | 1,0 |
| II | 1,3 |
| III | 1,6 |
| IV | 2,0 |

Taula 3: Tipus de terreny y la seva respectiva C segons NCSE-02¹

- *Terreny tipus I:* Roca compacta, terra cimentat o granular molt dens. Velocitat de propagació de les ones elàstiques transversals o de cisalla $V_s > 750m/s$
- *Terreny tipus II:* Roca molt fracturada, terres granulars densos o cohesius durs. Velocitat de propagació de les ones elàstiques transversals o de tallant, $750 \geq V_s > 400m/s$
- *Terreny tipus III:* Terres granulars de compacitat mitja, o de terres cohesius de consistència ferma o molt ferma. Velocitat de propagació de les ones elàstiques transversals o de tallant $400 \geq V_s > 200m/s$
- *Terreny tipus IV:* Terres granulars solts, o solts cohesius tous. Velocitat de propagació de les ones elàstiques transversals o de tallant $V_s \leq 200m/s$

En el nostre cas estem davant d'un terreny de tipus II.

Si volem precisar més en la obtenció del coeficient C, ja que al cap i a la fi, els que trobem tabulats a la norma per poblacions, son una generalització per a un mateix territori, podem utilitzar la formula empírica següent:

$$C = \frac{\sum C_i \cdot e_i}{30} \quad \text{Eq. 3.1.2.1.3}$$

¹ El Ministro De Fomento, "NCSE-02," 2002, 7.

- e_i és el gruix e_1, e_2, e_3, e_4 present en la zona d'estudi dels diferents terrenys tipus (I, II, III, IV).
- C_i és el valor del coeficient de distribució de la taula 3.
- C és el valor mitjà obtingut mitjançant una ponderació dels coeficients C_i de cada estrat amb el seu gruix e_i .

Espectres de disseny¹

A efectes de disseny, es defineix la següent equació de l'acceleració de càlcul a_c segons la norma NCSE-02:

$$a_c = S \cdot \rho \cdot a_b \quad \text{Eq. 3.1.2.1.4}$$

- a_b és l'acceleració bàsica definida en la figura 26 (mapa Espanya)
- ρ és el factor de risc o importància i està relacionada amb la importància de l'estructura i la vida útil de l'edifici (entre 1 i 1,3)
- S és el coeficient d'ampliació i depèn del tipus de terreny i el valor del producte $\rho \cdot a_b$ mitjançant l'equació:

$$S = \begin{cases} \frac{c}{1,25} & \rho \cdot a_b \leq 0,1g \\ \frac{c}{1,25} + 3,33 \left(\rho \frac{a_b}{g} - 0,1 \right) \left(1 - \frac{c}{1,25} \right) & 0,1g < \rho \cdot a_b < 0,4g \\ 1 & 0,4 \leq \rho \cdot a_b \end{cases} \quad \text{Eq. 3.1.2.1.5}$$

Aquesta acceleració de càlcul s'utilitza en les estimacions modals màximes. Aquests es defineixen com:

$$u_{ijm\grave{a}x} = \frac{a_{ijm\grave{a}x}}{\omega_i^2} \quad \text{Eq. 3.1.2.1.6}$$

- ω_i és la freqüència angular pròpia.
- $a_{ijm\grave{a}x}$ és l'espectre d'acceleració de disseny, i es defineix com:

$$a_{ijm\grave{a}x} = \alpha_i \cdot \eta_{ij} \cdot a_c \quad \text{Eq. 3.1.2.1.7}$$

- η_{ij} és el factor de distribució del mode de vibració i corresponent a la massa m , en el grau de llibertat j
- a_c és l'acceleració de càlcul, definida en Eq. 3.1.2.1.4
- α_i és el coeficient de valor, definit com:

¹ Barbat, "Estimación de La Vulnerabilidad Sísmica de Las Tipologías Constructivas Más Representativas de Los Edificios de Importancia Especial En Cataluña."

$$\alpha_i = \begin{cases} 1 + (2,5 \frac{\xi}{\mu} - 1) \frac{T_i}{T_A} & T_i \leq T_A \\ \alpha(T_i) \frac{\xi}{\mu} & T_i \geq T_A \end{cases} \quad \text{Eq. 3.1.2.1.8}$$

- $\alpha(T_i)$ és l'ordenada del espectre normalitzat per el període T_i , definit en Eq. 3.1.2.1.1
- ξ és el coeficient que depèn del amortiment, definit en Eq. 3.1.2.1.2
- μ és el coeficient de comportament per ductilitat en la direcció o en el element analitzat.

Si prenem $a_{ijm\grave{a}x}$ (definida en Eq. 3.1.2.1.6) i $\xi = \mu = \eta_{ij} = 1$ obtenim:

$$\text{Espectre de disseny} = E_D(T_i) = a_c \cdot \alpha(T_i) = S \cdot \rho \cdot a_b \cdot \alpha(T_i) \quad \text{Eq. 3.1.2.1.9}$$

A continuació, a la figura 27 podem veure exemples d'espectres de disseny i de les acceleracions bàsiques que contempla la NCSE-02 segons els tipus de terreny i diferents PGA.

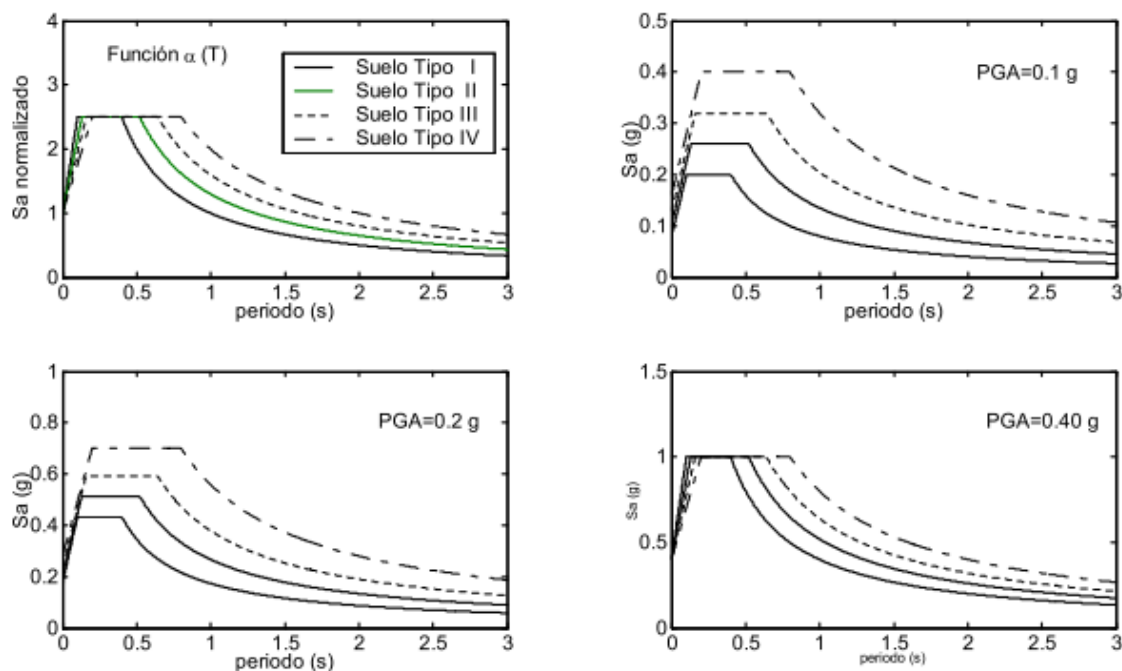


Figura 27: Espectres de resposta elàstica, per 5% d'amortiment, $K=1$, per als diferents tipus de terra en els diferents casos per PGA (Peak Ground Acceleration) = 0.1, 0.2, 0.3 segons la NCSE-02¹

¹ Barbat.

Espectre de resposta elàstica¹

L'espectre de resposta es defineix com l'espectre de resposta de l'estructura analitzada al terratrèmol que pateix. Per tant, suposa conèixer la resposta màxima en acceleració i desplaçament de l'edifici (Sa-Sd) en l'escenari sísmic analitzat. Per l'anàlisi sísmic ens basarem en la NCSE-02 i els espectres de disseny, però sense incorporar el factor d'importància, ja que no es pretén protegir l'edifici sinó estimar els danys davant d'un sisme. Així que definim l'espectre de resposta com:

$$\text{Espectre de disseny} = E_D(T_i) = a_c \cdot \alpha(T_i) = S \cdot \rho \cdot a_b \cdot \alpha(T_i) \quad \text{Eq. 3.1.2.1.10}$$

Definides totes les variables més a dalt, aquest espectre de resposta depèn de C , K , a_b

A mode de resum, els nostres edificis, al estar catalogats com d'importància normal, amb un tipus II de terreny ($C=1,3$), ens obligaria a tenir un PGA de 0.04g en cas de nova construcció o remodelació substancial.

¹ Maria Andrea Martinez Castillo, "Evaluación Del Uso de Espectros de Diseño Al Análisis Del Riesgo Sísmico. Aplicación a Barcelona.," 2009.

4.1.2.2 Espectres Eurocodi EC-8

Encara que no apliqui en aquest treball, l'Eurocodi EC-8 (2004) analitza l'acció sísmica i defineix els espectres pel disseny sísmic terrestre. Es diferencia de la norma Espanyola per la classificació dels terrenys, la definició dels espectres de disseny i la discriminació de sismes grans i petits segons tipus 1 i 2. Per aquells edificis les zones d'acció sísmica dels quals estiguin normalment regides per sismes de magnitud menor de 5,5 en escala Richter, s'utilitzarà l'espectre i per tant paràmetres corresponents al tipus 2. D'altra banda, si els sismes són majors a 5,5 en escala Richter prendrem l'espectre de resposta i valors del tipus 1.

Al igual que la norma espanyola, la europea intenta assegurar el mínim impacte sísmic en quant a víctimes, protegir les infraestructures i que els serveis primaris no col·lapsin per garantir una acció posterior. A continuació, els requisits mínims que ha de complir una estructura per ser sísmicament resistent depenent de la ubicació. L'espectre de resposta elàstic per un amortiment del 5%, es defineix com:

$$\begin{aligned}
 0 < T \leq T_B: \quad S_e(T) &= a_g \cdot S \cdot \left[1 + \frac{T}{T_B} \cdot (\eta \cdot 2,5 - 1) \right] \\
 T_B < T \leq T_C: \quad S_e(T) &= a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5 - 1 \quad \quad \quad 1 \quad \quad \quad \text{Eq. 3.1.2.2.1} \\
 T_C \leq T \leq T_D: \quad S_e(T) &= a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5 \left[\frac{T_C}{T} \right] \\
 T_D \leq T \leq 4s: \quad S_e(T) &= a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5 \left[\frac{T_C T_D}{T^2} \right]
 \end{aligned}$$

- $S_e(T)$ [g] és l'espectre de resposta elàstica
- T [s] és el període de vibració d'un sistema d'un grau de llibertat
- a_g [g] és l'acceleració de disseny en un terra de tipus A
- T_B [s] és el límit inferior del període de acceleració espectral constant
- T_C [s] és el límit superior del període de acceleració espectral constant
- T_D [s] és el valor que defineix el inici del rang del espectre amb desplaçament constant
- S és el factor de terra
- η és el factor de correcció d'amortiment que per aquest estudi serà $\eta = 1$. Es defineix com:

$$\eta = \sqrt{\frac{10}{(5+\xi)}} \geq 0,55 \quad \quad \quad \text{Eq. 3.1.2.2.2}$$

- ξ [%] és la raó de amortiment viscos que per al nostre cas correspondrà a un 5%

¹ European Committee, F O R Standardization, and Europaisches Komitee F O R Normung, "Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance- Part 1: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings," no. December (1998).

Tant en la norma espanyola NCSE-02 com en l'Eurocodi EC-08, l'elecció del tipus de terreny ha de basar-se en les velocitats de propagació d'ona de tallant en els primers 30 metres de terreny. La velocitat mitja en aquesta superfície es defineix com:

$$v_{S,30} = \frac{30}{\sum \frac{h_i}{v_i}} \quad \text{Eq. 3.1.2.2.3}$$

A continuació s'exposa una taula comparativa entre la NCSE-02 i el EC-08 on es veuen les semblances a l'hora de catalogar terrenys. En el nostre cas ens trobaríem en els espectres de resposta tipus 2 (No es diferencien tipus d'espectre en la següent taula), més petits de 5,5 en escala Richter, i un tipus de terreny B.

| Norma NCSE-02 | | | Vs (m/s) | Eurocodi EC-8 | | | | |
|--|-------------|------------------|----------|------------------|-------------|-----------------|---------|--|
| Descripció | Vs,30 (m/s) | Tipus de terreny | | Tipus de terreny | Vs,30 (m/s) | Nspt cops/30 cm | Cu(Kpa) | Descripció |
| Roca compacta, terreny cementat o granular molt dens | >750 | I | >800 | A | >800 | - | - | Roca o una altra formació geològica semblant a la roca, que inclou com a màxim 5 m de material més feble a la superfície. |
| | | | 800-750 | B | 360-800 | >50 | >250 | Dipòsits de sorra molt densa, grava, o argila rígida, com a mínim desenes de metres de gruix, caracteritzat per un creixement gradual de les propietats mecàniques segons amb la profunditat |
| Roca molt fracturada, terrenys granulars densos o cohesius durs | 750≥Vs>400 | II | 750-400 | | | | | |
| Terrenys granulars de compacitat mitja, o terrenys cohesius de consistència ferma o molt ferma | 400≥Vs>200 | III | 400-360 | C | 180-360 | 15-50 | 70-250 | Dipòsits profunds de sorra densa o mig densa, grava o argila rígida amb gruix des de desenes de metres fins a centenars |
| | | | 360-200 | | | | | |
| Terreny granular solt, o terreny cohesiu tou | ≤200 | IV | 200-180 | D | <180 | <15 | <70 | Dipòsits de sòl sense cohesió solt a mitjà (amb o sense capes suaus cohesives), o de sòl cohesiu suau a ferm |
| | | | <180 | | | | | |

Taula 4: Diferències entre els tipus de terrenys segons la norma espanyola NCSE-02 i l'Eurocodi EC-08 segons la velocitat mitja¹

Processant l'equació Eq. 3.1.2.2.1 amb els seus paràmetres establerts segons la norma EC-08, s'obtidrien els següents espectres de tipus 1. En el primer cas per un PGA normalitzat, i en els següents variant 0.1, 0.2, 0.4 i diferenciant tipus de terreny. En tots els casos per un factor d'amortiment unitari $\eta = 1$:

¹ Realització pròpia

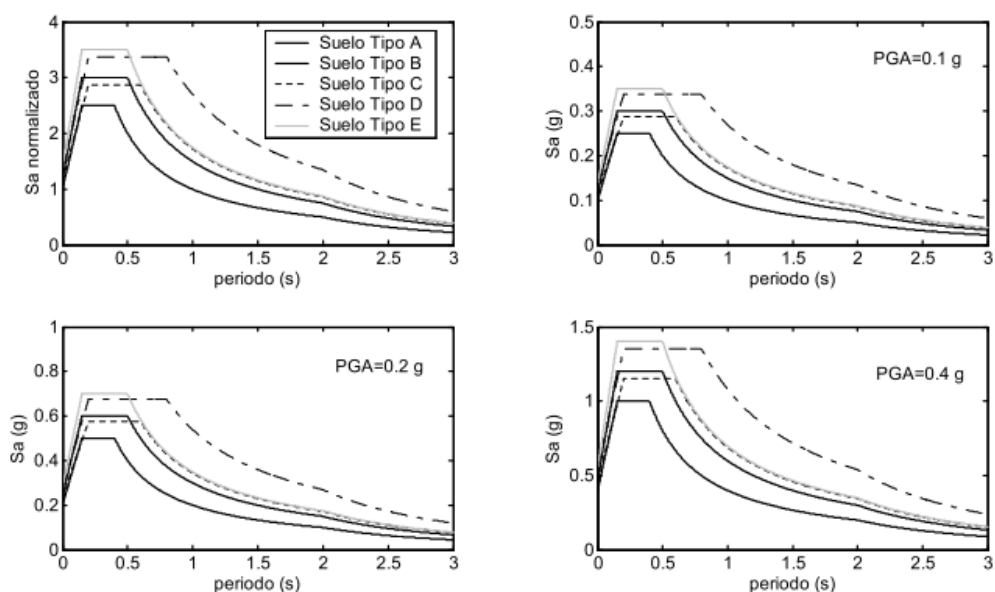


Figura 28: Espectres de resposta de tipus 1 compresos en l'Eurocodi EC-08, normalitzat i pels casos de PGA = 0.1, 0.2, 0.4g per a $\eta = 1^1$

Les següents gràfiques correspondrien als espectres de tipus 2. En el primer cas per un PGA normalitzat, i en els següents variant 0.1, 0.2, 0.4 i diferenciant tipus de terreny. En tots els casos per un factor d'amortiment unitari $\eta = 1$:

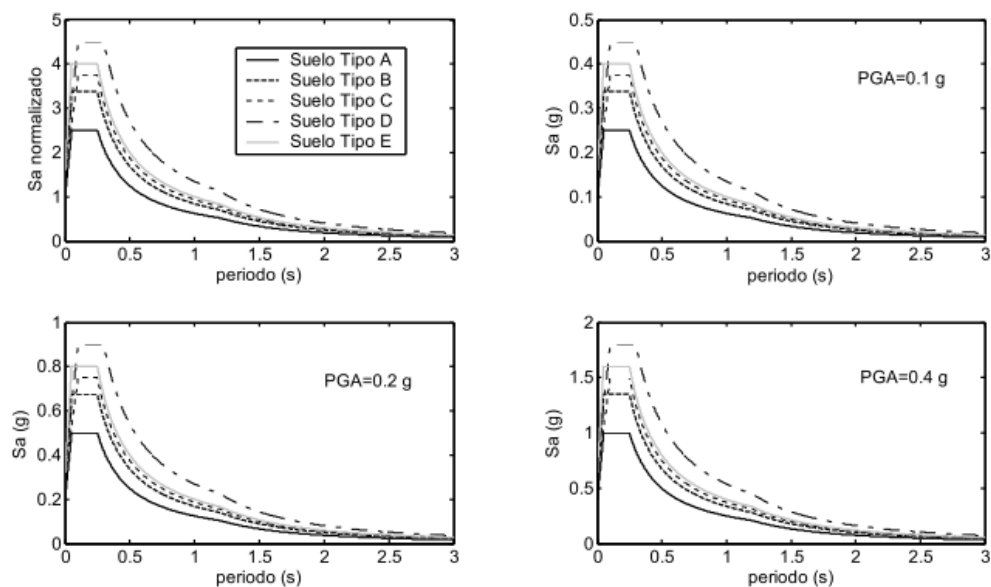


Figura 29: Espectres de resposta de tipus 2 compresos en l'Eurocodi EC-08, normalitzat i pels casos de PGA = 0.1, 0.2, 0.4g per a $\eta=1^2$

¹ Castillo, "Evaluación Del Uso de Espectros de Diseño Al Análisis Del Riesgo Sísmico. Aplicación a Barcelona."

² Castillo.

4.1.2.3 Espectres específics (Irizarry)¹

Els espectres específics o micro-zonació consisteix a definir una magnitud i distància de referència del terratrèmol i escollir accelerogrames registrats que compleixin amb les condicions de mida, profunditat i distància. Finalment l'espectre resultant serà una mitjana dels espectres escollits. Aquesta metodologia resulta eficaç per a zones amb poca i dèbil activitat sísmica, que es diferencia de la NCSE-02 i l'EC-08 les quals utilitzen un procediment generalitzat per un territori.

Irizarry (2004), conjuntament amb l'institut Geològic de Catalunya, coincidint amb el projecte RISK-UE (2003) va determinar aquests espectres de resposta per a un escenari determinista i un de probabilista, basant-se en els estudis del Cid (1998) per obtenir espectres per zones.

- *Determinista*: aquest escenari analitza el sisme més magnitud que s'espera que pugui ocórrer en la zona d'estudi.
- *Probabilista*: en aquest escenari s'afegeix terratrèmols els quals tenen una probabilitat d'ocurrència del 10% en un període de 50 anys, o dit d'una altra manera; aquell el índex de retorn del qual és al voltant dels 475 anys.

El model d'aquest estudi esta basat en el model del EC-08 amb petites variacions, per això es defineix amb l'equació següent:

$$\begin{aligned}
 0 < T \leq T_B: \quad S_e(T) &= a_0 \cdot \left[1 + \frac{T}{T_B} (S_B - 1) \right] \\
 T_B \leq T \leq T_C: \quad S_e(T) &= a_0 \cdot S_B \\
 T_C \leq T \leq T_D: \quad S_e(T) &= a_0 \cdot S_B \cdot \left[\frac{T_C}{T} \right] \\
 T_D \leq T \leq 4s: \quad S_e(T) &= a_0 \cdot S_B \cdot \left[\frac{T_C T_D}{T^2} \right]
 \end{aligned}
 \tag{Eq. 3.1.2.3.1}$$

- $S_a(T)$ [g] és l'espectre de resposta elàstica
- T [s] és el període de vibració d'un sistema d'un grau de llibertat
- a_g [g] és l'acceleració de disseny
- T_B [s] és el període característic del espectre de resposta elàstica
- T_C [s] és el període característic del espectre de resposta elàstica
- T_D [s] és el període característic del espectre de resposta elàstica
- S_b [g] és el factor de terreny

¹ Janira Irizarry Padilla, "An Advanced Approach to Seismic Risk Assessment," *Application to the Cultural Heritage and the Urban System Barcelona. Dpto. Ingeniería Del Terreno, Cartográfica y Geofísica. Barcelona, Spain: Universidad Politécnica de Cataluña*, no. July (2004).

D'igual manera que les normatives anteriors, Irizarry també diferencia segons el territori, en aquest cas segons la zona de Barcelona tal i com es veu a la següent figura:

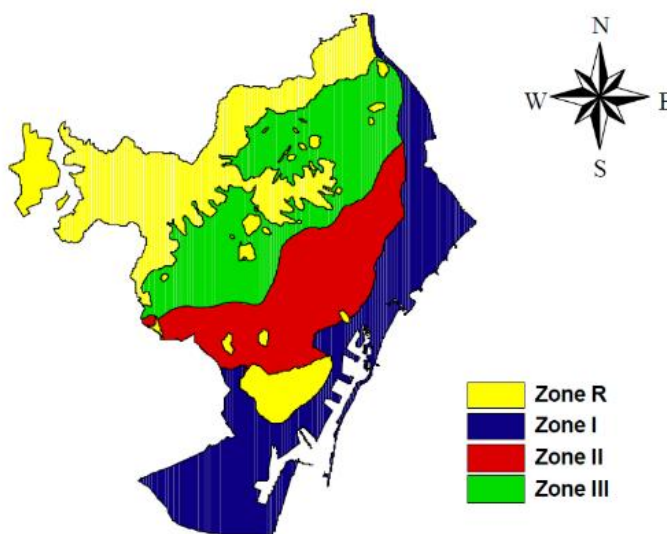


Figura 30: Diferents zones locals de Barcelona segons Irizarry¹

A la següent taula trobem els paràmetres d'ajust de l'equació Eq. 3.1.2.3.1:

| Tipus de terreny | Escenari determinista | | | | | Escenari Probabilista | | | | |
|------------------|----------------------------|-------|-----------|-----------|-----------|----------------------------|-------|-----------|-----------|-----------|
| | a_0 (cm/s ²) | S_B | T_B (s) | T_c (s) | T_D (s) | a_0 (cm/s ²) | S_B | T_B (s) | T_c (s) | T_D (s) |
| R | 71,10 | 2,26 | 0,10 | 0,23 | 1,50 | 98,10 | 2,29 | 0,10 | 0,25 | 1,76 |
| I | 133,30 | 1,91 | 0,10 | 0,39 | 0,72 | 183,90 | 2,00 | 0,10 | 0,40 | 0,90 |
| II | 138,00 | 2,45 | 0,10 | 0,22 | 0,85 | 190,10 | 2,50 | 0,10 | 0,23 | 1,36 |
| III | 120,00 | 2,29 | 0,10 | 0,22 | 0,85 | 165,50 | 2,57 | 0,10 | 0,19 | 1,56 |

Taula 5: Paràmetres dels espectres de resposta corresponents als escenaris determinista i probabilista per a la ciutat de Barcelona²

¹ Janira Irizarry Padilla.

² Realització pròpia

4.1.2.4 Format ADSR¹

El format ADSR (Acceleration Displacement Response Spectra) és la representació dels espectres de resposta on trobem l'acceleració espectral a l'eix d'ordenades (S_a) i el desplaçament espectral a l'eix de les abscisses (S_d). Aquesta representació és una eina a l'hora trobar una estimació del punt d'acompliment d'un edifici com veurem més endavant.

També tenim els pseudo-espectres que són aproximacions als espectres de resposta de petits amortiments. Donat que els edificis tenen entre un 5 i un 20% d'amortiment crític, no s'acostuma a diferenciar entre espectres i pseudo-espectres, per això prenem la següent expressió que només es vàlida per pseudo-espectres:

$$S_d(\omega) = \frac{1}{\omega} \cdot S_v(\omega) = \frac{1}{\omega^2} \cdot S_a(\omega) \quad \text{Eq. 3.1.3.1}$$

- S_d és el pseudo-espectre de desplaçament
- S_v és el pseudo-espectre de velocitat
- S_a els pseudo-espectres de acceleració
- ω és la freqüència angular

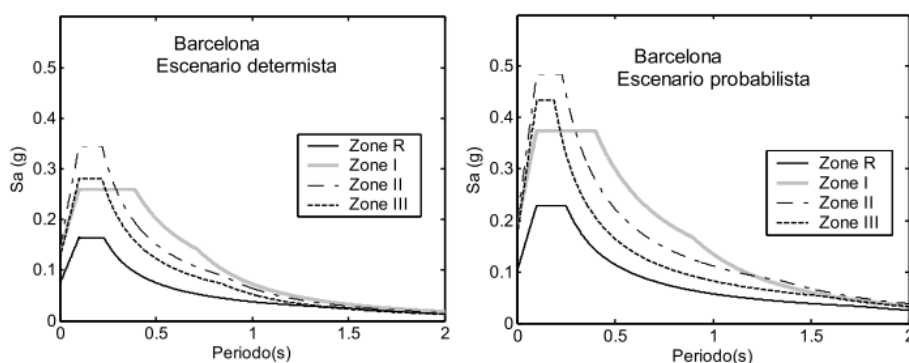


Figura 31: Espectres de resposta del Institut Geològic de Catalunya. Cas determinista i probabilista²

Per poder enfrontar l'espectre de capacitat i demanda i trobar el punt de fallida, ambdós han d'estar en el mateix format, per això és indispensable transformar l'espectre de capacitat $T - S_a$ a $S_d - S_a$. En quedarà representat a l'eix de les ordenades l'acceleració espectral S_a i en l'eix de les abscisses la resposta espectral en termes de desplaçament S_d .

Per passar de les tres components espectrals a la forma ADSR (Espectre de resposta del desplaçament vs. Espectre de resposta de l'acceleració, $S_a - S_d$) s'utilitza la següent transformació:

¹ Barbat, "Estimación de La Vulnerabilidad Sísmica de Las Tipologías Constructivas Más Representativas de Los Edificios de Importancia Especial En Catalunya."

² Janira Irizarry Padilla, "Seismic Hazard Assessment for Barcelona," 2004

$$S_d(T) = 980,0 \frac{T^2}{4\pi^2} \cdot S_a(T) \quad \text{Eq. 3.1.3.1}$$

- S_d [cm] és la resposta espectral de desplaçament
- T [s] Període
- $S_a(T)$ [cm/s²] és el valor de l'acceleració espectral
- $g = 980,0$ cm/s² és l'acceleració de la gravetat

A la figura 32 es mostra un exemple de la representació S_a - S_d , comparant amb la figura 33 que es mostra la representació clàssica S_a - T

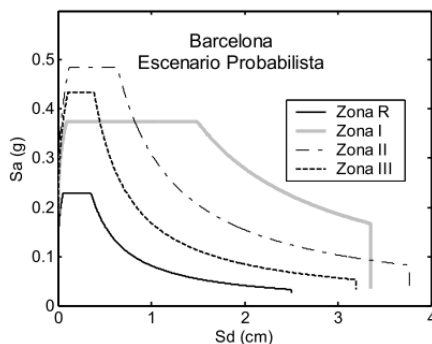


Figura 32: Espectre de resposta elàstica en format ADJR S_a - S_d corresponent a un escenari probabilista (475 anys) per a la ciutat de Barcelona¹

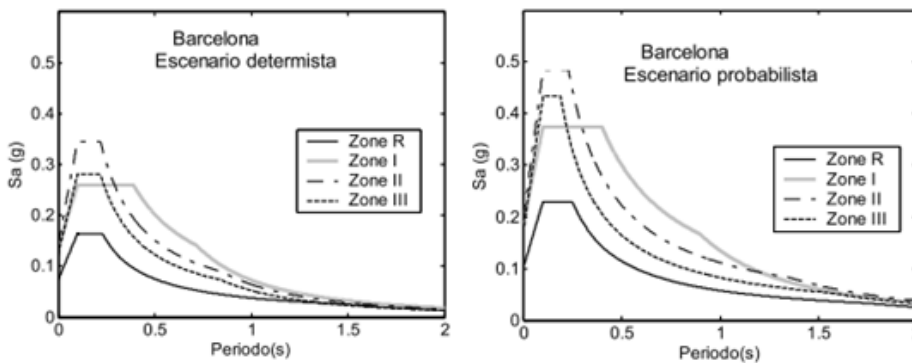


Figura 33: Espectres de resposta per dos escenaris específics desenvolupats per l'institut Geològic de Catalunya per a la ciutat de Barcelona en format S_a - T ²

¹ Janira Irizarry Padilla, "Seismic Hazard Assessment for Barcelona," 2004

² Janira Irizarry Padilla, "Chapter 4 : Probabilistic Seismic Hazard in the Catalonia Region Using Spectral Values," 2004.

4.1.2.5 Espectres de resposta a Espanya

En l'estudi de Barbat i Pujades (2007), es van analitzar 70 sismes ocorreguts a Espanya (veure figures 34 i 35), i la seva corresponent transformada de Fourier. La figura 34 mostra els espectres de resposta obtinguts després de ser normalitzats pel PGA obtingut. Es representa la superposició de l'espectre definit pel terreny de tipus roca, en la norma espanyola i els espectres tipus 1 i 2, també tipus A, comprès en l'Eurocodi.

Podem veure la similitud en el replà en els tres espectres normalitzats, però els més ben definit és el que proporciona l'Eurocodi per a sismes de petita magnitud, mentre que per terratrèmols grans és indiferent utilitzar els espectres de la NCSE-02 que els de l'EC-8 tipus 1, ja que tenen la mateixa definició.

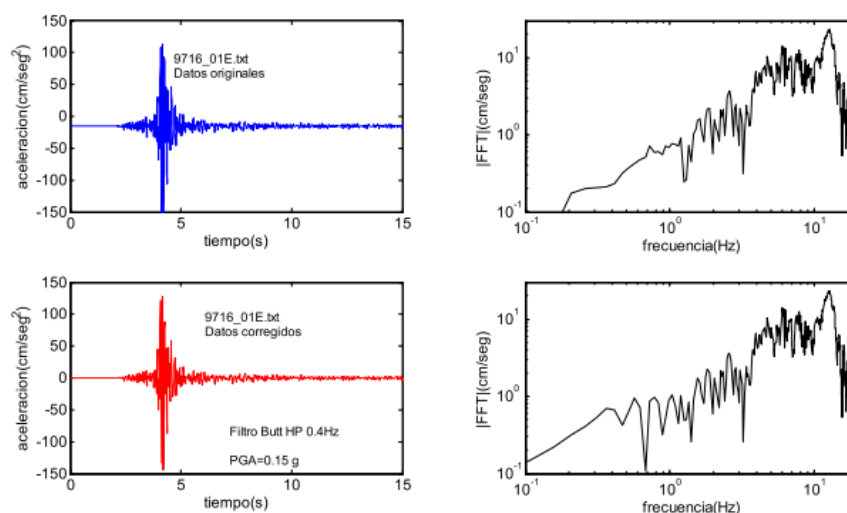


Figura 34: Exemple d'accelerograma extret de la base de dades del Institut Geogràfic Nacional. Representades les dades corregides i sense corregir i també els espectres de amplituds de Fourier.¹

¹ Barbat, "Estimación de La Vulnerabilidad Sísmica de Las Tipologías Constructivas Más Representativas de Los Edificios de Importancia Especial En Cataluña."

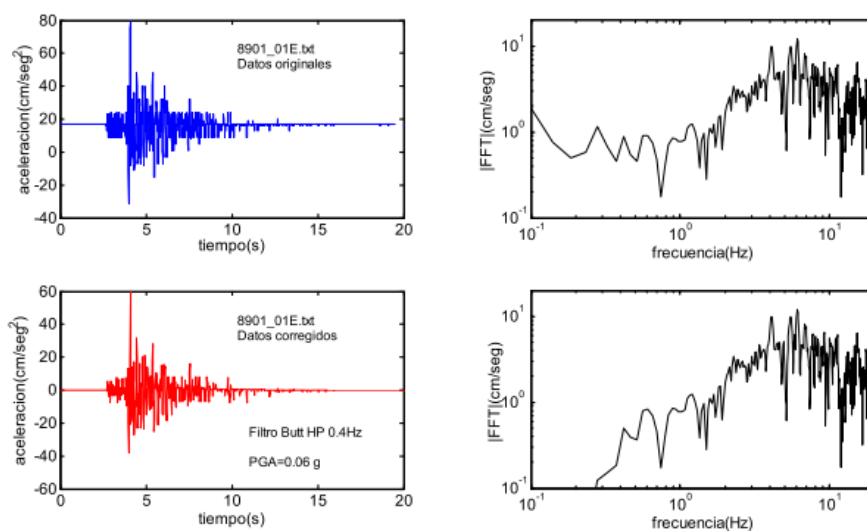


Figura 35: Exemple d'accelerograma extret de la base de dades del Institut Geogràfic Nacional. Representades les dades corregides i sense corregir i també els espectres de amplituds de Fourier.¹

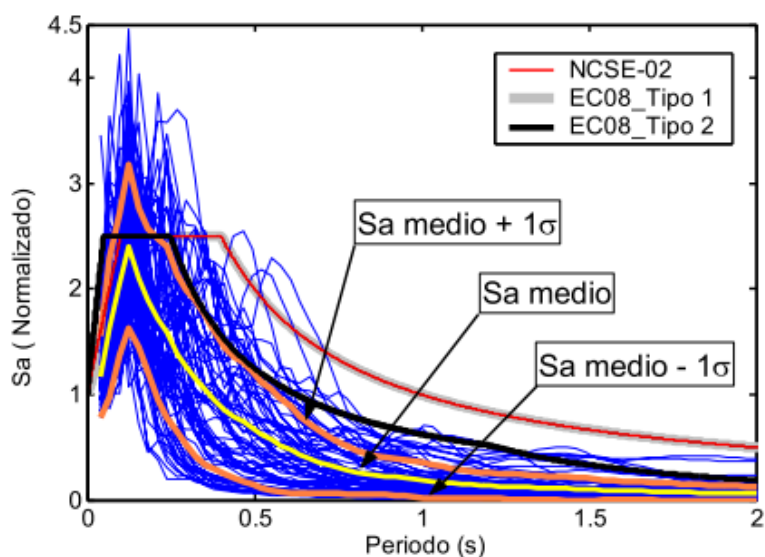


Figura 36: Espectres de resposta normalitzats corresponents a 70 accelerogrames ocorreguts a Espanya. Representats els espectres definits per a terra tipus roca de la norma NCSE-02 i els espectres tipus 1 i 2 del EC-8.²

¹ Barbat.

² Barbat.

4.2 Descripció de la capacitat

4.2.1 Corba *pushover*

Si bé hem avaluat el sisme en l'apartat anterior, l'altre element que intervé en l'anàlisi de risc sísmic és l'edifici o estructura. En aquest mètode, l'edifici es caracteritza amb l'espectre de capacitat. La capacitat d'una estructura depèn de la força i de la capacitat de deformació dels seus elements. Per determinar la capacitat de l'edifici més enllà del límit elàstic, s'utilitzen algunes eines d'anàlisi no lineal com és el procediment "pushover".

Aquest procediment utilitza una sèrie d'anàlisis seqüencials, imposant una força-desplaçament a l'estructura. Aquesta corba "pushover" és una aproximació del comportament d'una estructura després de superar el límit elàstic, i es grafica convenientment com tallant en la base (base o fonaments de l'edifici en el nostre cas) i desplaçament en el sostre (en el punt més alt de l'edifici), com es veu a la figura conceptual 37.

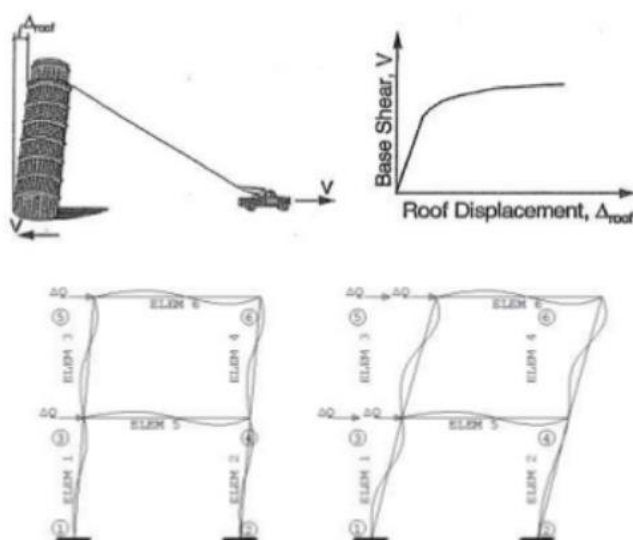


Figura 37: Figura conceptual d'una corba Pushover on està representada la força aplicada per proporcionar un desplaçament en el sostre i un tallant en la base¹

Aquests processos d'anàlisi seqüencials elàstics es basa en un model matemàtic de l'estructura que es va modificant a treves del temps per tenir en compte reduccions de resistència en components que han fluït a mesura que s'ha anat aplicant una força distribuïda. Aquesta distribució de càrrega lateral o frontal és aplicada fins que els components addicionals flueixen del tot.²

¹ <https://es.slideshare.net/brujitacalderon1/curva-de-capacidad-pushover-42647188>, (02/11/2018).

² Manuel Sifón Miralles, "Aplicación Del CSM Al Diseño Sísmico Prestacional de Estructuras Aportcadas de Hormigón Armado. Comparación de Los Métodos FEMA EL y N2.," 2016.

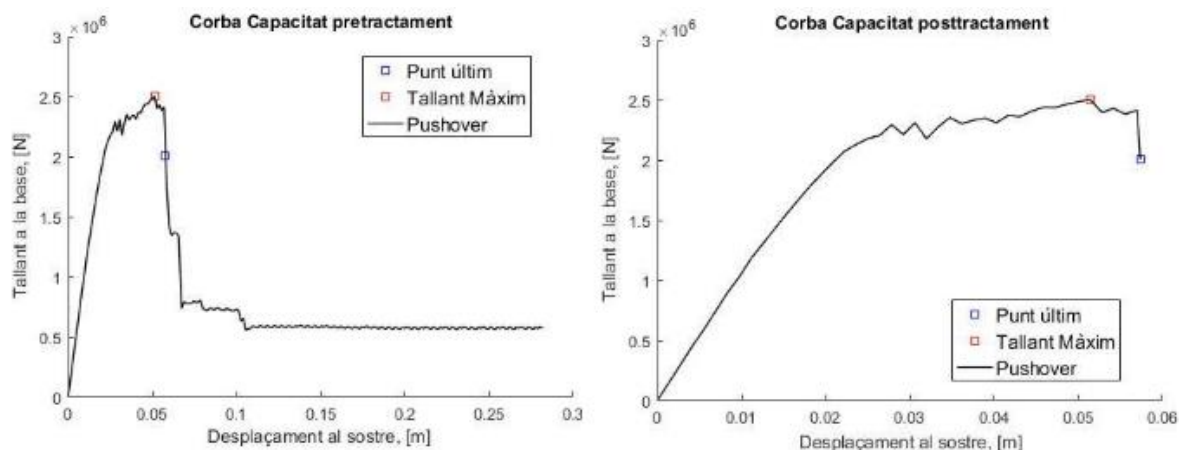


Figura 38: Corbes Pushover amb i sense pretractament¹

Com es veu a la figura anterior, el programa segueix entregant dades una vegada l'estructura ha col·lapsat. Això ens podria introduir errors en el nostre estudi, per això, de forma convinguda, s'utilitza el punt final o últim com el que correspon al 80% de la força tallant màxima. En aquest procediment se l'anomena tractament de la corba de capacitat.

Observem també dos trams diferenciats en la corba, el tram elàstic i el tram plàstic. El primer correspon al comportament lineal, on desplaçament i tallant incrementen de forma proporcional. En el tram plàstic veiem que augmenta el desplaçament per un increment de tallant molt feble. Entremig del punt elàstic final i el punt últim, veiem que es genera una forma de serra, això és degut a que els elements estructurals van fallint, i d'altres que van cobrant participació estructural, fins al punt últim on es produeix la saturació.

Donada la dificultat matemàtica del càlcul d'aquest procediment, en aquest treball s'utilitzaran eines de càlcul per obtenir les corbes "pushover", el 3Muri i el Matlab. El primer programa ens farà un model de l'edifici, que estarà alimentat pels plànols en format CAD. El segon programa, un cop obtingudes dades de desplaçaments i tallants, ens representarà totes les corbes pertinents.

4.2.2 3Muri

3Muri és un software desenvolupat per S.T.A DATA amb la col·laboració de l'equip de recerca del professor Sergio Lagomarsino (Professor di Tecnica delle Costruzioni della Università degli Studi di Genova) qui va desenvolupar el motor de càlcul.

Es tracta d'un software d'anàlisi tridimensional no lineal per a estructures de maçoneria, on el càlcul es realitza mitjançant un model de macro-elements. S'avalua el model de forma incremental controlant la força i el desplaçament, s'avalua de forma estàtica, modal i de forma dinàmica amb excitació de l'estructura en la seva base. L'avaluació de danys del macro-element té en compte tots els efectes de resistència a compressió limitada i també la capacitat de bolc de la construcció, ja que la maçoneria té aquest inconvenient. També s'inclou un model on es va deteriorant la rigidesa a compressió a causa de l'excitació basal.

¹ Font pròpia

4.2.2.1 Modelització dels edificis

En la modelització d'aquest treball només s'han modelat 2 dels edificis degut a la simetria del conjunt, l'edifici ED01 i ED02 (El tercer és igual al ED01). Per fer aquest procés haurem d'introduir a 3Muri les diferents propietats mecàniques de la maçoneria, que són idèntiques pels tres edificis.

| | Resistència a compressió f_m | Mòdul elàstic E | Resistència a tallant τ | Mòdul a tallant G |
|-----------|--------------------------------|------------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| Valor Mig | 300,00 N/cm ² | 150.000,00 N/cm ² | 9,00 N/cm ² | 50.000,00 N/cm ² |

Taula 6: Propietats mecàniques de la maçoneria dels 3 edificis¹

Aquests seran els valors de les propietats mecàniques que s'introduiran a 3Muri per a totes les plantes dels edificis conformades de fàbrica.

4.2.2.1.1 ED01

Per el modelat d'aquest edifici s'han tingut en compte tots els element arquitectònics que el componen i els materials d'aquests.

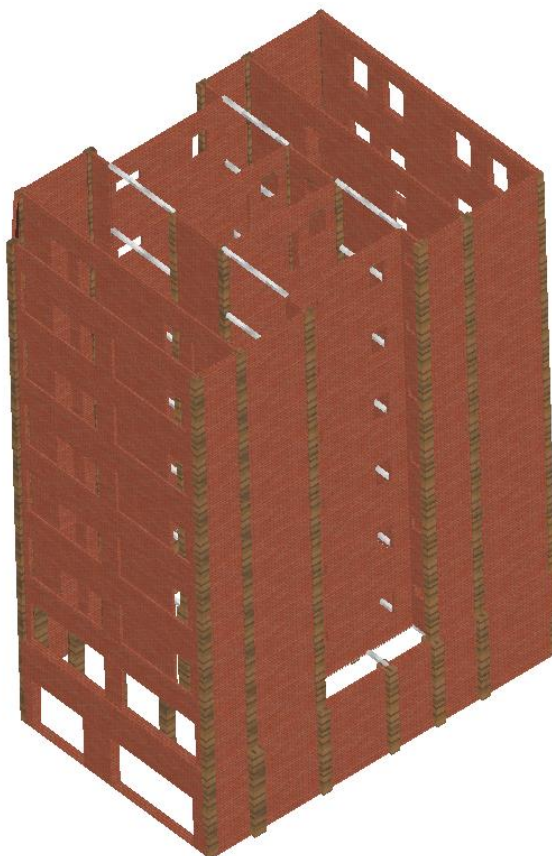


Figura 39: Modelització 3Muri del ED01 de maçoneria²

¹ J. A. Avila-Haro et al., "Probabilistic Seismic Damage Assessment of URM Buildings Based on Incremental Dynamic Analysis," *16th World Conference on Earthquake Engineering*, 2017.

² Font pròpia

Com s'observa en la figura anterior, aquest edifici està compost d'una planta baixa i sis plantes tipus (totes de maçoneria). Aquesta primera planta destinada al comerç, es diferencia per ser la planta més alta i diàfana (caracteritzada en apartats anteriors), les altres restants, destinades a habitatges, a part de ser més baixes i d'altres diferències constructives, té la peculiaritat de incloure pati de llums a banda i banda.

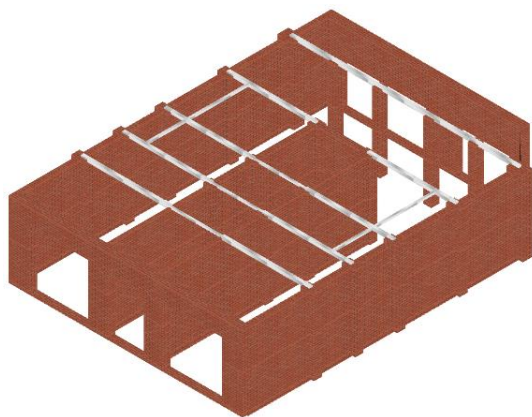


Figura 40: Modelització Planta Baixa ED01¹

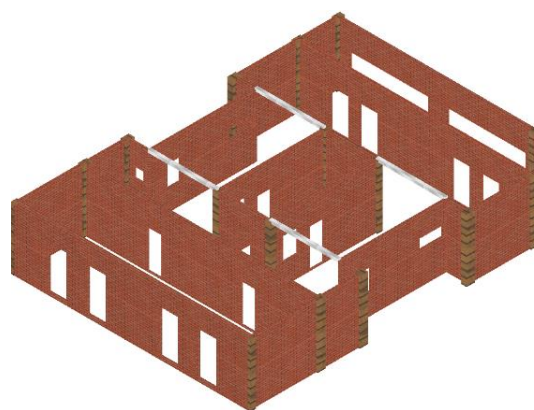


Figura 41: Modelització Planta tipus ED01²

En les dues figures anteriors, s'observa les diferències constructives entre les dos tipologies de plantes. En la primera destaca la utilització de bigues metàl·liques envers a la segona que destaca la utilització de parets.

4.2.2.1.2 ED02

Per a la modelització del ED02 també s'han tingut en compte tots els elements estructurals, obertures i característiques dels materials.

¹ Font pròpia

² Font pròpia

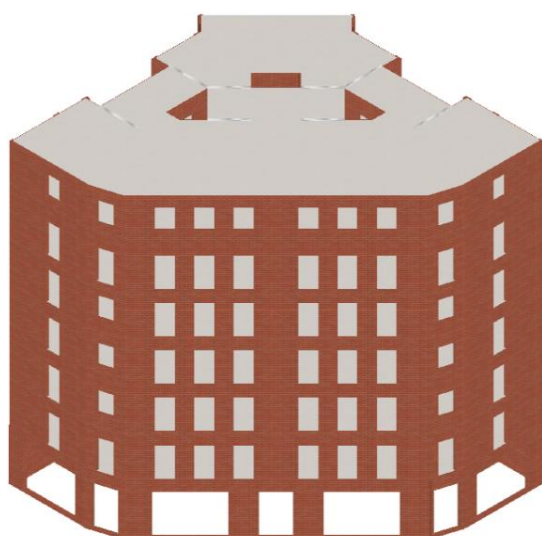


Figura 42: Modelització 3Muri del ED02 frontal¹

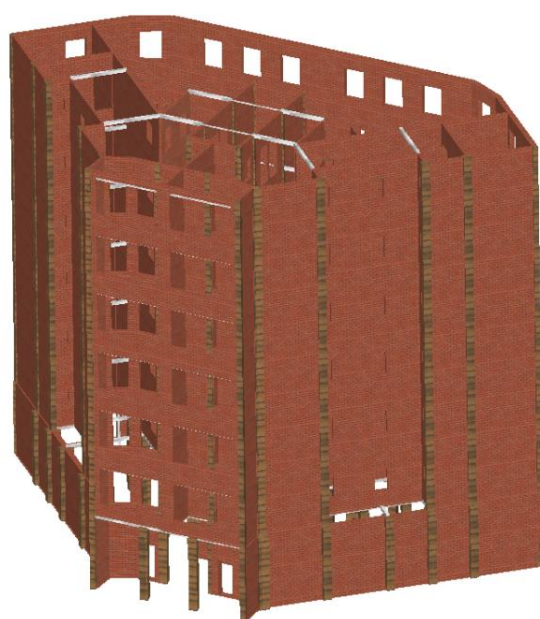


Figura 43: Modelització 3Muri del ED02 posterior²

Com en la modelització del ED01, en les figures anteriors es diferencien clarament les dues tipologies de planta, amb unes marcades obertures en la planta baixa de la part frontal de la façana i el característic pati de llums a partir de la primera planta.



Figura 44: Modelització Planta baixa ED02³



Figura 45: Modelització planta tipus ED02⁴

Comentat anteriorment en la caracterització dels edificis, però a les figures 44 i 45 s'aprecia les diferències entre els elements estructurals de les dues plantes. En la primera destaca la utilització de pilars i bigues metàl·liques enfront la utilització de murs i parets en la segona.

¹ Font pròpia

² Font pròpia

³ Font pròpia

⁴ Font pròpia

4.3 Descripció del mètode estàtic no lineal (N2)

El mètode N2, desenvolupat per Peter Fajfar de la Universitat de Ljubljana l'any 1996, és el mètode de càlcul escollit per estudiar l'acció sísmica de la nostra estructura. Aquest mètode té les següents bases característiques:

- Utilitza dos models matemàtics de forma separada
- Utilització dels espectres de resposta i del anàlisi estàtic no lineal
- Utilització d'un model de danys

Fajfar va desenvolupar aquest mètode per avaluar les noves construccions tenint en compte l'acció sísmica, però també per classificar les construccions ja existents. La falta d'un sistema d'anàlisi fins al moment on es compregués la capacitat, la resistència, la rigidesa de l'estructura i la dissipació de l'energia, van propiciar la metodologia desenvolupada per Peter, a més facilitava molt l'obtenció de resultats.

Fins llavors els mètodes existents estaven basats en el comportament elàstic de les estructures en comptes d'un comportament no lineal. Com a mètodes no lineals dinàmics hi havia els MDOF (Multiple Degree of Freedom) però pecaven d'una alta complexitat per un ús recurrent.

És per això que el mètode N2 ha estat l'escollit per l'estudi, ja que ens aporta una gran confiança amb una relativa senzillesa. Ara bé, té alguna limitació, com per exemple que els càlculs s'han de realitzar per edificis que vibren en algun dels modes de vibració fonamental (veure figura 46).

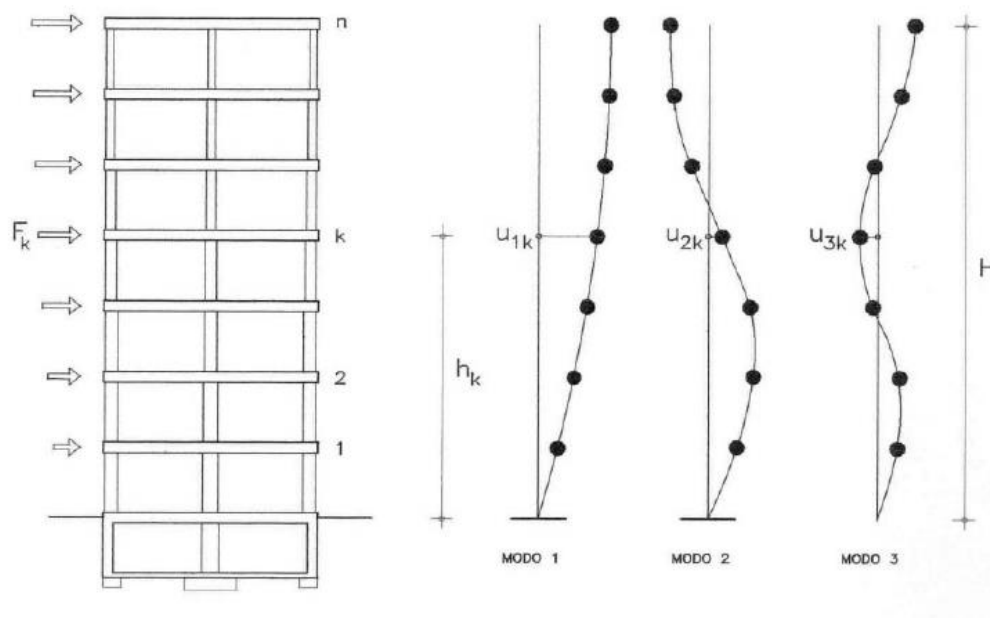


Figura 46: Modes 1, 2 i 3 de vibració fonamental en els edificis.¹

¹ Sergio Lagomarsino Rosangel Moreno, Ricardo Bonett, Alex Barbat, Lluís Pujades, Andrea Penna, "Evaluación de La Vulnerabilidad Sísmica de Estructuras de Mampostería No Reforzada. Aplicación a Un Edificio de La Zona Del Eixample En Barcelona," 2003.

Per la realització d'aquest anàlisi amb el mètode N2 es descriuran els passos seguits amb les contemplacions necessàries¹.

1) Recopilació d'informació per el model

En aquest cas on s'utilitzarà un model estructural pla MDOF (Múltiples graus de llibertat) es necessitarà informació referent al model per dur a terme l'anàlisi elàstic i relacions no lineals de força i deformació per tots els elements estructurals.

També haurà de representar la demanda sísmica mitjançant l'espectre d'acceleració elàstica en la seva forma natural Sa-T i contemplant un factor d'amortiment del 5%

2) Conversió del espectre de demanda a format ADRS

S'haurà de determinar l'espectre inelàstic en format ADRS per un sistema SDOF (Single Degree of Freedom) tenint en compte el PP.

3) Anàlisi pushover de la capacitat

Obtenció de la relació força – desplaçament per el sistema MDOF. Amb això obtindrem la corba de capacitat o “pushover” on s'encaren tallant en la base i desplaçament al sostre (V_{base} vs. D_{roof}).

Per obtenir el vector de càrregues laterals seguim la següent expressió per a distribucions de càrregues laterals:

$$P = p\psi = pM\Phi \quad Eq. 4.3.1$$

- P és el vector de càrregues laterals
- M és la matriu diagonal de masses
- p és la magnitud de càrregues laterals
- Ψ és la distribució de càrregues laterals
- Φ és la forma del desplaçament assumit

Observar que el desplaçament i la distribució de forces no actuen de manera independent. La força lateral en el nivell i és proporcional al component Φ_i de la forma assumida Φ ponderant les masses

$$P_i = p \cdot m_i \cdot \Phi_i \quad Eq. 4.3.2$$

Aquesta determinació es fonamenta en una base física. Si la forma assumida per al desplaçament fos exacta i constant durant el temps del sisme, la distribució de forces laterals seria igual a les forces efectives empleades pel terratrèmol (figura 47). Així que les transformacions del sistema MDOF al SDOF, i viceversa, són directes.

¹ Peter Fajfar, “A Nonlinear Analysis Method for Performance Based Seismic Design,” *Jazyki Mira, Ural'skije Jazyki* 16, no. 3 (1996): 90–115, <https://doi.org/10.1193/1.1586128>.

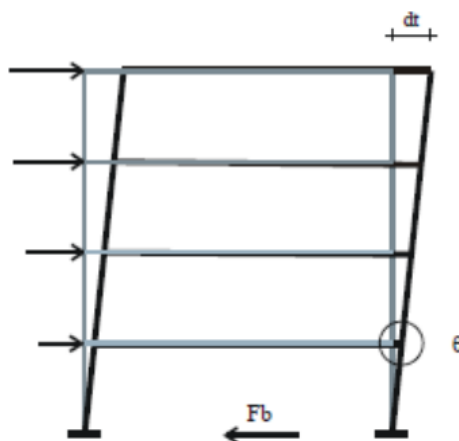


Figura 47: Patró de distribució de càrregues laterals seguint el moviment de l'estructura¹

4) Transformació a SDOF equivalent i diagrama de capacitat

En aquest punt hem de modelar el sistema MDOF com un SDOF. El comportament inelàstic es pren en consideració de forma explícita i la demanda sísmica es determina a partir del espectre de resposta. El punt de partida que prenem serà l'equació del moviment de un sistema pla MDOF:

$$M\ddot{U} + R = M1a \quad \text{Eq. 4.3.3}$$

- \ddot{U} és el vector que representa els desplaçaments
- R és el vector que representa forces internes
- 1 és el vector unitat
- a és l'acceleració del terra en funció del temps

S'assumeix que la forma del desplaçament no varia durant el sisme. El vector desplaçament es defineix per tant com:

$$\ddot{U} = \Phi \cdot D_{roof} \quad \text{Eq. 4.3.4}$$

El vector de forma Φ es normalitza i el valor del node superior passa a ser 1. Las forces internes son iguals a les càrregues externes aplicades estàticament P

$$P = R \quad \text{Eq. 4.3.5}$$

Arribats a aquest punt, i després de realitzar una sèrie d'operacions amb les equacions mostrades anteriorment, podem obtenir el desplaçament i les forces equivalents del sistema d'un grau de llibertat SDOF. Són les següents:

¹ Miralles, "Aplicación Del CSM Al Diseño Sísmico Prestacional de Estructuras Aporticadas de Hormigón Armado. Comparación de Los Métodos FEMA EL y N2."

$$D^* = \frac{D_{roof}}{T} \quad Eq. 4.3.6$$

$$F^* = \frac{V_{base}}{T} \quad Eq. 4.3.7$$

- D_{roof} és el desplaçament en el sostre del sistema MDOF
- V és el tallant a la base del sistema MDOF
- D^* és el desplaçament equivalent del sistema SDOF
- F^* és la força equivalent del sistema SDOF
- T és la constant de transformació. Factor de participació modal i es defineix amb la següent equació:

$$T = \frac{\Phi^T M 1}{\Phi^T M \Phi} = \frac{\sum m_i \Phi_i}{\sum m_i \Phi_i^2} = \frac{m^*}{\sum m_i \Phi_i^2} \quad Eq. 4.3.8$$

- m^* és la massa equivalent del sistema SDOF. És un factor de participació modal transformador que ens servirà per modificar la força i el desplaçament

Utilitzarem la transformació idealitzada de l'espectre de capacitats on el període del SDOF quedarà determinat per la següent equació:

$$T^* = 2\pi \sqrt{\frac{m^* D_y^*}{F_y^*}} \quad Eq. 4.3.8$$

- T^* és el període elàstic del sistema idealitzat bilineal
- F_y^* força de plastificació del sistema idealitzat bilineal
- D_y^* desplaçament de plastificació del sistema idealitzat bilineal

I l'acceleració espectral per la representació ADSR del sistema de massa equivalent (veure la esquematització resultant de la figura 48):

$$S_a = \frac{F^*}{m^*} \quad Eq. 4.3.9$$

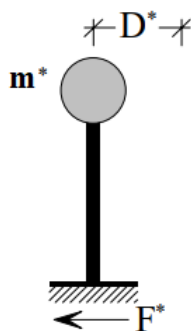


Figura 48: Esquematzació del sistema equivalent SDOF (D_{roof} vs. F_{base})¹

5) Demanda sísmica per el sistema equivalent SDOF

La demanda sísmica es pot determinar de manera gràfica (veure figura 49) superposant l'espectre de demanda amb el de capacitat. La intersecció de la línia radial (període elàstic del sistema bilineal) amb l'espectre de demanda elàstica S_{ay} (representa tant l'acceleració demandada com la capacitat del sistema inelàstic) representa l'acceleració requerida per a un comportament elàstic i la seva respectiva demanda de desplaçament. A continuació el gràfic il·lustratiu:

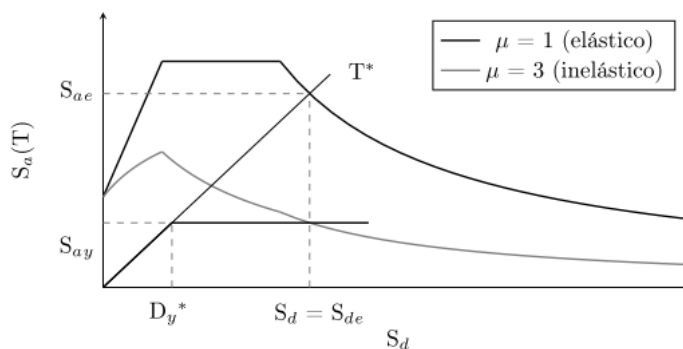


Figura 49: Gràfic del mètode N2 per un sistema SDOF²

6) Demanda sísmica local i global per al model MDOF

La demanda de desplaçament de model SDOF es transforma en el desplaçament del sistema MDOF mitjançant l'equació Eq. 4.3.6

La demanda sísmica es determinarà mitjançant l'anàlisi "pushover" assumint que la distribució de deformacions en l'estructura durant l'anàlisi de push incremental correspon a la que hagués obtingut mitjançant anàlisi dinàmics.

¹ Peter Fajfar, "A Nonlinear Analysis Method for Performance Based Seismic Design," *Jazyki Mira, Ural'skije Jazyki* 16, no. 3 (1996).

² Miralles, "Aplicación Del CSM Al Diseño Sísmico Prestacional de Estructuras Aporticadas de Hormigón Armado. Comparación de Los Métodos FEMA EL y N2."

7) Avaluació del punt d'acompliment i anàlisi de danys

El punt d'acompliment pot avaluar-se comparant les demandes sísmiques amb les capacitats obtingudes per cert nivell d'acompliment atenen a les diferents normatives de fragilitat. Pot comparar-se també a través de l'avaluació de plastificacions i danys dels diversos elements estructurals

4.3.1 Performance Point (Punt d'acompliment)

En el mètode N2, ens permetrà determinar amb quina severitat afectarà una acció sísmica, definida amb els espectres de resposta, envers al nostre edifici d'estudi, representat amb l'espectre de capacitat. Per tant s'enfrontaran aquests dos espectres en la seva representació ADRS (Acceleracions i desplaçaments). El punt de tall que resulta dels dos espectres; punt d'acompliment, Performance Point o punt de capacitat per demanda, ens donarà el punt de màxima sol·licitud estructural per a la demanda sísmica especificada tal i com es veu en els següents exemples.

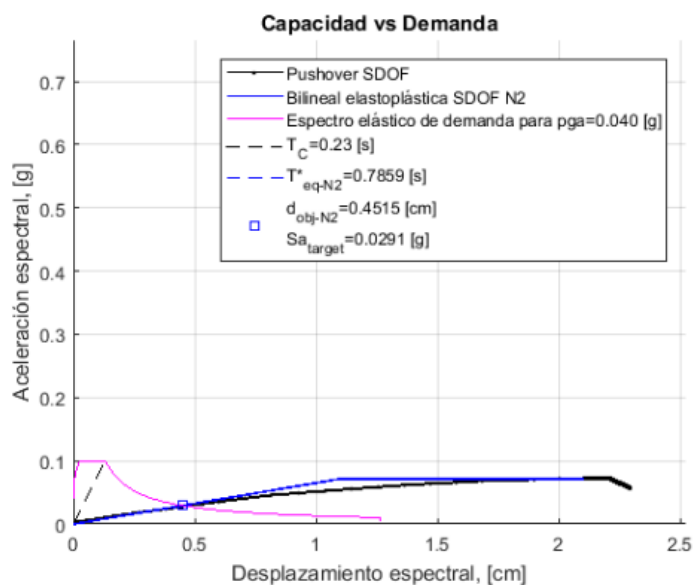


Figura 50: Cas lineal on PP en format ADRS per a ED01 amb PGA=0.04g recau en zona elàstica¹

¹ Font pròpia

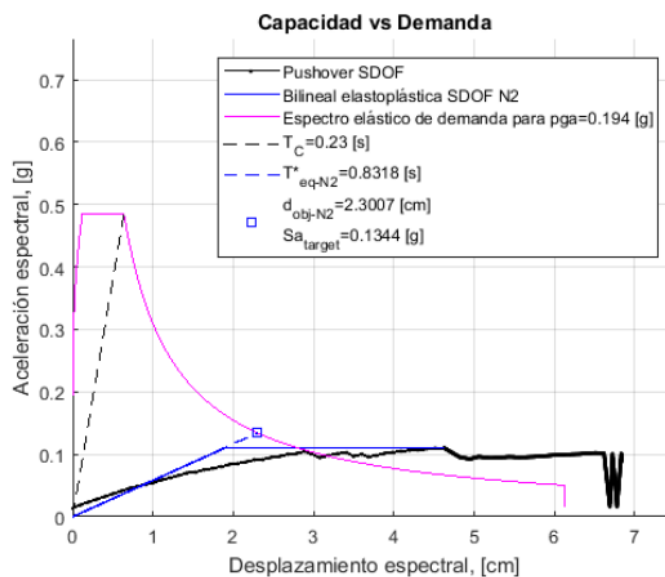


Figura 51: Cas no lineal on PP en format ADSR per a ED01 amb PGA=0.194g recau en zona no elàstica¹

En la situació d'estudi ens trobem en aquest cas, per la qual cosa utilitzarem el mètode no lineal de capacitat per demanda. Aquest procediment el solucionarà Matlab amb els seus algorismes preestablerts.

¹ Font pròpia

4.3 Fragilitat

Un cop obtingut el Performance Point o punt d'acompliment, s'introduirà el concepte de fragilitat, que a través de les seves corbes ens predirà la probabilitat que té de patir danys la nostra estructura.

Aquesta metodologia d'estudi va sorgir per la poca informació que es tenia sobre punts claus de l'edificació, com són les seves vulnerabilitats, el límit elàstic, les seqüències de falla, etc., en l'àmbit europeu en èpoques on no hi havia marc normatiu respecte a la vulnerabilitat estructural.

Per això es va crear una comissió europea on es va dur a terme aquest estudi, anomenat RISK UE (2003), on s'avaluaven edificis de tot Europa tenint en consideració aspectes com tipologies d'estructura, alçada, situació geogràfica, etc. davant d'un possible sisme.

En aquest apartat s'estudiarà la fragilitat de l'edifici tenint en compte les característiques constructives, la direcció del sisme, la sol·licitació de la zona o demanda i els PGA d'interès.

Es definiran els estats de dany en funció de la representació bilineal de l'espectre de capacitat.

4.3.1 Llindars de dany

En aquest apartat es definiran els llindars de dany en els nostres edificis a partir del espectre de capacitat en la seva forma bilineal segons les 4 equacions proposades per Lagomarsino segons el estat de dany (taula 7) i seguidament la corresponent gràfica de les rectes en la figura 52:

| Estat de dany | Llindar |
|--------------------------------|-----------|
| $Sd_1 = 0,7D_y$ | Lleu |
| $Sd_2 = D_y$ | Moderat |
| $Sd_3 = D_y + 0.25(D_u - D_y)$ | Sever |
| $Sd_4 = D_u$ | Col·lapse |

Taula 7: Definició dels llindars de dany segons Lagomarsino¹

¹ Rosangel Moreno, Ricardo Bonett, Alex Barbat, Lluís Pujades, Andrea Penna, "Evaluación de La Vulnerabilidad Sísmica de Estructuras de Mampostería No Reforzada. Aplicación a Un Edificio de La Zona Del Eixample En Barcelona."

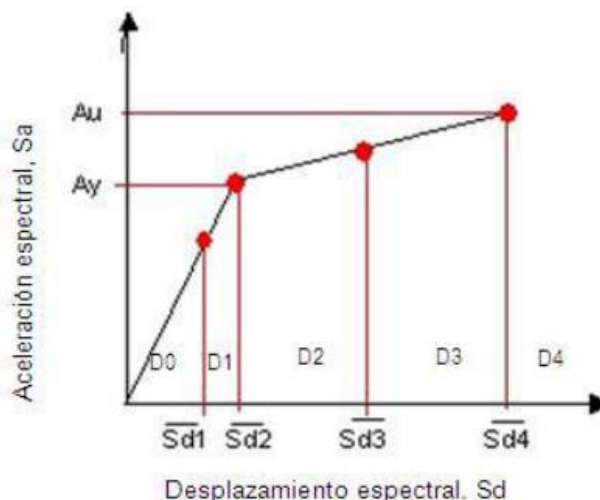


Figura 52: Llindars d'afectació representats en la forma bilineal¹

A partir d'aquesta gràfica podríem extreure tots els desplaçaments espectrals per cada llindar de dany.

4.3.2 Corbes de fragilitat

Aquestes corbes, a partir d'una tipologia d'edificació concreta i un estat de dany, ens definiran la probabilitat de l'estat de dany en funció de la intensitat sísmica d'estudi o la demanda. Per això es necessita el punt d'acompliment de cada PGA determinat i segons la següent equació:

$$F_{Dk,T}(i) = P[GD \geq Dk[i]] \tag{Eq. 4.4.2.1}$$

- Dk és el grau de dany de la corba de fragilitat corresponent.
- i és la variable 'intensitat sísmica.
- T és la tipologia seleccionada.

Coneixent els 4 punts que defineixen els desplaçaments espectrals segons els estats de dany vists anteriorment, es pot calcular la probabilitat d'arribar o superar els estats d'afectació. Això ho representarem a partir de les corbes de fragilitat (veure figura 53). Per calcular les 4 corbes de fragilitat s'utilitzarà la formulació proposada per Risk-UE. Aquestes seguiran una distribució de proporcionalitat logarítmica normal i respecte al desplaçament espectral, segons la següent expressió:

$$P[ds|Sd] = \Phi \left[\frac{1}{\beta_{ds}} \ln \left(\frac{Sd}{\overline{Sd}_{ds}} \right) \right] \tag{Eq. 4.4.2.1}$$

- Sd és el desplaçament espectral
- \overline{Sd}_{ds} és el valor mig del desplaçament en el que l'edifici assoleix l'estat de dany ds
- β_{ds} és la desviació estàndard del logaritme natural del desplaçament del estat de dany ds

¹ Castillo, "Evaluación Del Uso de Espectros de Diseño Al Análisis Del Riesgo Sísmico. Aplicación a Barcelona."Ca

- Φ és la funció lognormal de distribució estàndard

En el projecte Risk-UE es defineix com que el dany sísmic correspon a una distribució de probabilitat binomial i d'acord amb experts en la matèria, segueix una distribució beta o gamma. A continuació es mostra les probabilitats acumulades esperades per tots els estats de dany per una distribució binomial i si la probabilitat de cada estat de dany la fixem en un 50%:

| Condicció | Lleu | Moderat | Sever | Col·lapse |
|-----------|-------|---------|-------|-----------|
| P(1)=0,5 | 0,500 | 0,119 | 0,012 | 0,000 |
| P(2)=0,5 | 0,896 | 0,500 | 0,135 | 0,008 |
| P(3)=0,5 | 0,992 | 0,866 | 0,500 | 0,104 |
| P(4)=0,5 | 1,000 | 0,988 | 0,881 | 0,500 |

Taula 8: Probabilitat dels estats de dany esperats quan es fixa en 50% la probabilitat per cada estat de dany¹

Es mostren a continuació les corbes de fragilitat per un dels nostres edificis de 7 plantes:

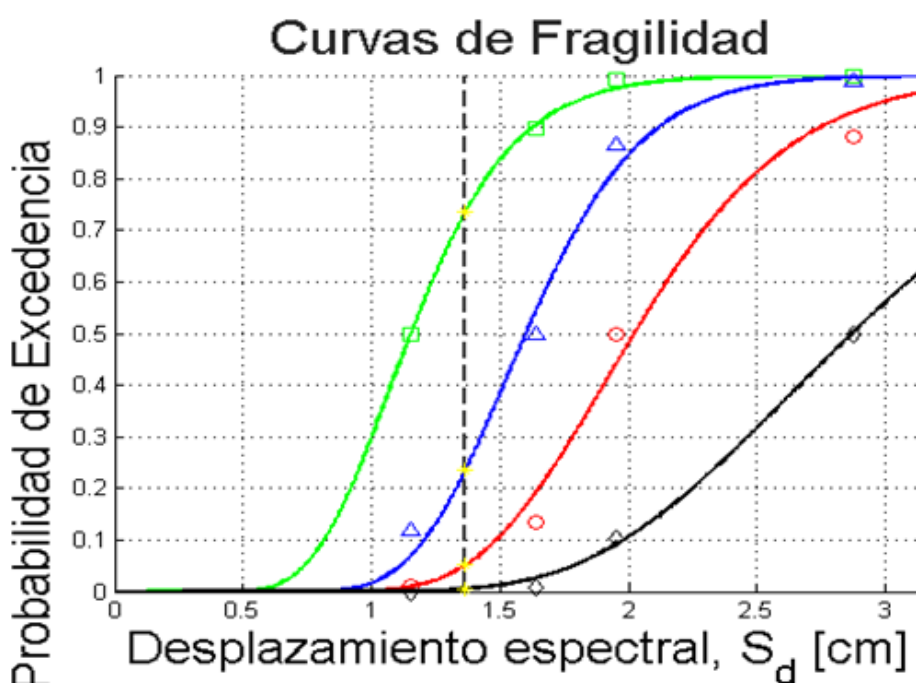


Figura 53: Exemples de corbes de fragilitat del ED01 per empenta positiva en l'eix de les Y²

S'observa que a mesura que augmenta el desplaçament augmenta el percentatge de patir danys més elevats. El que es fa llavors és traçar una vertical en el nostre S_d (corresponent al PP), la qual tallarà les 4 corbes. Són aquests 4 punts els que ens definiran les probabilitats de dany de cada estat.

Una altra representació possible per a la fragilitat és amb diagrames de barres:

¹ Miralles, "Aplicación Del CSM Al Diseño Sísmico Prestacional de Estructuras Aporticadas de Hormigón Armado. Comparación de Los Métodos FEMA EL y N2."

² Font pròpia

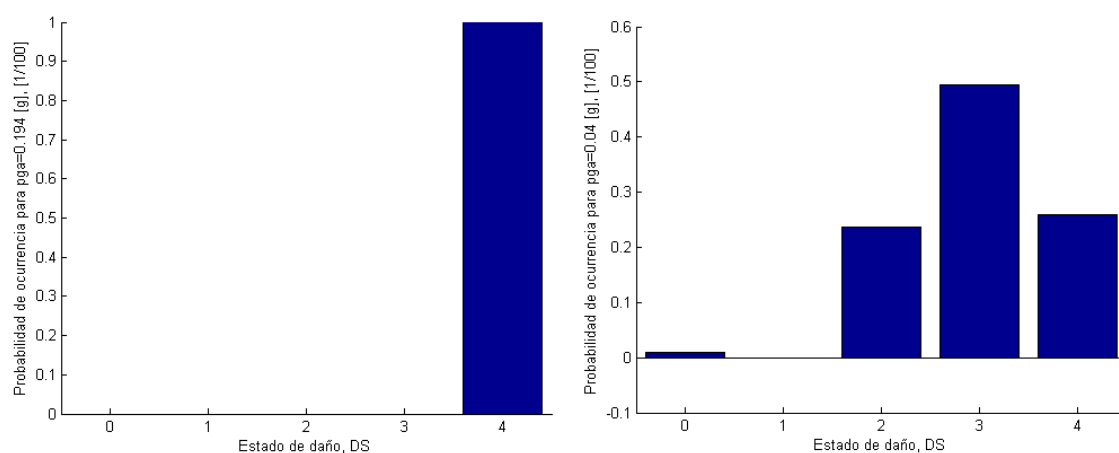


Figura 54: Exemple de probabilitats per cada un dels estats de dany per $PGA=0,194$ i $0,04g^1$

En el primer gràfic de l'anterior figura veiem que per a un PGA de 0,194g (proposat per Irizarry), el dany es concentra en l'estat de col·lapse, mentre que per un PGA de 0,04g (proposat per la NCSE-02) també tendeix cap a estats de danys severes però distribuït entre greu i col·lapse.

Tot i que la interpretació definitiva es farà a partir de l'índex de dany (veure figura 55) per valorar el tant per cent final d'afectació que se sotmetrà l'estructura, i ens descriurà els estats de dany en funció del tant per cent final (primera línia discontinua per PGA de 0,04g i segona per 0,194g).

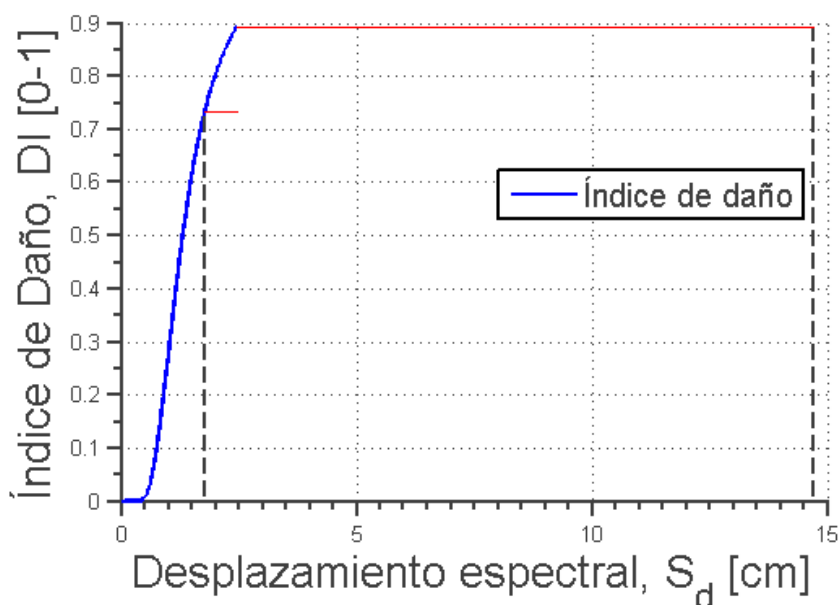


Figura 55: Exemples d'índex de danys per al PP de 0.04 i 0,194g (Primer desplaçament i segon respectivament)²

L'últim gràfic indica de forma ponderada l'índex de dany global per a cada una de les PGAs. Aquests valors seran els que ens indiquin de forma global el tipus d'afectació segons la direcció de l'empenta.

¹ Font pròpia

² Font pròpia

4.5 Anàlisi modal

Es realitzarà una anàlisi modal del conjunt dels edificis i una anàlisi individualitzat amb el programa 3Muri. Amb aquestes anàlisis obtindrem les propietats dinàmiques dels edificis, estudiant els 3 primers modes de vibració i la massa desplaçada en la direcció X i Y.

En el nostre cas es farà un estudi modal per l'edifici ED01, ED02 i pel conjunt ED01-02-01 en el període natural de vibració per veure el % de massa desplaçada en cada mode i en les dues direccions. Donat que els nostres edificis que formen l'agregat constitueixen una cantonada simètrica, s'esperen resultats molt propers en el cas que es canviés l'origen dels eixos d'un carrer a l'altre, per això s'analitzarà només un cas.

Aquest estudi dels 3 primers modes de vibració també ens servirà per corroborar i justificar que podem utilitzar el mètode N2, que comentat en l'apartat 4.3, aquest mètode considera el comportament de l'estructura en el seu primer mode de vibració.

3Muri també ens proporcionarà els esquemes de la planta dels nostres edificis i els desplaçaments dels nodes indicant-se les plantes a la que correspon, per veure si es verifica l'apreciació de l'increment de desplaçament en funció de l'altura creixent. D'aquesta manera es podrà apreciar quina planta ha patit un desplaçament major pel primer mode de vibració. Una vegada més s'analitzarà tant el conjunt com els edificis sols, ja que així serà com s'evidenciarà l'efecte resistiu d'aïllar o agregar edificis de les característiques d'estudi tant en X com en Y.

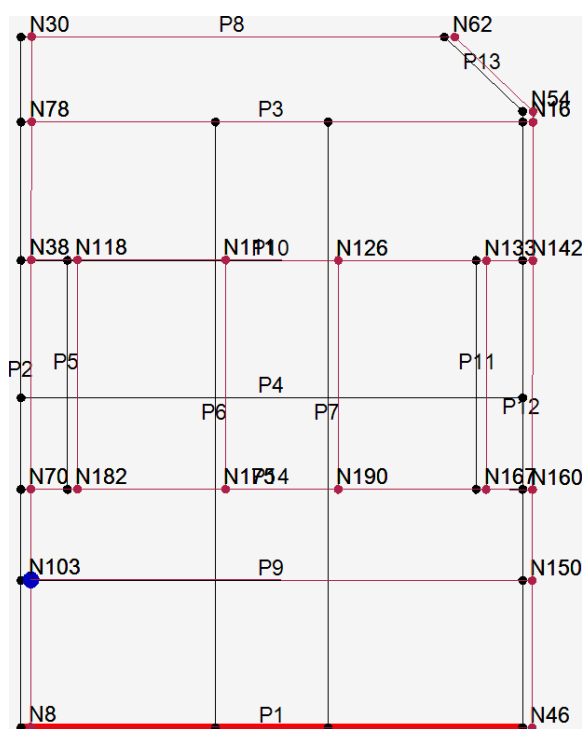


Figura 56: Desplaçament de la 7ª planta de ED01 amb una empenta X+1

¹ Font pròpia

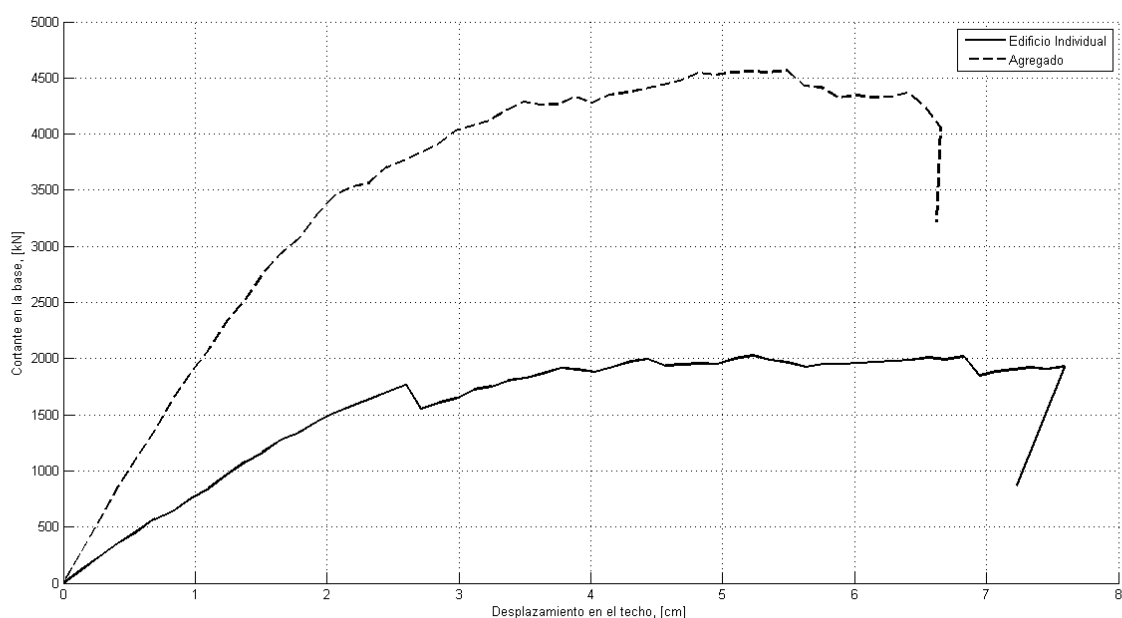
A la figura anterior veiem el desplaçament de cada node (ampliat en escala per fer-ho perceptible) de la primera planta del edifici ED01. Quan es presentin els resultats de cada planta, es verificarà que els desplaçament va augmentant a mesura que s'eleven les plantes. Això confirmarà que estem en el primer mode de vibració tal i com requereix el mètode N2. En quant al ED02, al ser de cantonada, conté molts elements alineats en direcció diagonal, pel que ens trobarem participació semblant ambdues direccions.

4.6 Anàlisi de fragilitat i ductilitat

En aquest apartat s'analitzarà la fragilitat o ductilitat que presenta l'edifici individual ED02 en front del agregat. D'aquesta manera es veurà si guanya o perd fragilitat i ductilitat al introduir-lo a un agregat d'edificis com el del nostre cas. Per això s'utilitzaran les corbes Pushover superposades (la línia contínua és l'edifici individual i la discontinua del agregat segons la figura 57).

La ductilitat (mu) s'obté de dividir el punt últim de la corba pushover (du) i el punt de fluència (dy). A efectes pràctics i a partir d'aquestes gràfiques, podem analitzar aquestes propietats veient que a major desplaçament i menor tallant s'assumeix un comportament més dúctil i a menor desplaçament però tallants més elevats s'assumeix un comportament més fràgil.

La ductilitat es pot pensar com la capacitat de deformació de l'edifici (o els seus elements) abans de trencar, com més gran sigui, més podem veure aquesta deformació i actuar en conseqüència per frenar-la. Si la ductilitat és petita (per tant l'edifici és més fràgil), l'edifici resistirà molt però no ens avisarà gaire si alguna cosa està succeint, per tant quan falli, fallarà de manera més sobtada.



Il·lustració 57: Corba Pushover del edifici ED02 i de l'agregat per a X-NEG¹

¹ Font pròpia

4.7 Simetria de l'agregat

En aquest apartat es veurà de quina manera afecta només estudiar els edificis en un sentit de cada direcció, ja que s'ha pres així com a hipòtesis per poder facilitar l'obtenció de dades.

Comentat amb anterioritat, els tres edificis d'estudi (ED01, ED02 i ED01) van ser un únic projecte del mateix arquitecte, per això podem veure que són simètrics des de la vista aèria (figura 59). Per aquest motiu es compararan els resultats més significatius per l'agregat.



Figura 58: Vista aèria del conjunt d'edificis amb el seu sistema de eixos coordenats¹

Els eixos de coordenades proposats per realitzar els assajos, s'ha proposat per nosaltres amb la hipòtesis que es guardaria una relació entre l'empenta X positiva i Y negativa, i també per X negativa i Y positiva degut a la simetria comentada. Això significa que els resultats esperats aplicant l'empenta des del ED01 esquerre amb X positiu haurien de ser iguals o molt propers als resultats d'aplicar l'empenta des de ED01 dret amb Y negatiu. D'igual manera succeiria aplicant l'empenta en Y positiu on s'obtidrien resultats molt similars que en X negativa. A continuació veiem si realment és verifca que els resultats són semblants, contrastant paràmetres d'estudi com és la capacitat (Tallant basal, màxima i desplaçament en el sostre), Performance Point (per $PGA=0,040$ i $0,194g$), Fragilitat (Contemplant els diferents estats: Lleu, Moderat, Sever, Col·lapse) i Índex de danys (també per $PGA=0,040$ i $0,194g$). Al costat trobem la columna de desviació percentual, que ens indicarà quin tant per cent sobrepassa o disminueix respecte el 100%. Aquest indicador és el coeficient de X-POS i Y-NEG, i de X-NEG i Y-POS que ens indicarà quina desviació d'increment o reducció s'ha produït en la nostre hipòtesis de simetria de l'agregat.

¹ Google Earth

| | ED01-02-01 | | | | | |
|---------------------------------|------------|-----------|---------------|-----------|-----------|---------------|
| | X-POSITIU | Y-NEGATIU | Desviació [%] | X-NEGATIU | Y-POSITIU | Desviació [%] |
| Tallant Basal (N) | 4.541.340 | 4.263.770 | 107% | 4.065.100 | 4.810.810 | 84% |
| Desplaçament (cm) | 6,68 | 6,62 | 101% | 6,65 | 6,85 | 97% |
| Tallant Màx. (N) | 4.721.180 | 4.743.540 | 100% | 4.567.540 | 4.818.210 | 95% |
| PP @ 0,040g (cm) | 1,52 | 1,47 | 103% | 1,55 | 1,56 | 99% |
| PP @ 0,194g (cm) | 12,69 | 12,18 | 104% | 12,86 | 13,03 | 99% |
| Fragilitat Lleu (%) | 83,00 | 84,00 | 99% | 83,00 | 75,00 | 111% |
| Fragilitat Moderat (%) | 37,00 | 41,00 | 90% | 39,00 | 31,00 | 126% |
| Fragilitat Sever (%) | 11,00 | 12,00 | 92% | 12,00 | 10,00 | 120% |
| Fragilitat Col·lapse (%) | 2,00 | 2,00 | 100% | 2,00 | 2,00 | 100% |
| DI @ 0,040g (%) | 34,00 | 35,00 | 97% | 35,00 | 30,00 | 117% |
| DI @ 0,194g (%) | 88,00 | 89,00 | 99% | 88,00 | 88,00 | 100% |

Taula 9: Desviacions entre paràmetres d'estudi de l'agregat ED01-02-01

Com veiem a la taula, les desviacions són relativament petites, tret de la comparativa X-NEG i Y-POS que són una mica més elevades. Tot i que els resultats no són idèntics, que tampoc es pretenia, degut al gran nombre d'elements d'estudi i tots els seus nodes d'unió és pràcticament impossible que s'obtinguin resultats iguals. Tot i així a l'anterior taula veiem una tendència que ens confirma la semblança esperada.

En el següent apartat de resultats, només es mostraran els resultats del ED01 de l'esquerra. Això és perquè els edificis individuals ED01 són completament iguals entre ells però amb disposició diferent (girat 90°). És per això que només s'estudiarà el edifici ED01 de l'esquerra.

5. Resultats

5.1 Corbes de capacitat

En aquest apartat veurem les diferents corbes Pushover en totes les seves formes i direccions pels diferents edificis amb el pertinents resums de resultats en taules.

5.1.1 Pushover dels ED01-ED02-ED01

5.1.1.1 Empenta X-POS

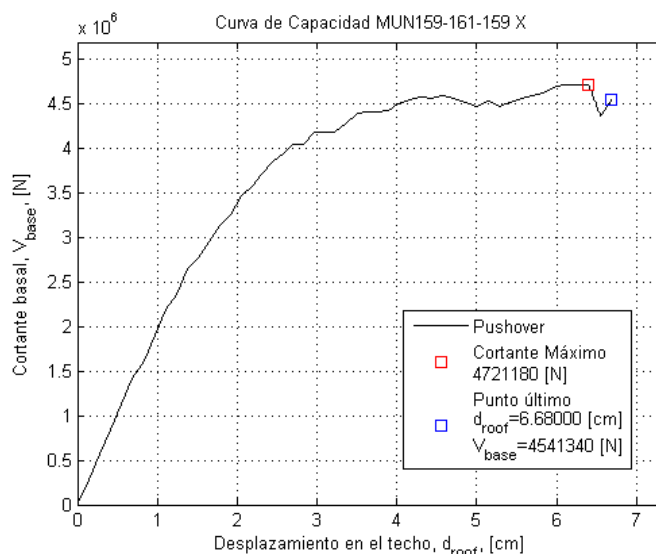


Figura 59: Espectre de capacitat X-Push Tallant basal vs. Desplaçament al sostre del agregat¹

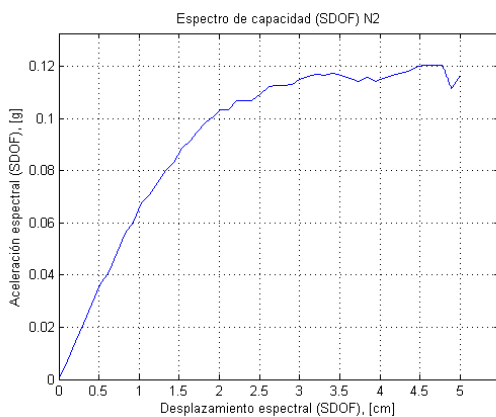


Figura 60: Capacitat acceleració vs. desplaçament²

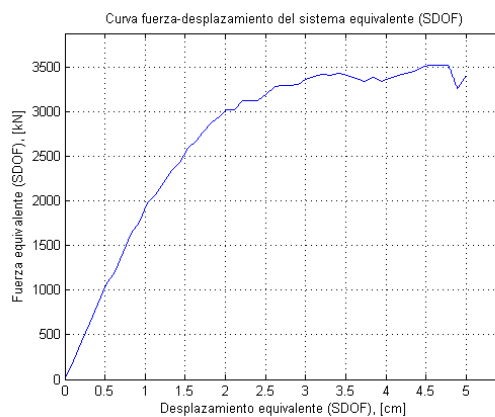


Figura 61: Capacitat força vs. desplaçament³

¹ Font pròpia

² Font pròpia

³ Font pròpia

5.1.1.2 Empenta Y-POS

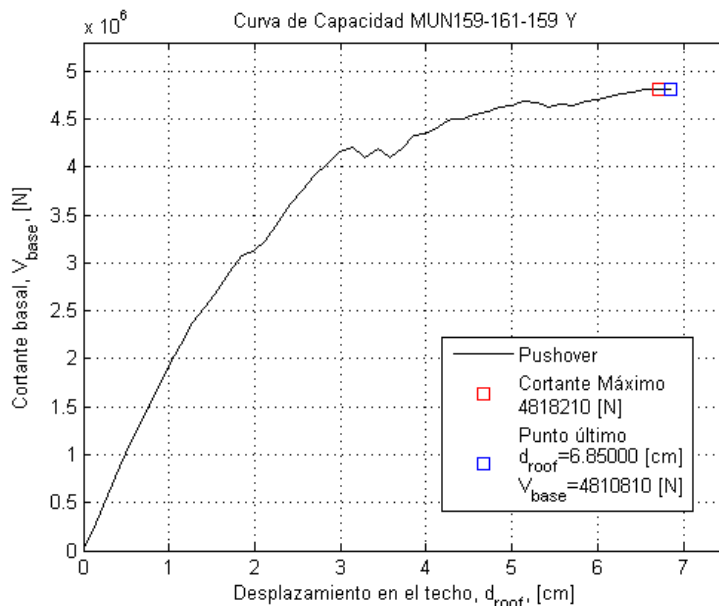


Figura 62: Espectre de capacitat Y-Push Tallant basal vs. Desplaçament al sostre del agregat¹

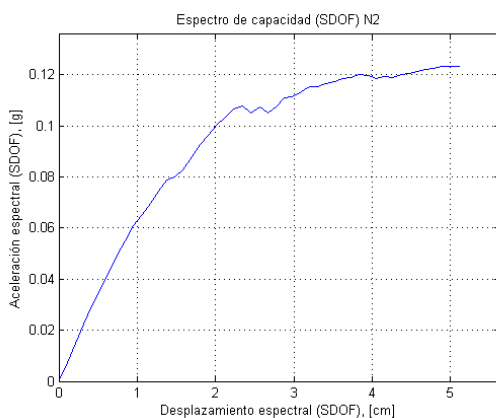


Figura 63: Capacitat acceleració vs. desplaçament²

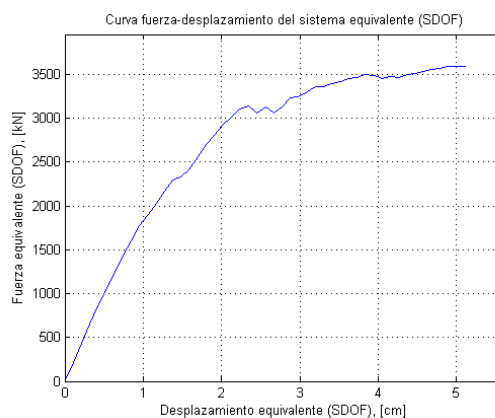


Figura 64: Capacitat força vs. desplaçament³

| RESUM | X-POS | X-NEG | Y-POS | Y-NEG |
|------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| D _{roof} (cm) | 6,68 | 6,65 | 6,85 | 6,62 |
| V _{base} (KN) | 4.541,340 | 4.065,100 | 4.810,810 | 4.263,770 |
| Tallant màxim (KN) | 4.721,180 | 4.567,540 | 4.818,210 | 4.743,540 |

Taula 10: Punts característics de les corbes pushover per ED01-02-01⁴

¹ Font pròpia

² Font pròpia

³ Font pròpia

⁴ Font pròpia

5.1.1 Pushover del ED01

5.1.1.1 Empenta X-POS

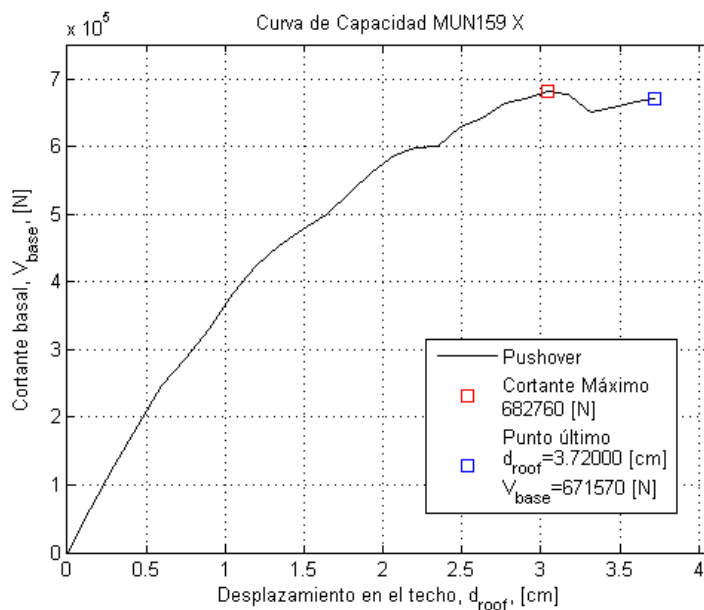


Figura 65: Espectre de capacitat X-Push Tallant basal vs. Desplaçament al sostre del ED01¹

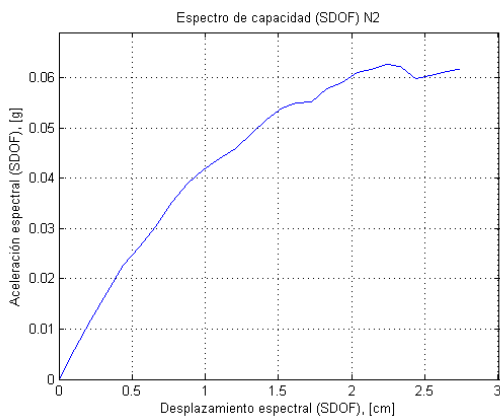


Figura 66: Capacitat acceleració vs. desplaçament²

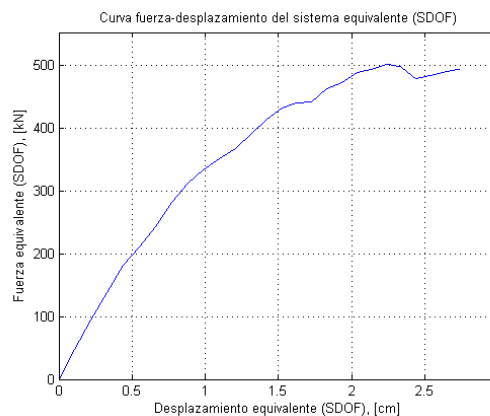


Figura 67: Capacitat força vs. desplaçament³

¹ Font pròpia

² Font pròpia

³ Font pròpia

5.1.1.2 Empenta Y-POS

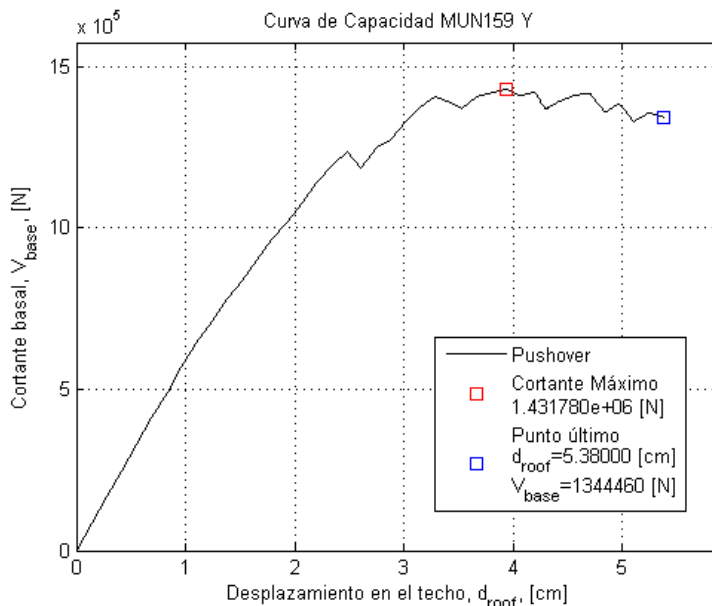


Figura 68: Espectre de capacitat Y-Push Tallant basal vs. Desplaçament al sostre del ED01¹

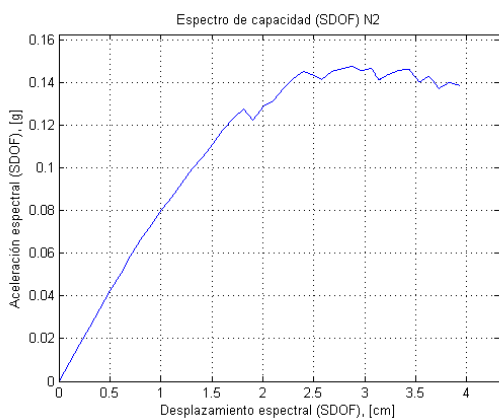


Figura 69: Capacitat acceleració vs. desplaçament²

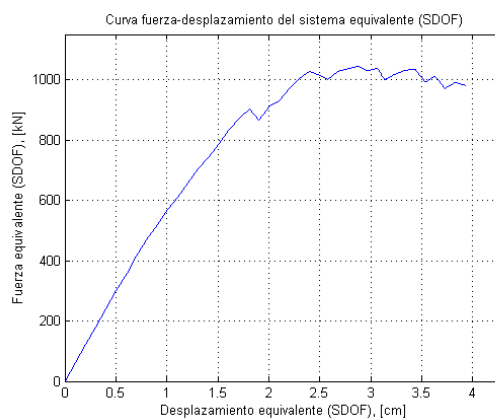


Figura 70: Capacitat força vs. desplaçament³

| RESUM | X-POS | X-NEG | Y-POS | Y-NEG |
|--------------------|---------|---------|-----------|-----------|
| D_{roof} (cm) | 3,72 | 3,66 | 5,38 | 6,10 |
| V_{base} (KN) | 671,570 | 569,080 | 1.340,460 | 1.382,540 |
| Tallant màxim (KN) | 682,760 | 692,940 | 1.431,780 | 1.400,800 |

Taula 11: Punts característics de les corbes pushover per ED01⁴

¹ Font pròpia

² Font pròpia

³ Font pròpia

⁴ Font pròpia

5.1.2 Pushover del ED02

5.1.2.1 Empenta X-POS

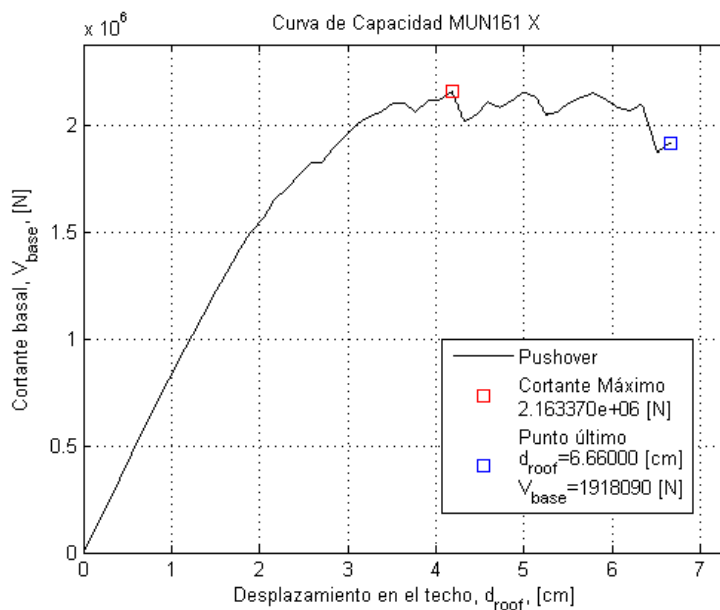


Figura 71: Espectre de capacitat X-Push Tallant basal vs. Desplaçament al sostre del ED02¹

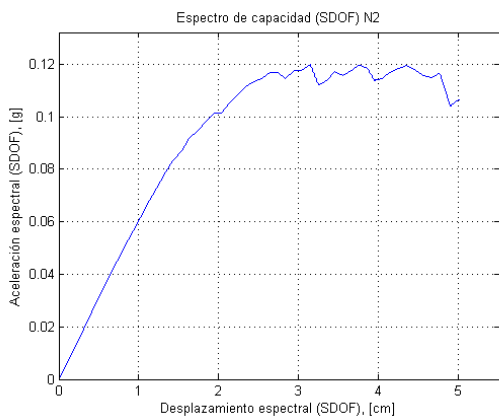


Figura 72: Capacitat acceleració vs. desplaçament²

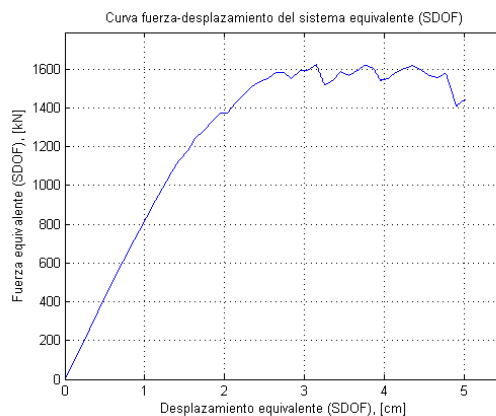


Figura 73: Capacitat força vs. desplaçament³

¹ Font pròpia

² Font pròpia

³ Font pròpia

5.1.2.2 Empenta Y-POS

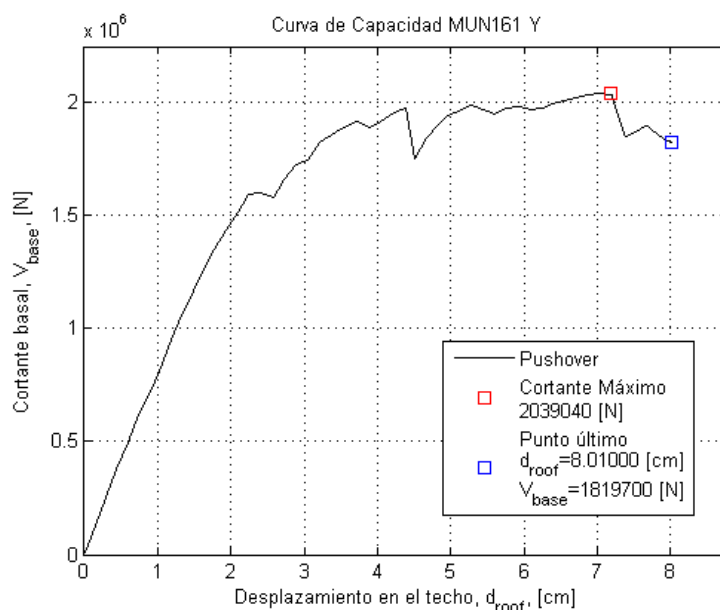


Figura 74: Espectre de capacitat Y-Push Tallant basal vs. Desplaçament al sostre del ED02¹

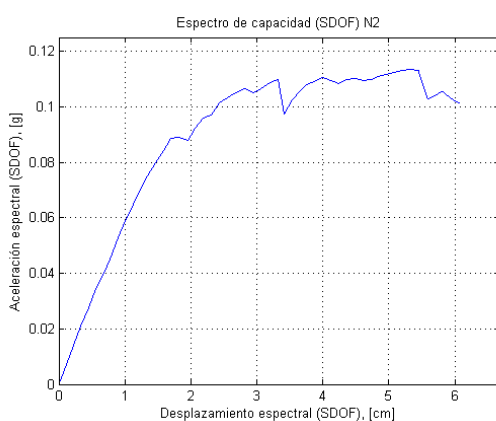


Figura 75: Capacitat acceleració vs. desplaçament²

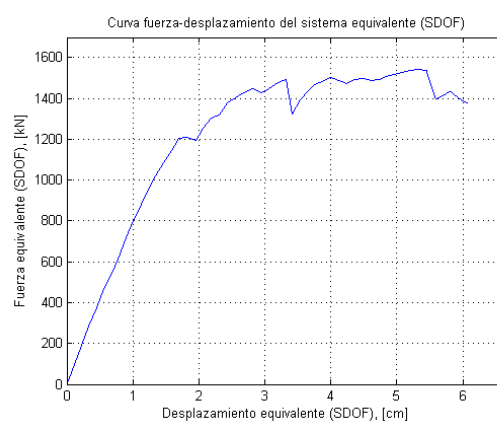


Figura 76: Capacitat força vs. desplaçament³

| RESUM | X-POS | X-NEG | Y-POS | Y-NEG |
|------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| D _{roof} (cm) | 6,66 | 7,59 | 8,01 | 7,11 |
| V _{base} (KN) | 1.918,090 | 1.927,340 | 1.819,700 | 1.963,680 |
| Tallant màxim (KN) | 2.163,370 | 2.028,130 | 2.039,040 | 2.151,270 |

Taula 12: Punts característics de les corbes pushover per ED02⁴

¹ Font pròpia

² Font pròpia

³ Font pròpia

⁴ Font pròpia

5.2 Capacitat i demanda

En aquest apartat veurem les gràfiques on es troba el punt d'acompliment per diferents PGAs en diferents direccions i edificis amb el resum de resultats en taules.

5.2.1 Capacitat i demanda de ED01-ED02-ED01

5.2.1.1 Empenta X-POS

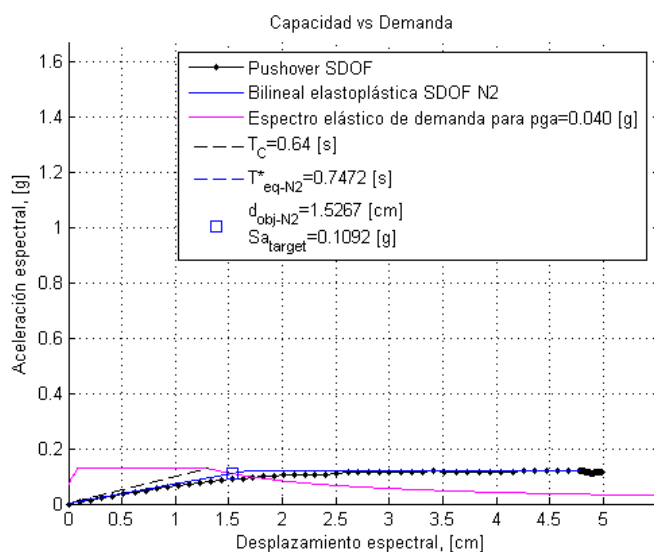


Figura 77: Punt d'acompliment PP per l'agregat en X-Push per PGA=0.040g (NCSE-02)¹

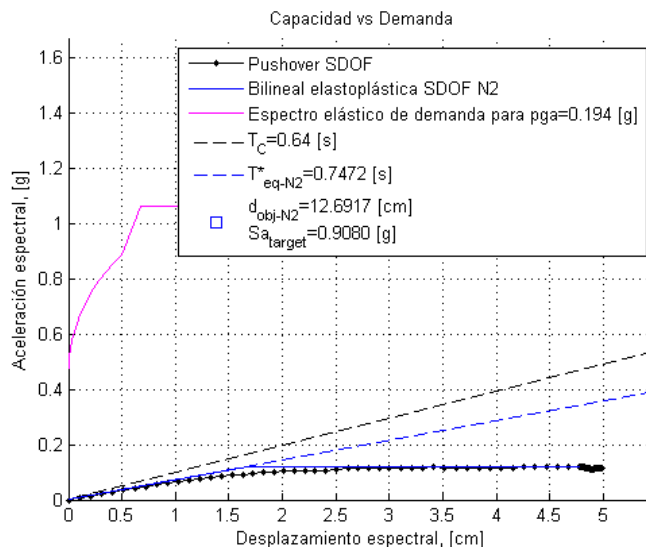


Figura 78: Punt d'acompliment PP per l'agregat en X-Push per PGA=0.194g (NCSE-02)²

| Performance Point – Sd (cm) | | | |
|-----------------------------|-------|--------|---------|
| PGA | | 0,04g | 0,194g |
| EC-8 | | 1,2859 | 6,2368 |
| Irizarry | | 0,4286 | 2,0789 |
| NCSE-02 | X-POS | 1,5267 | 12,6917 |
| | X-NEG | 1,5471 | 12,8610 |

Taula 13: PP de ED01-02-01 per les diferents Normatives i PGAs per X positiu³

¹ Font pròpia

² Font pròpia

³ Font pròpia

5.2.1.2 Empenta Y-POS

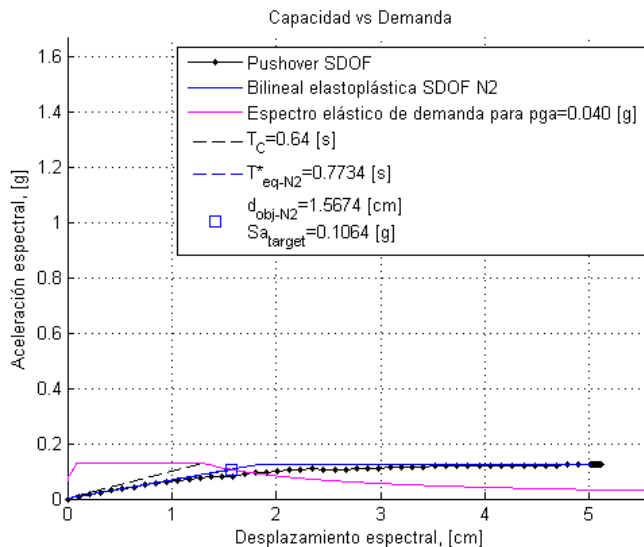


Figura 79: Punt d'acompliment PP per l'agregat en Y-Push per PGA=0.040g (NCSE-02)¹

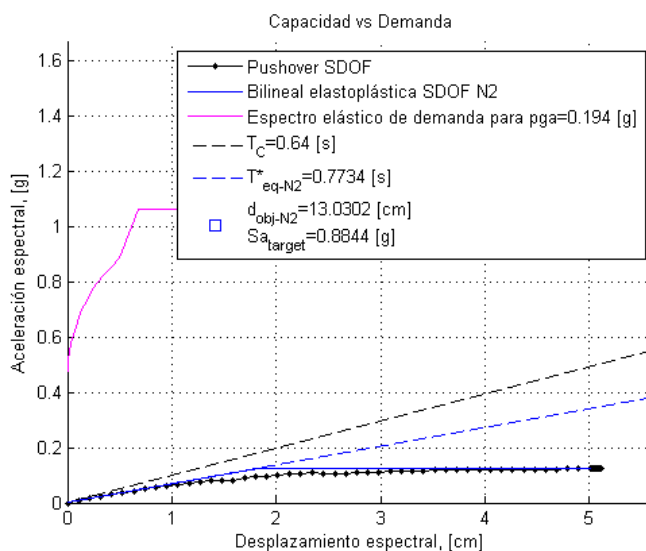


Figura 80: Punt d'acompliment PP per l'agregat en Y-Push per PGA=0.194g (NCSE-02)²

| Performance Point (cm) | | |
|------------------------|--------|--------|
| PGA | 0,04g | 0,194g |
| EC-8 | 1,3202 | 6,4031 |
| Irizarry | 0,4401 | 2,1344 |
| NCSE-02 | Y-POS | 1,5674 |
| | Y-NEG | 1,4657 |

Taula 14: PP de ED01-02-01 per les diferents Normatives i PGAs per Y positiu³

¹ Font pròpia

² Font pròpia

³ Font pròpia

5.2.2 Capacitat i demanda de ED01

5.2.2.1 Empenta X-POS

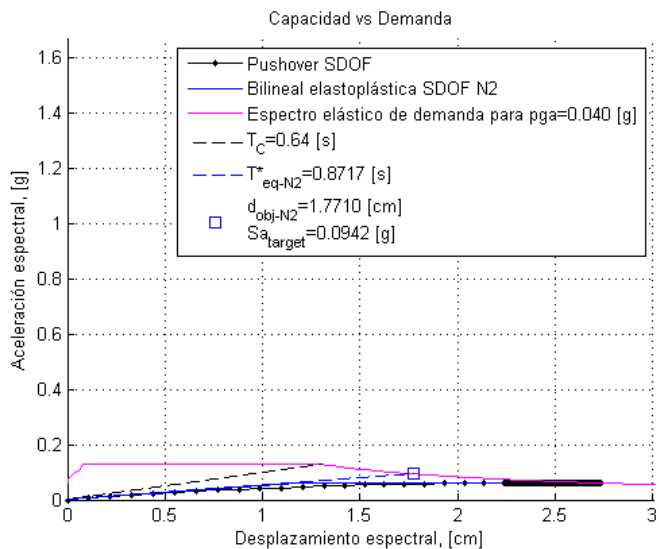


Figura 81: Punt d'acompliment PP per ED01 en X-Push per PGA=0.040g (NCSE-02)¹

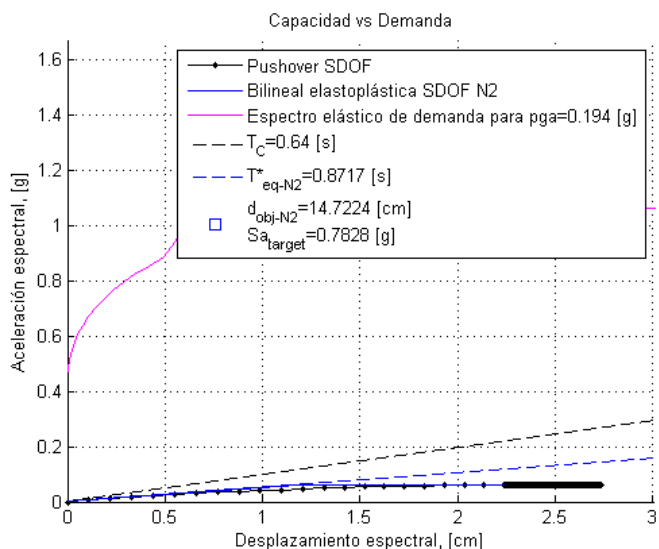


Figura 82: Punt d'acompliment PP per ED01 en X-Push per PGA=0.194g (NCSE-02)²

| Performance Point – Sd (cm) | | |
|-----------------------------|--------|---------|
| PGA | 0,04g | 0,194g |
| EC-8 | 1,4917 | 7,2347 |
| Irizarry | 0,4972 | 2,4116 |
| NCSE-02 | X-POS | 1,7710 |
| | X-NEG | 1,8117 |
| | | 14,7224 |
| | | 15,0609 |

Taula 15: PP de ED01 per les diferents Normatives i PGAs per X positiu³

¹ Font pròpia

² Font pròpia

³ Font pròpia

5.2.2.2 Empenta Y-POS

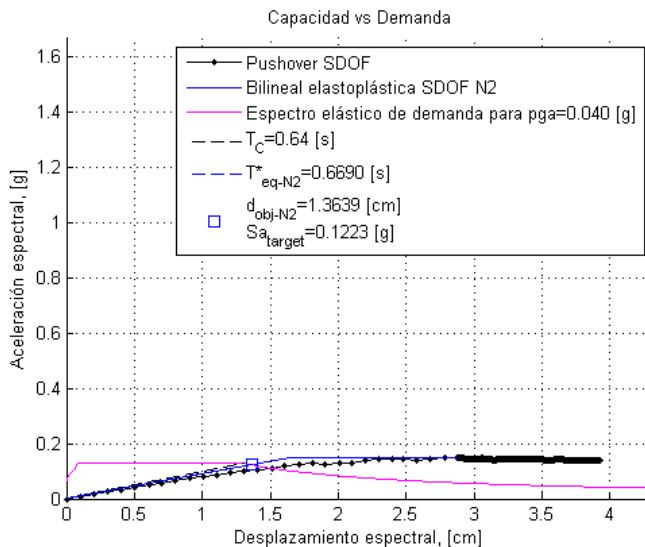


Figura 83: Punt d'acompliment PP per ED01 en Y-Push per PGA=0.040g (NCSE-02)¹

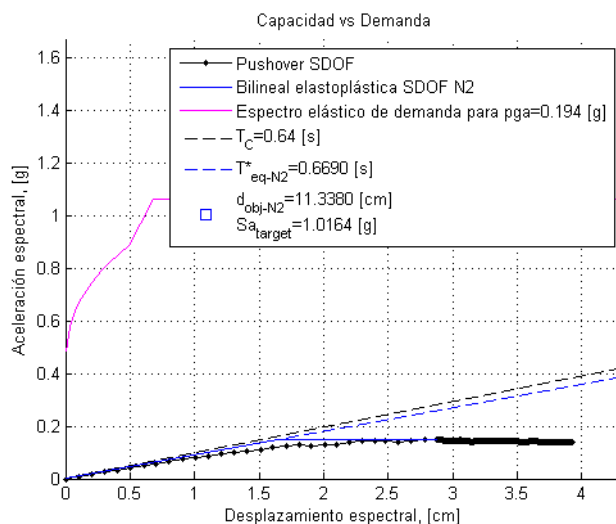


Figura 84: Punt d'acompliment PP per ED01 en Y-Push per PGA=0.194g (NCSE-02)²

| Performance Point – Sd (cm) | | |
|-----------------------------|--------|--------|
| PGA | 0,04g | 0,194g |
| EC-8 | 1,1418 | 5,5715 |
| Irizarry | 0,3829 | 1,8572 |
| NCSE-02 | Y-POS | 1,3639 |
| | Y-NEG | 1,3639 |

Taula 16: PP de ED01 per les diferents Normatives i PGAs per Y positiu³

¹ Font pròpia

² Font pròpia

³ Font pròpia

5.2.3 Capacitat i demanda de ED02

5.2.3.1 Empenta X-POS

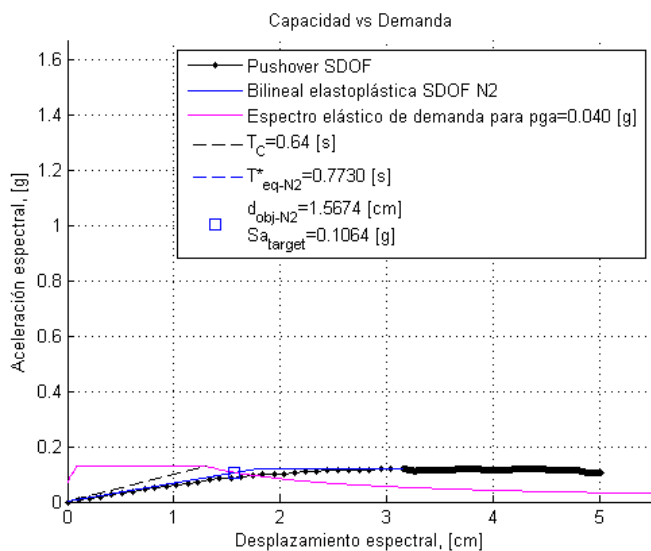


Figura 85: Punt d'acompliment PP per ED02 en X-Push per PGA=0.040g (NCSE-02)¹

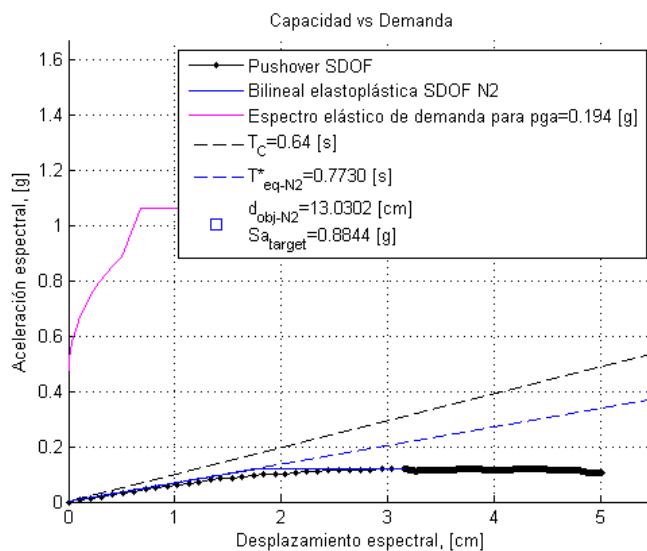


Figura 86: Punt d'acompliment PP per ED02 en X-Push per PGA=0.194g (NCSE-02)²

| Performance Point – Sd (cm) | | |
|-----------------------------|-------|----------------------------|
| PGA | | 0,04g 0,194g |
| EC-8 | | 1,3202 6,4031 |
| Irizarry | | 0,4401 2,1344 |
| NCSE-02 | X-POS | 1,5674 13,0302 |
| | X-NEG | 1,6081 13,3686 |

Taula 17: PP de ED02 per les diferents Normatives i PGAs per X positiu³

¹ Font pròpia

² Font pròpia

³ Font pròpia

5.2.3.2 Empenta Y-POS

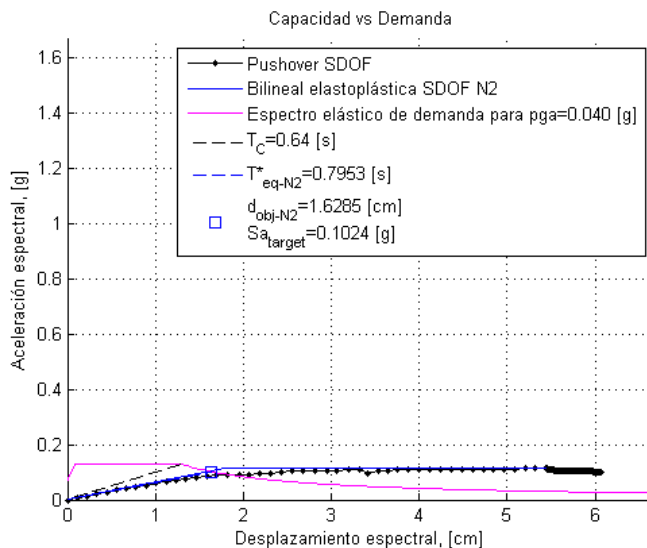


Figura 87: Punt d'acompliment PP per ED02 en Y-Push per PGA=0.040g (NCSE-02)¹

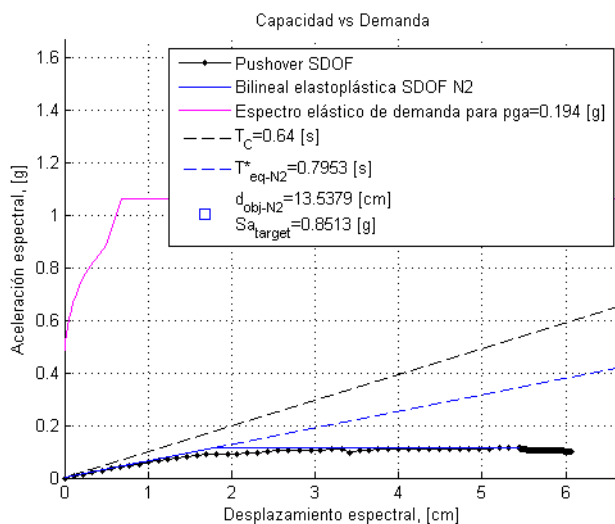


Figura 88: Punt d'acompliment PP per ED02 en Y-Push per PGA=0.194g (NCSE-02)²

| Performance Point – Sd (cm) | | |
|-----------------------------|--------|--------|
| PGA | 0,04g | 0,194g |
| EC-8 | 1,3717 | 6,6526 |
| Irizarry | 0,4572 | 2,2175 |
| NCSE-02 | Y-POS | 1,6285 |
| | Y-NEG | 1,5471 |

Taula 18: PP de ED02 per les diferents Normatives i PGAs per Y positiu³

¹ Font pròpia

² Font pròpia

³ Font pròpia

5.3 Corbes de fragilitat

A continuació les corbes de fragilitat per cada direcció, edifici i agregat amb el resum de resultats dels estats de dany en taules.

5.3.1 Fragilitat de ED01-ED02-ED01

5.3.1.1 Empenta X-POS

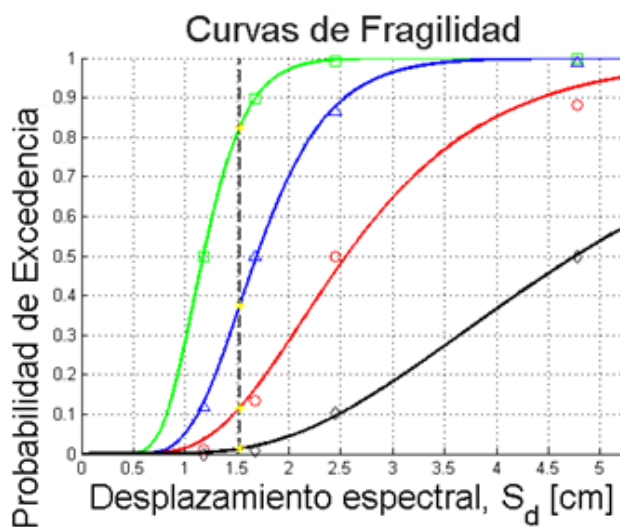


Figura 89: Corba de fragilitat X-Push per l'agregat segons NCSE-02¹

5.3.1.2 Empenta Y-POS

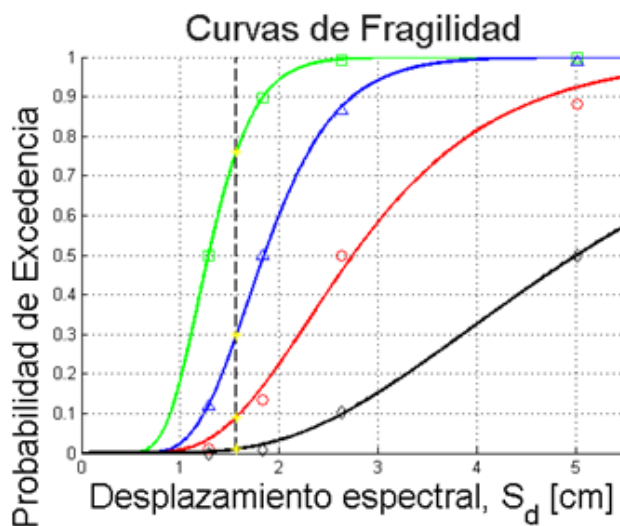


Figura 90: Corba de fragilitat Y-Push per l'agregat segons NCSE-02²

¹ Font pròpia

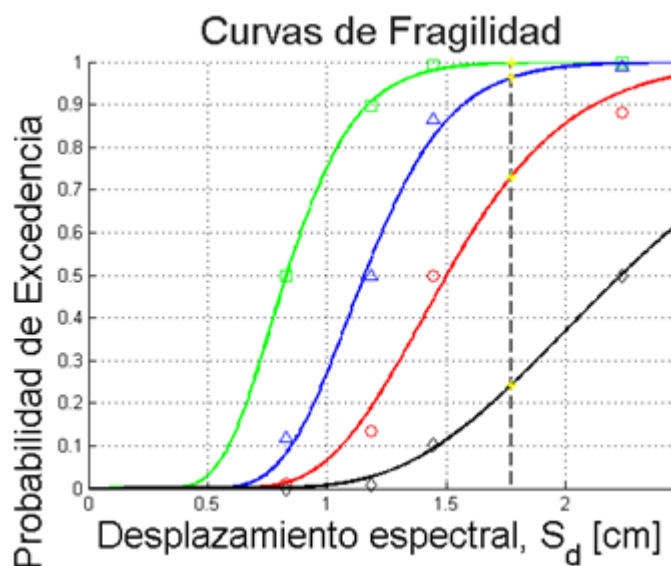
² Font pròpia

| Irizarry (Probabilista) | | | | | | | |
|-------------------------|----------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|
| Direcció | SL [%] | MO [%] | SE [%] | CO [%] | PP [cm] | N-D [%] | |
| X-POS | 24 | 42 | 27 | 5 | 2,0789 | 2 | |
| Y-POS | 29 | 41 | 23 | 4 | 2,1344 | 3 | |
| EC-8 | | | | | | | |
| PGA [g] | Direcció | SL [%] | MO [%] | SE [%] | CO [%] | PP [cm] | N-D [%] |
| 0,194 | X-POS | 0 | 2 | 28 | 70 | 6,2368 | 0 |
| | Y-POS | 0 | 3 | 28 | 69 | 6,3511 | 0 |
| 0,04 | X-POS | 43 | 14 | 5 | 1 | 1,2859 | 37 |
| | Y-POS | 40 | 10 | 3 | 1 | 1,3202 | 46 |
| NCSE-02 | | | | | | | |
| PGA [g] | Direcció | SL [%] | MO [%] | SE [%] | CO [%] | PP [cm] | N-D [%] |
| 0,194 | X-POS | 0 | 0 | 3 | 97 | 12,69 | 0 |
| | Y-POS | 0 | 1 | 3 | 96 | 13,03 | 0 |
| 0,04 | X-POS | 45 | 25 | 10 | 2 | 1,53 | 18 |
| | Y-POS | 46 | 21 | 8 | 1 | 1,57 | 24 |
| | X-NEG | 44 | 27 | 11 | 2 | 1,47 | 16 |
| | Y-NEG | 43 | 28 | 11 | 2 | 1,55 | 16 |

Taula 19: Fragilitat de ED01-02-01 pels diferents marcs normatius, direccions i PGAs¹

5.3.2 Fragilitat de ED01

5.3.2.1 Empenta X-POS

Figura 91: Corba de fragilitat X-Push per ED01 segons NCSE-02²¹ Font pròpia² Font pròpia

5.3.2.2 Empenta Y-POS

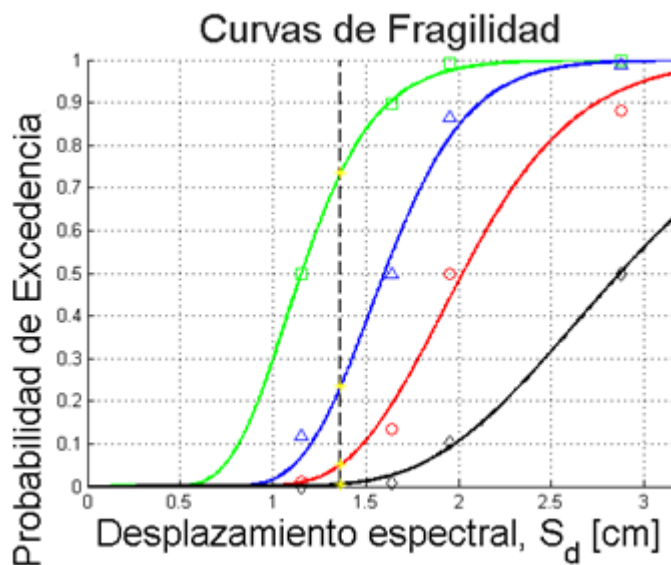


Figura 92: Corba de fragilitat Y-Push per ED01 segons NCSE-02¹

| Irizarry (Probabilista) | | | | | | | |
|-------------------------|----------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|
| Direcció | SL [%] | MO [%] | SE [%] | CO [%] | PP [cm] | N-D [%] | |
| X-POS | 1 | 3 | 37 | 59 | 2,4116 | 0 | |
| Y-POS | 21 | 39 | 29 | 7 | 1,8572 | 4 | |
| EC-8 | | | | | | | |
| PGA [g] | Direcció | SL [%] | MO [%] | SE [%] | CO [%] | PP [cm] | N-D [%] |
| 0,194 | X-POS | 0 | 0 | 0 | 100 | 7,2347 | 0 |
| | Y-POS | 0 | 0 | 2 | 98 | 5,5715 | 0 |
| 0,04 | X-POS | 13 | 36 | 38 | 11 | 1,4917 | 2 |
| | Y-POS | 43 | 5 | 1 | 1 | 1,1488 | 50 |
| NCSE-02 | | | | | | | |
| PGA [g] | Direcció | SL [%] | MO [%] | SE [%] | CO [%] | PP [cm] | N-D [%] |
| 0,194 | X-POS | 0 | 0 | 0 | 100 | 14,72 | 0 |
| | Y-POS | 0 | 0 | 0 | 100 | 11,34 | 0 |
| 0,04 | X-POS | 4 | 24 | 48 | 24 | 1,77 | 0 |
| | Y-POS | 51 | 17 | 4 | 1 | 1,36 | 27 |
| | X-NEG | 2 | 11 | 50 | 37 | 1,81 | 0 |
| | Y-NEG | 47 | 21 | 7 | 1 | 1,36 | 76 |

Taula 20: Fragilitat de ED01 pels diferents marcs normatius, direccions i PGAs²

¹ Font pròpia

² Font pròpia

5.3.3 Fragilitat de ED02

5.3.3.1 Empenta X-POS

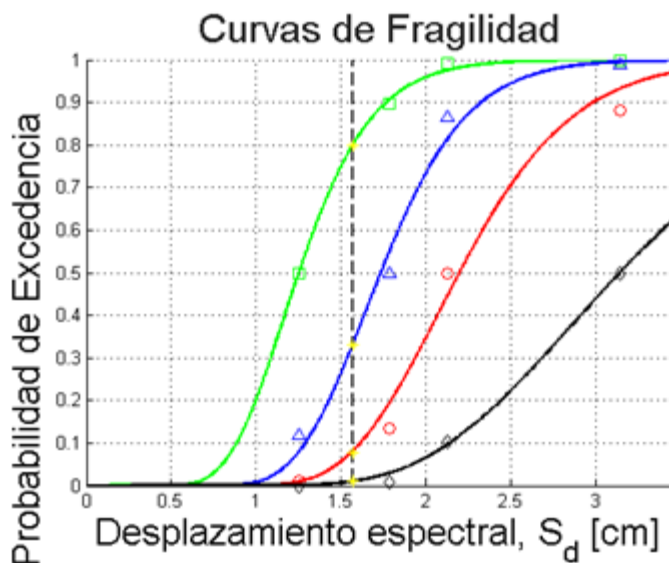


Figura 93: Corba de fragilitat X-Push per ED02 segons NCSE-02¹

5.3.3.2 Empenta Y-POS

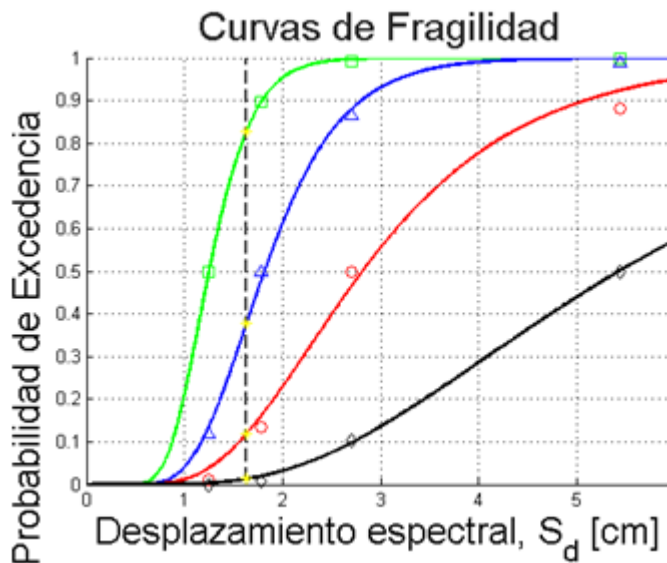


Figura 94: Corba de fragilitat Y-Push per ED02 segons NCSE-02²

¹ Font pròpia

² Font pròpia

| Irizarry (Probabilista) | | | | | | | |
|-------------------------|----------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|
| | Direcció | SL [%] | MO [%] | SE [%] | CO [%] | PP [cm] | N-D [%] |
| | X-POS | 15 | 37 | 35 | 10 | 2,1304 | 3 |
| | Y-POS | 25 | 42 | 25 | 5 | 2,2175 | 3 |
| EC-8 | | | | | | | |
| PGA [g] | Direcció | SL [%] | MO [%] | SE [%] | CO [%] | PP [cm] | N-D [%] |
| 0,194 | X-POS | 0 | 0 | 1 | 99 | 6,4031 | 0 |
| | Y-POS | 0 | 4 | 31 | 65 | 6,6526 | 0 |
| 0,04 | X-POS | 46 | 9 | 2 | 1 | 1,3202 | 42 |
| | Y-POS | 42 | 15 | 5 | 1 | 1,3717 | 37 |
| NCSE-02 | | | | | | | |
| PGA [g] | Direcció | SL [%] | MO [%] | SE [%] | CO [%] | PP [cm] | N-D [%] |
| 0,194 | X-POS | 0 | 0 | 0 | 100 | 13,03 | 0 |
| | Y-POS | 0 | 0 | 4 | 96 | 13,54 | 0 |
| 0,04 | X-POS | 47 | 25 | 6 | 2 | 1,57 | 20 |
| | Y-POS | 44 | 27 | 9 | 2 | 1,63 | 18 |
| | X-NEG | 43 | 28 | 11 | 2 | 1,61 | 16 |
| | Y-NEG | 46 | 26 | 8 | 1 | 1,55 | 19 |

Taula 21: Fragilitat de ED02 pels diferents marcs normatius, direccions i PGAs¹¹ Font pròpia

5.4 Estats de dany

A continuació els diferents estats de dany per les diferents empentes en cada edifici amb el resum de resultats en taules.

5.4.1 Estats de dany per ED01-ED02-ED01

5.4.1.1 Empenta X-POS

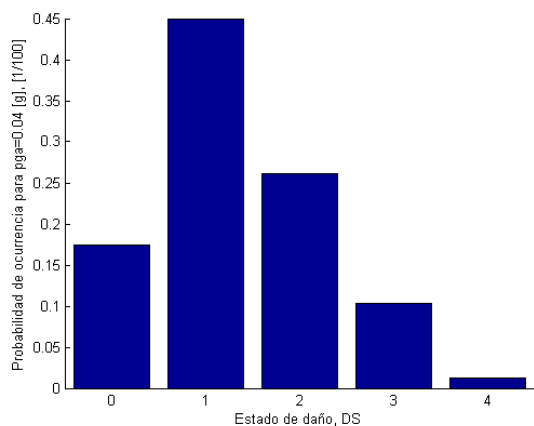


Figura 95: Estats de dany per l'agregat sotmès a X-Push amb un PGA=0.040g segons NCSE-02¹

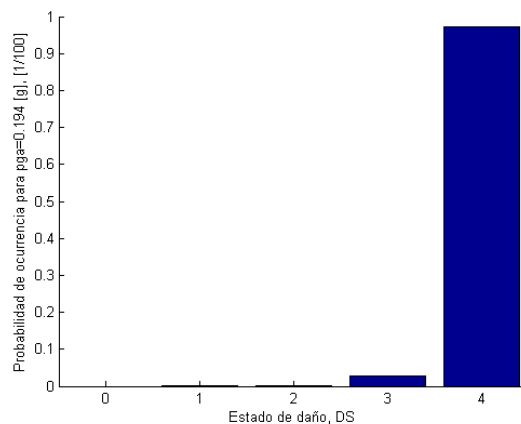


Figura 96: Estats de dany per l'agregat sotmès a X-Push amb un PGA=0.194g segons NCSE-02²

5.4.1.2 Empenta Y-POS

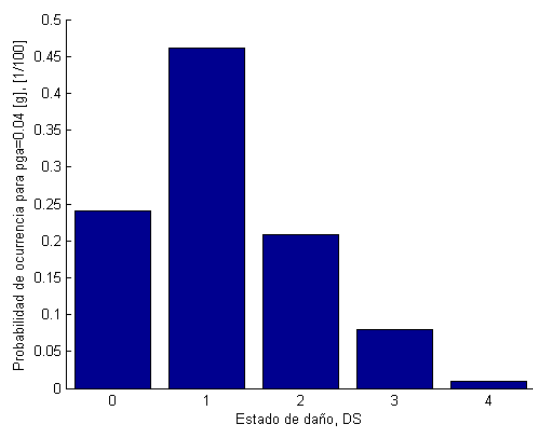


Figura 97: Estats de dany per l'agregat sotmès a Y-Push amb un PGA=0.040g segons NCSE-02³

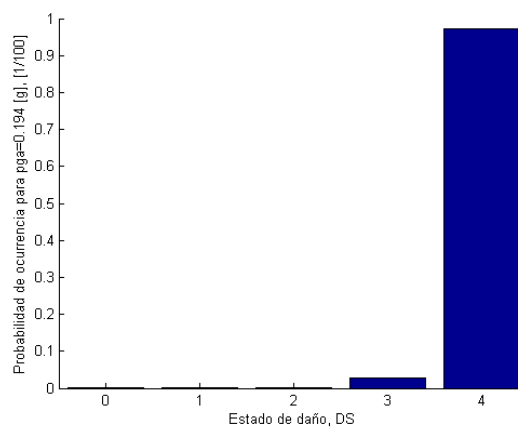


Figura 98: Estats de dany per l'agregat sotmès a Y-Push amb un PGA=0.194g segons NCSE-02⁴

¹ Font pròpia

² Font pròpia

³ Font pròpia

⁴ Font pròpia

| PGA [g] | X-POS | | | | | Y-POS | | | | |
|---------|-------|------|------|-----|-----|-------|------|------|-----|-------|
| | Sd0 | Sd1 | Sd2 | Sd3 | Sd4 | Sd0 | Sd1 | Sd2 | Sd3 | Sd4 |
| 0,04 | 18% | 45% | 26% | 10% | 1% | 24% | 46% | 21% | 7% | 2% |
| 0,194 | 0% | 0,5% | 0,5% | 2% | 97% | 0,5% | 0,5% | 0,5% | 3% | 95,5% |

Taula 22: Estats de dany de ED01-02-01 per les diferents direccions i PGAs¹

5.4.2 Estats de dany per ED01

5.4.2.1 Empenta X-POS

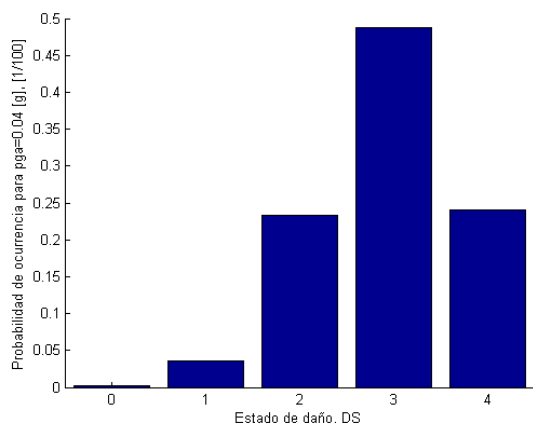


Figura 99: Estats de dany per ED01 sotmès a X-Push amb un PGA=0.040g segons NCSE-02²

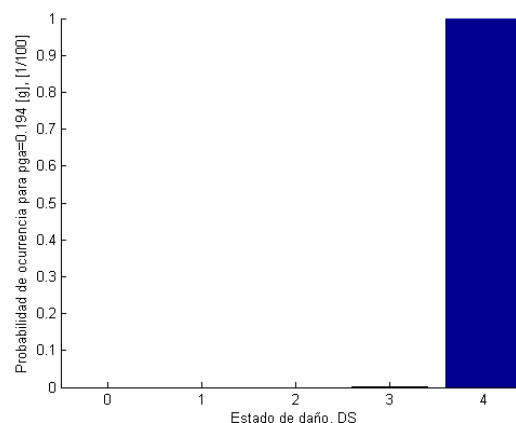


Figura 100: Estats de dany per ED01 sotmès a X-Push amb un PGA=0.194g segons NCSE-02³

5.4.2.2 Empenta Y-POS

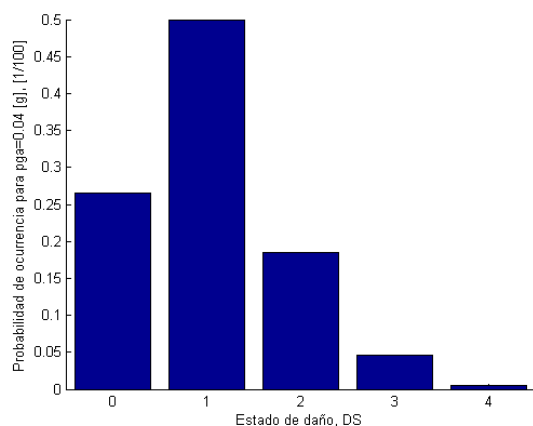


Figura 101: Estats de dany per ED01 sotmès a Y-Push amb un PGA=0.040g segons NCSE-02⁴

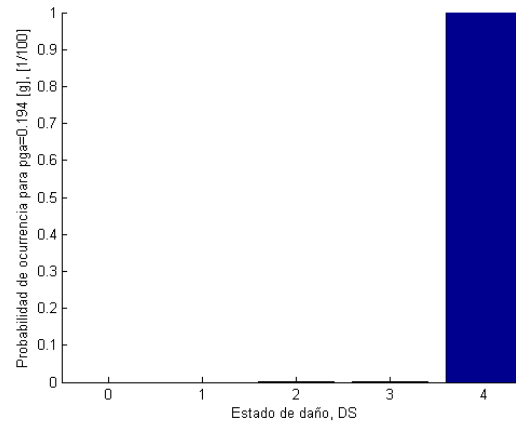


Figura 102: Estats de dany per ED01 sotmès a Y-Push amb un PGA=0.194g segons NCSE-02⁵

¹ Font pròpia

² Font pròpia

³ Font pròpia

⁴ Font pròpia

⁵ Font pròpia

| PGA [g] | X-POS | | | | | Y-POS | | | | |
|---------|-------|------|-----|-----|-----|-------|-----|------|------|-----|
| | Sd0 | Sd1 | Sd2 | Sd3 | Sd4 | Sd0 | Sd1 | Sd2 | Sd3 | Sd4 |
| 0,04 | 0,5% | 3,5% | 23% | 49% | 24% | 27% | 49% | 18% | 5% | 1% |
| 0,194 | 0% | 0% | 0% | 1% | 99% | 0% | 0% | 0,5% | 0,5% | 99% |

Taula 23: Estats de dany de ED01 per les diferents direccions i PGAs¹

5.4.3 Estats de dany per ED02

5.4.3.1 Empenta X-POS

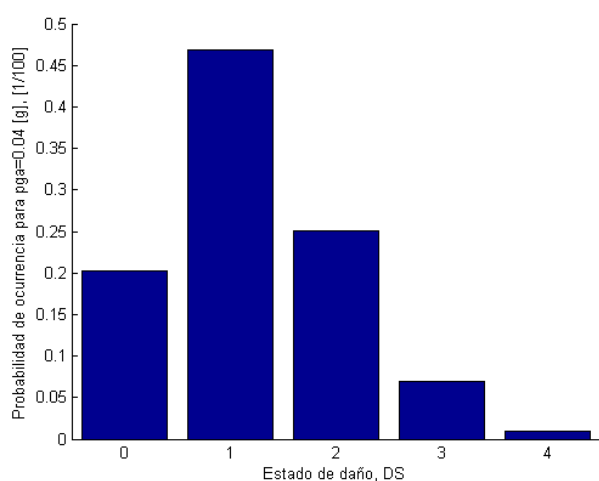


Figura 103: Estats de dany per ED02 sotmès a X-Push amb un PGA=0.040g segons NCSE-02²

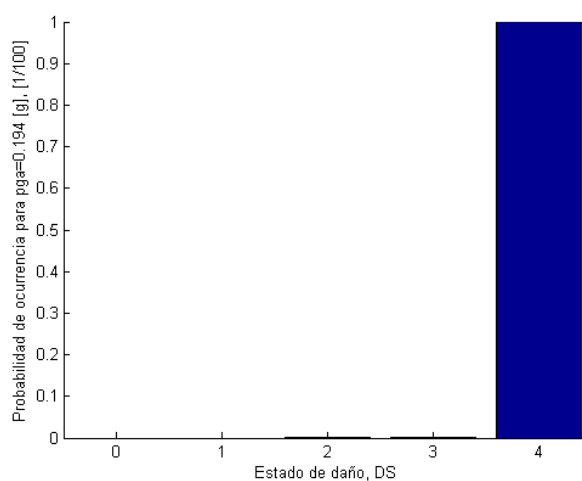


Figura 104: Estats de dany per ED02 sotmès a X-Push amb un PGA=0.194g segons NCSE-02³

¹ Font pròpia

² Font pròpia

³ Font pròpia

5.4.3.2 Empenta Y-POS

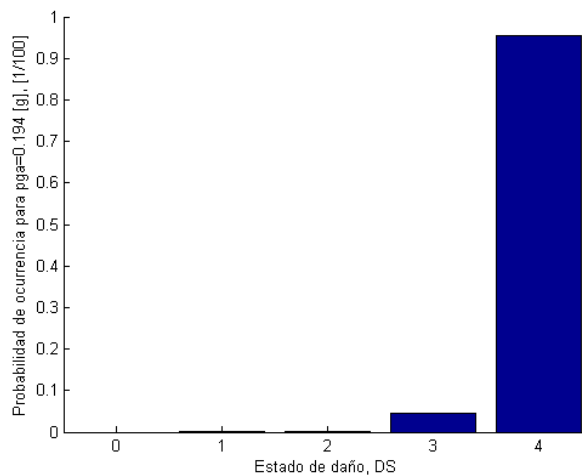
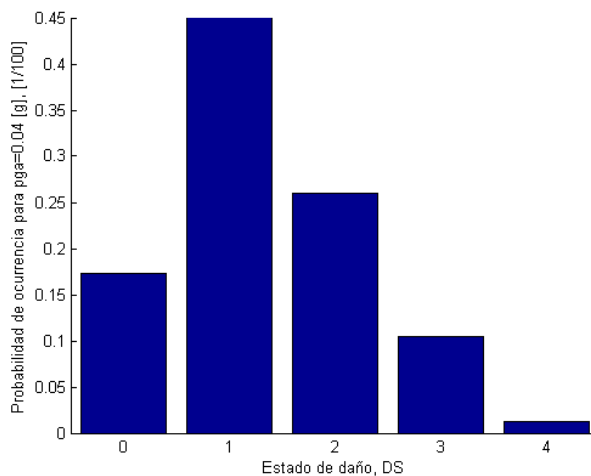


Figura 105: Estats de dany per ED02 sotmès a Y-Push amb un PGA=0.040g segons NCSE-02¹

Figura 106: Estats de dany per ED02 sotmès a Y-Push amb un PGA=0.194g segons NCSE-02²

| PGA [g] | X-POS | | | | | Y-POS | | | | |
|---------|-------|-----|------|------|-----|-------|------|------|-----|-----|
| | Sd0 | Sd1 | Sd2 | Sd3 | Sd4 | Sd0 | Sd1 | Sd2 | Sd3 | Sd4 |
| 0,04 | 20% | 47% | 25% | 6% | 2% | 17% | 44% | 26% | 11% | 2% |
| 0,194 | 0% | 0% | 0,5% | 0,5% | 99% | 0% | 0,5% | 0,5% | 5% | 94% |

Taula 24: Estats de dany de ED02 per les diferents direccions i PGAs³

¹ Font pròpia

² Font pròpia

³ Font pròpia

5.5 Índex de dany

Seguidament els diferents estats de dany per els diferents edificis i empentes amb el resum de resultats en taules.

La franja vermella més elevada fa referència a l'índex de dany per un PGA de 0,194g (Segon desplaçament espectral) mentre que la més baixa fa referència a l'índex de dany corresponent a un PGA de 0,04g (primer desplaçament espectral) tal com estipula la NCSE-02.

5.5.1 Índex de dany per ED01-ED02-ED01

5.5.1.1 Empenta X-POS

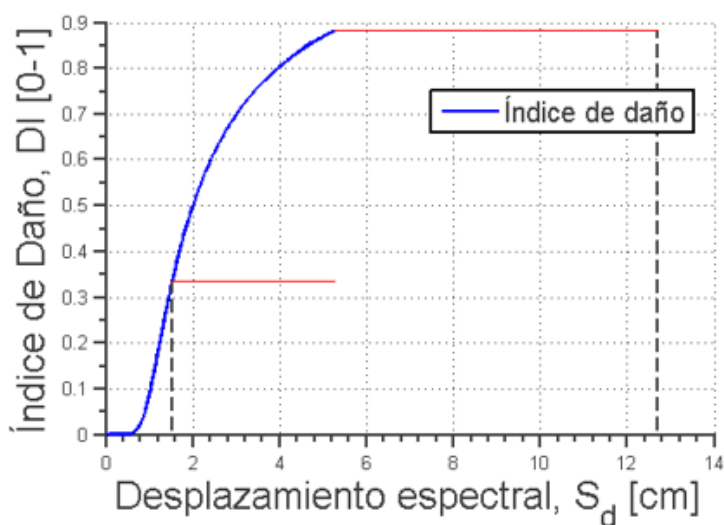


Figura 107: Índex de dany X-Push per cada desplaçament espectral del agregat segons NCSE-02¹

¹ Font pròpia

5.5.1.2 Empenta Y-POS

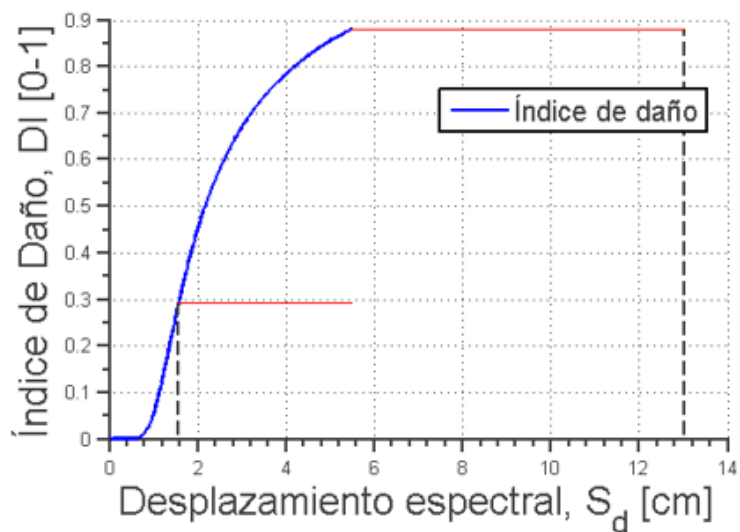


Figura 108: Índex de dany Y-Push per cada desplaçament espectral del agregat segons NCSE-02¹

| PGA [g] | X-POS | Y-POS | X-NEG | Y-NEG |
|---------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | Damage Index | Damage Index | Damage Index | Damage Index |
| 0,04 | 33% | 29% | 35% | 35% |
| 0,194 | 88% | 87% | 88% | 89% |

Taula 25: Índex de danys per ED01-02-01 pels diferents PGAs i direccions²

¹ Font pròpia

² Font pròpia

5.5.2 Índex de dany per ED01

5.5.2.1 Empenta X-POS

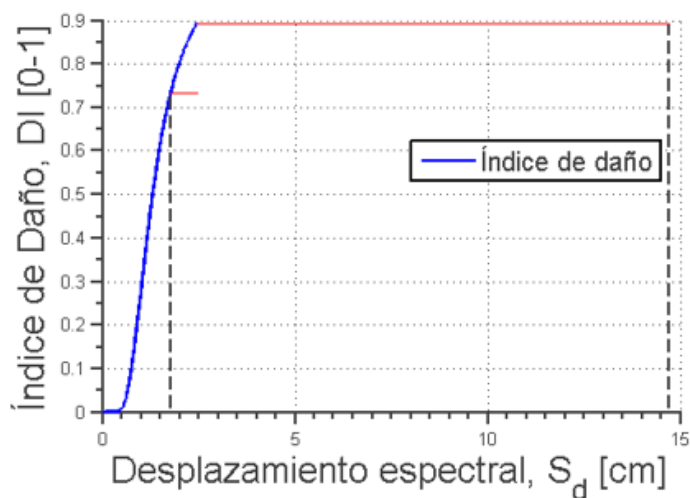


Figura 109: Índex de dany X-Push per cada desplaçament espectral del ED01 segons NCSE-02¹

5.5.2.2 Empenta Y-POS



Figura 110: Índex de dany Y-Push per cada desplaçament espectral del ED01 segons NCSE-02²

| PGA [g] | X-POS | Y-POS | X-NEG | Y-NEG |
|---------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | Damage Index | Damage Index | Damage Index | Damage Index |
| 0,04 | 74% | 25% | 80% | 28% |
| 0,194 | 89% | 90% | 91% | 87% |

Taula 26: Índex de danys per ED01 pels diferents PGAs i direccions³

¹ Font pròpia

² Font pròpia

³ Font pròpia

5.5.3 Índex de dany per ED02

5.5.3.1 Empenta X-POS



Figura 111: Índex de dany X-Push per cada desplaçament espectral del ED02 segons NCSE-02¹

5.5.3.2 Empenta Y-POS

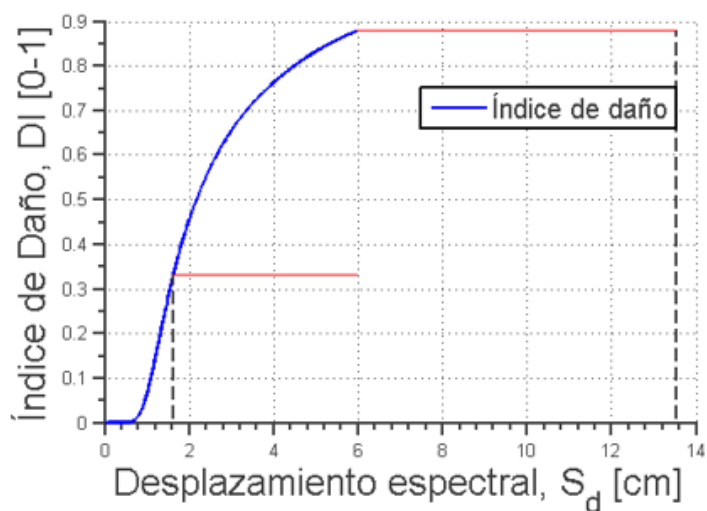


Figura 112: Índex de dany X-Push per cada desplaçament espectral del ED02 segons NCSE-02²

| PGA [g] | X-POS | Y-POS | X-NEG | Y-NEG |
|---------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | Damage Index | Damage Index | Damage Index | Damage Index |
| 0,04 | 31% | 34% | 35% | 32% |
| 0,194 | 90% | 88% | 88% | 90% |

Taula 27: Índex de danys per ED02 pels diferents PGAs i direccions³

¹ Font pròpia

² Font pròpia

³ Font pròpia

5.6 Anàlisi modal

5.6.1 Anàlisi modal per ED01-ED02-ED01

| Direcció X | | | |
|------------|---------|-------------------------|--------------------------|
| MODE | T (s) | % Massa desplaçada en X | Kg Massa desplaçada en X |
| Mode 1 | 0,75722 | 87,67 | 3.654.070 |
| Mode 2 | 0,25822 | 8,37 | 348.890 |
| Mode 3 | 0,73898 | 1,21 | 50.456 |
| Direcció Y | | | |
| MODE | T (s) | % Massa desplaçada en Y | Kg Massa desplaçada en Y |
| Mode 1 | 0,73898 | 71,6 | 2.984.202 |
| Mode 2 | 0,24772 | 14,46 | 602.781 |
| Mode 3 | 0,65448 | 3,39 | 141.120 |

Taula 28: Valors modals per al conjunt d'edificis en ambdues direccions per els 3 primers modes de vibració¹

5.6.2 Anàlisi modal per ED01

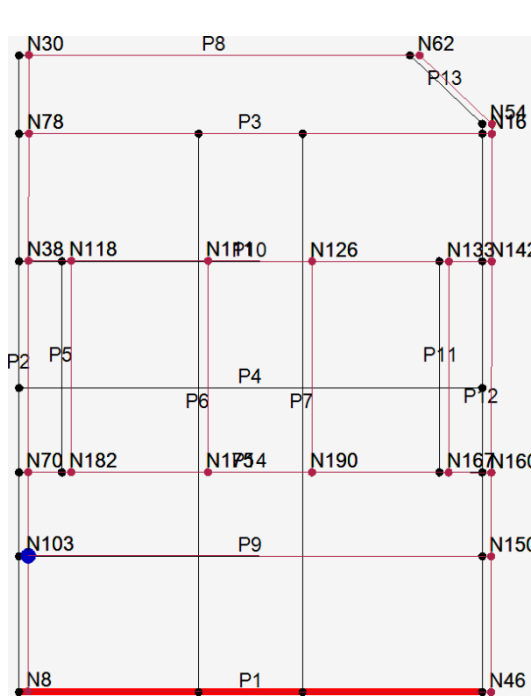


Figura 113: Desplaçaments per Push X+²

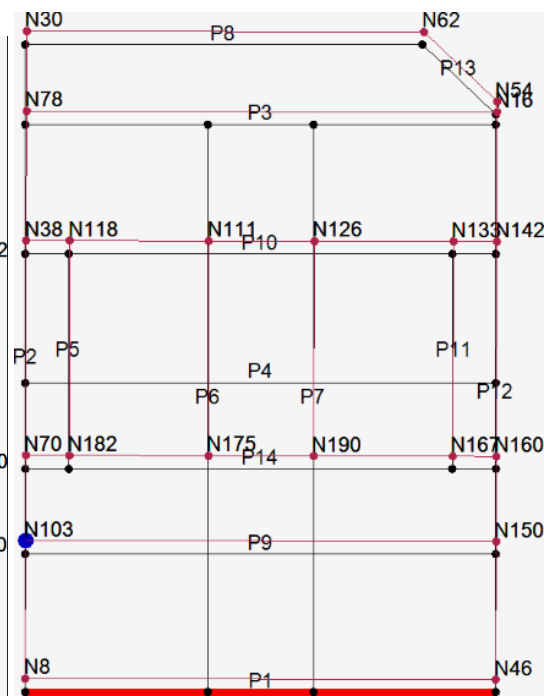


Figura 114: Desplaçaments per Push Y+³

¹ Font pròpia

² Font pròpia

³ Font pròpia

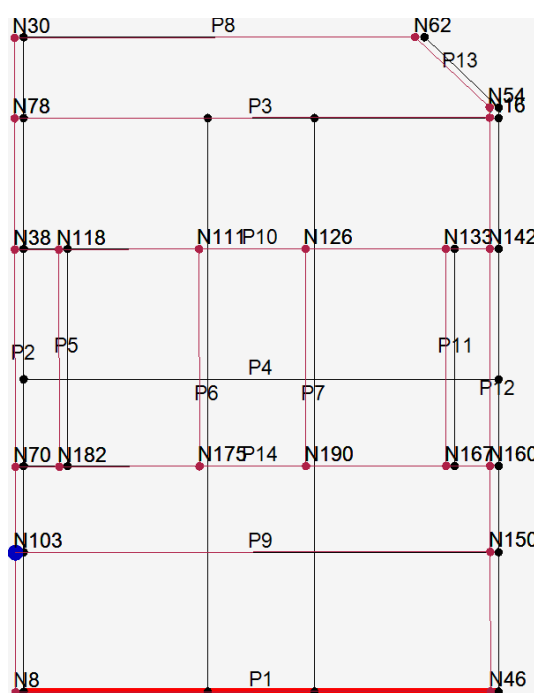


Figura 115: Desplaçaments per Push X-1

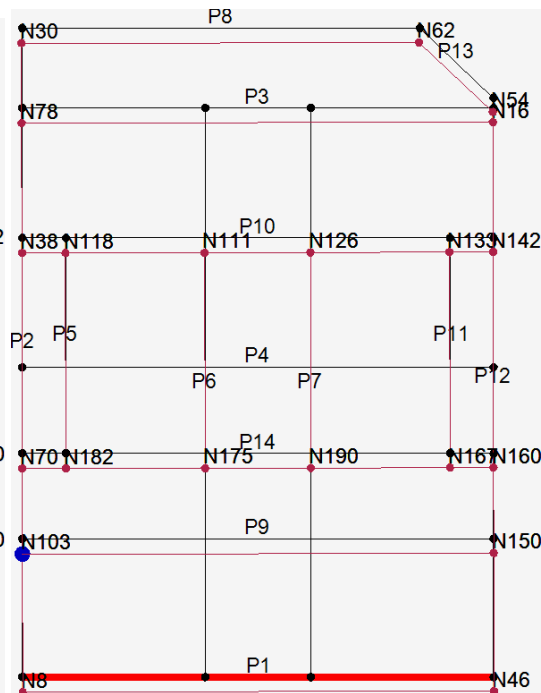


Figura 116: Desplaçaments per Push Y-2

| Direcció X | | | |
|------------|---------|-------------------------|--------------------------|
| MODE | T (s) | % Massa desplaçada en X | Kg Massa desplaçada en X |
| Mode 1 | 0,83801 | 80,21 | 1.065.283 |
| Mode 2 | 0,29093 | 12,03 | 01.713 |
| Mode 3 | 0,6479 | 3,4 | 45.133 |
| Direcció Y | | | |
| MODE | T (s) | % Massa desplaçada en X | Kg Massa desplaçada en Y |
| Mode 1 | 0,69787 | 72,33 | 960.722 |
| Mode 2 | 0,23074 | 14,26 | 189.409 |
| Mode 3 | 0,13492 | 2,32 | 30.801 |

Taula 29: Valors modals per al conjunt d'edificis en ambdues direccions per els 3 primers modes de vibració³

¹ Font pròpia

² Font pròpia

³ Font pròpia

5.6.3 Anàlisi modal per ED02

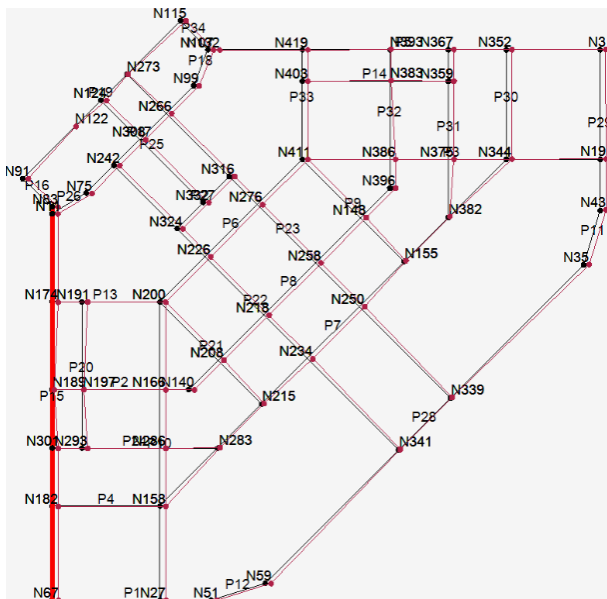


Figura 117: Desplaçaments per Push X+1

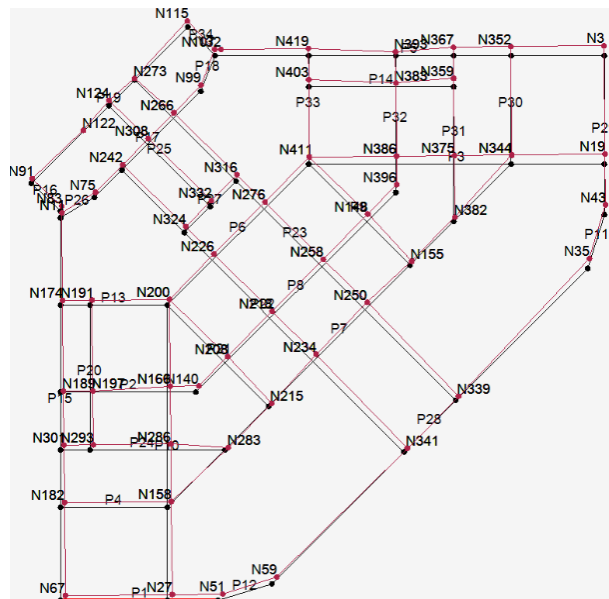


Figura 118: Desplaçaments per Push Y+2

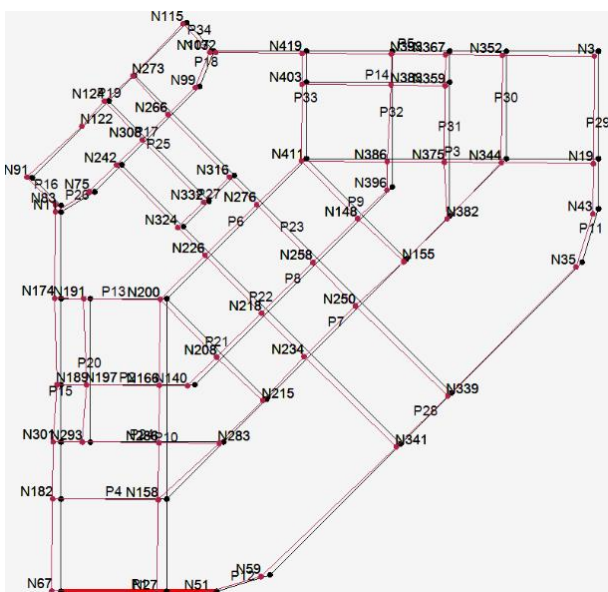


Figura 119: Desplaçaments per Push X-3

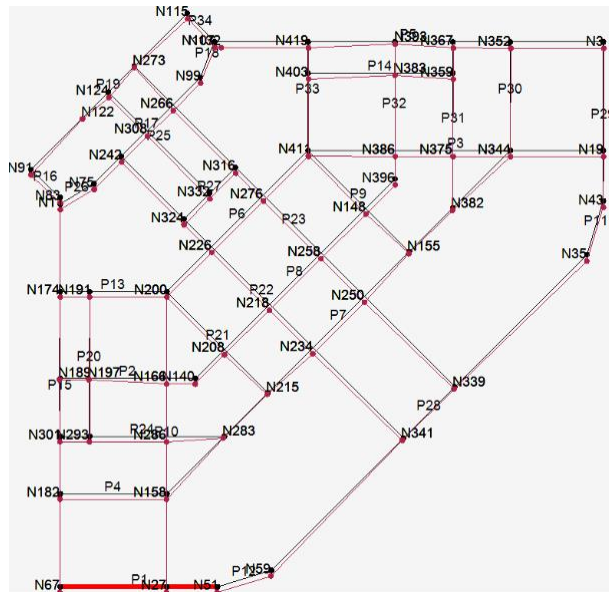


Figura 120: Desplaçaments per Push Y-4

- 1 Font pròpia
- 2 Font pròpia
- 3 Font pròpia
- 4 Font pròpia

| Direcció X | | | |
|-------------------|--------------|--------------------------------|---------------------------------|
| MODE | T (s) | % Massa desplaçada en X | Kg Massa desplaçada en X |
| Mode 1 | 0,82612 | 36,64 | 818.074 |
| Mode 2 | 0,76509 | 34,78 | 776.637 |
| Mode 3 | 0,65224 | 6,9 | 154.165 |
| Direcció Y | | | |
| MODE | T (s) | % Massa desplaçada en Y | Kg Massa desplaçada en Y |
| Mode 1 | 0,76509 | 35,61 | 795.143 |
| Mode 2 | 0,82612 | 33,76 | 753.819 |
| Mode 3 | 0,65224 | 9,01 | 201.222 |

Taula 30: Valors modals per al conjunt d'edificis en ambdues direccions per els 3 primers modes de vibració¹

¹ Font pròpia

5.7 Anàlisi de fragilitat i ductilitat

A continuació s'exposen els resultats de comparar la fragilitat i ductilitat del edifici individual ED02 envers l'agregat en totes les direccions i sentits. Notar que la línia contínua negra fa referència a la capacitat del edifici individual ED02 i que la línia discontinua fa referència al agregat global.

5.7.1 X-POS

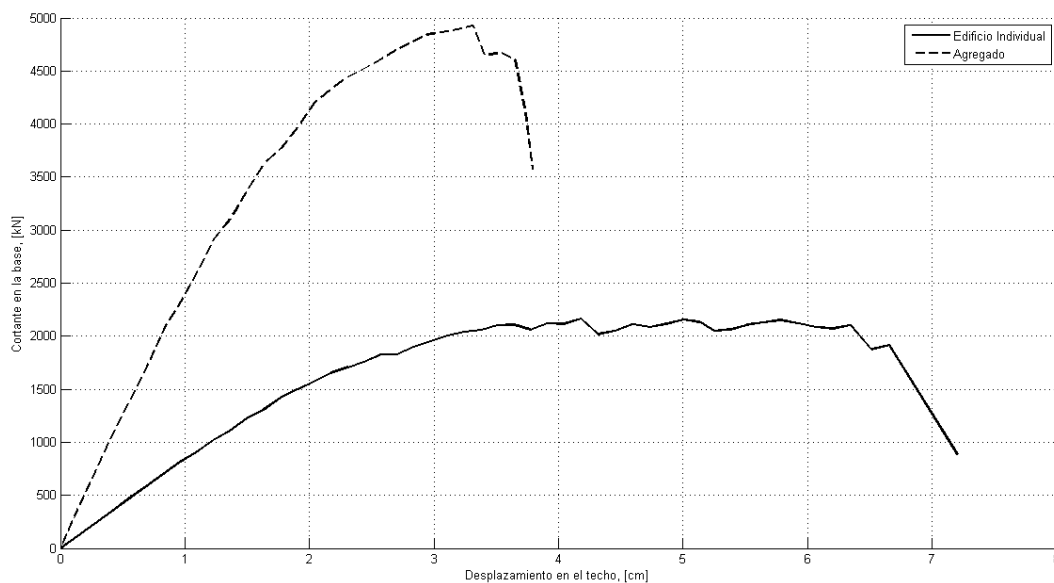


Figura 121: Corbes pushover del ED02 i l'agregat per X-POS¹

¹ Font pròpia

5.7.2 X-NEG

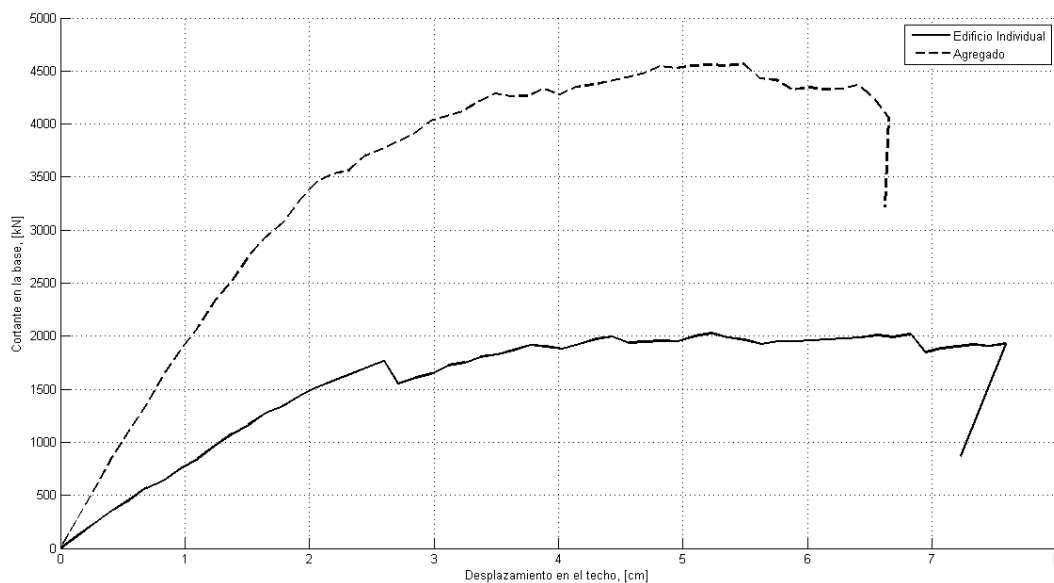


Figura 122: Corbes pushover del ED02 i l'agregat per X-NEG¹

5.7.3 Y-POS

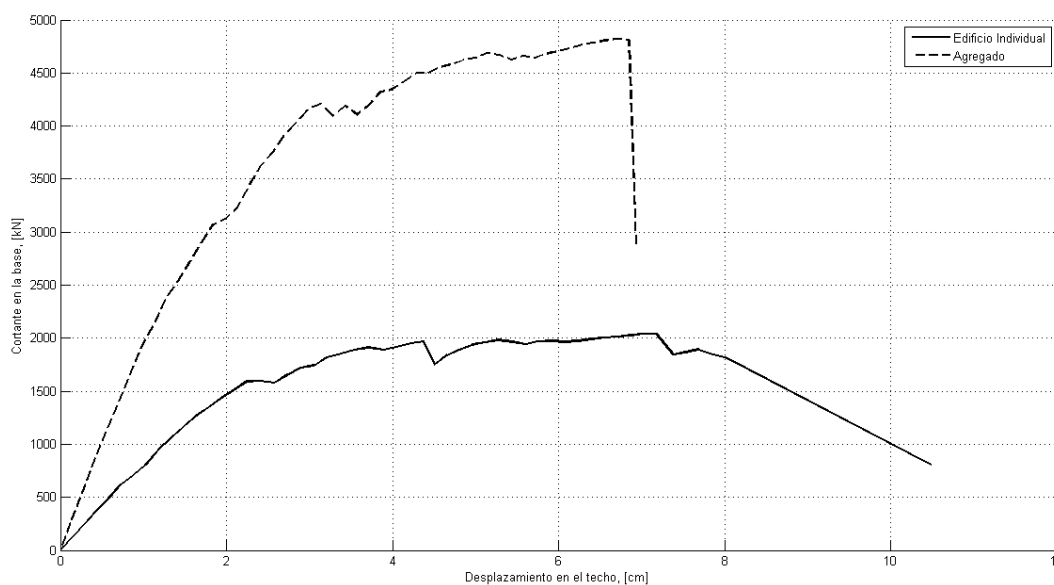


Figura 123: Corbes pushover del ED02 i l'agregat per Y-POS²

¹ Font pròpia

² Font pròpia

5.7.4 Y-NEG

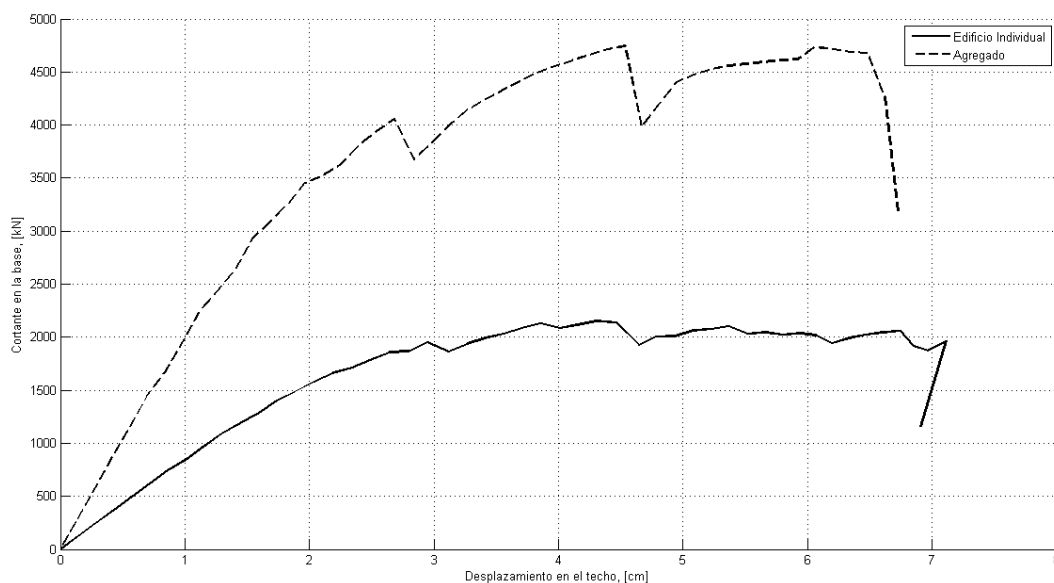


Figura 124: Corbes pushover del ED02 i l'agregat per Y-NEG¹

| | | Pushover | |
|-------|------------|--------------|-------------------|
| | | Tallant [kN] | Desplaçament [cm] |
| X-POS | Individual | 2.000 | 6,8 |
| | Agregat | 4.800 | 3,3 |
| X-NEG | Individual | 1.900 | 7,6 |
| | Agregat | 4.400 | 6,4 |
| Y-POS | Individual | 2.000 | 7,2 |
| | Agregat | 4.700 | 6,9 |
| Y-NEG | Individual | 2.000 | 7,2 |
| | Agregat | 4.700 | 6,5 |

Taula 31: Tallants i desplaçaments del ED02 i l'agregat per totes les direccions i sentits²

¹ Font pròpia

² Realització pròpia

6. Comparativa de les diferents tipologies

A continuació s'exposen tots els resultats de Capacitat, Punt d'acompliment, Fragilitat, Estats i índex de danys, anàlisi modal i anàlisi de fragilitat i ductilitat de les diferents tipologies d'edificis estudiats en diferents taules comparatives.

6.1 Anàlisi estàtic no lineal

A continuació els valors de desplaçament en el sostre i tallant en la base per el punt últim i el tallant màxim per cada edifici, direcció i sentit.

| | Pushover | | | | | |
|------------------------------|----------|-----------|-----------|-----------|------------|-----------|
| | ED01 | | ED02 | | ED01-02-01 | |
| | X-POS | Y-POS | X-POS | Y-POS | X-POS | Y-POS |
| D_{roof} (cm) | 3,72 | 5,38 | 6,66 | 8,01 | 6,68 | 6,85 |
| V_{base} (KN) | 671,570 | 1.340,460 | 1.918,090 | 1.819,700 | 4.541,340 | 4.810,810 |
| Tallant màx. (KN) | 682,760 | 1.431,780 | 2.163,370 | 2.039,040 | 4.721,180 | 4.818,210 |
| | X-NEG | Y-NEG | X-NEG | Y-NEG | X-NEG | Y-NEG |
| D_{roof} (cm) | 3,66 | 6,10 | 7,59 | 7,11 | 6,65 | 6,62 |
| V_{base} (KN) | 569,080 | 1.382,540 | 1.927,340 | 1.963,680 | 4.065,100 | 4.263,770 |
| Tallant màx. (KN) | 692,940 | 1.400,800 | 2.028,130 | 2.151,270 | 4.567,540 | 4.743,540 |

Taula 32: Comparativa de la capacitat de les diferents tipologies d'edifici per la norma NCSE-02¹

Pel primer edifici, ED01, s'observa que l'empenta X (POS, NEG) és la que vulnera més l'edifici, ja que s'observen valors de desplaçament al sostre amb la seva força corresponent molt baixos comparat amb l'empenta Y. Això és degut a que els elements que conformen l'edifici (parets, murs, bigues, llindars...) estan orientades perpendicularment a aquesta càrrega distribuïda aplicada en l'assaig. Notar també que com a edifici aïllat, és el que té menys ductilitat i capacitat resistiva, comparat amb ED02 i amb l'agregat. Amb la fragilitat es confirmarà, ja que és potencialment l'edifici més vulnerable degut també a la seva esveltesa, sobretot des de l'eix X.

Pel segon edifici, ED02, en principi s'haurien de veure valors semblants entre X-POS_Y-NEG i X-NEG_Y-POS per la simetria esmentada en apartats anteriors. veiem però petites desviacions en els desplaçaments tot i que les forces són molt semblants. En quan a edifici aïllat, veiem que és molt més capaç i dúctil que el ED01.

Per l'agregat, s'observen resultats molt semblants ambdues direccions i sentits (en aquest cas també aplica la simetria). En quan a conjunt d'edificis comparat amb el ED01 i ED02, veiem que els resultats de desplaçament es redueixen una mica respecte el ED02 però en canvi augmenta significativament la capacitat. A falta de verificar amb els resultats de la fragilitat, l'agregat presenta una resistència major en comparació a la individualització dels edificis.

¹ Realització pròpia

| | | Performance Point - Sd | | | | | |
|-------|----------|------------------------|---------|--------|---------|------------|---------|
| | | ED01 | | ED02 | | ED01-02-01 | |
| PGA | | 0,04g | 0,194g | 0,04g | 0,194g | 0,04g | 0,194g |
| X-POS | EC-8 | 1,4917 | 7,2347 | 1,3202 | 6,4031 | 1,2859 | 6,2368 |
| | Irizarry | 0,4972 | 2,4116 | 0,4401 | 2,1344 | 0,4286 | 2,0789 |
| | NCSE-02 | 1,7710 | 14,7224 | 1,5674 | 13,0302 | 1,5267 | 12,6917 |
| Y-POS | EC-8 | 1,1418 | 5,5715 | 1,3717 | 6,6526 | 1,3202 | 6,4031 |
| | Irizarry | 0,3829 | 1,8572 | 0,4572 | 2,2175 | 0,4401 | 2,1344 |
| | NCSE-02 | 1,3639 | 11,3380 | 1,6285 | 13,5379 | 1,5674 | 13,0302 |

Taula 33: Comparativa del PP de les diferents tipologies d'edifici per la norma NCSE-02¹

Encara que la normativa que ens incumbeix és la NCSE-02, s'ha volgut comparar el PP amb les altres normatives presentades en el treball. Marcats amb color, els PGAs corresponents a cada normativa. Veiem que al contrari, que els punts d'acompliment que no estan marcats i no estan compresos en la normativa per aquell PGA, són molt distants.

El PGA de 0,04g és el PGA que ens proposa utilitzar la normativa local (i que el EC8 també adoptaria). D'altra banda, el PGA de 0,194g seria el PGA que es proposa a partir dels estudis de micro-zonació de la ciutat. El fet d'utilitzar un PGA major (sense importar l'espectre utilitzat) ens dona resultats (punts d'acompliment) superiors. L'anterior deixa veure clarament la importància de triar correctament el PGA a utilitzar en la zona d'interès ja que els resultats depenen en gran mesura d'això, i per tant els estats de dany aconseguits tendeixen a estats de dany superiors en el cas d'un PGA de 0,194g. D'altra banda, l'ús dels espectres d'una o altra normativa també impacta en els resultats obtinguts per a un mateix PGA (0,04 o 0,194g, respectivament). Es pot observar que la forma espectral proposada per la NCSE-02 dona valors superiors per a un mateix PGA, mentre que els espectres proposats per Irizarry donen valors inferiors per al mateix PGA.

De forma global podem veure que si ens fixem en cada normativa i el seu PGA establert, la norma amb resultats de desplaçaments espectrals més alts són els estudis de micro-zonació d'Irizarry, després la NCSE-02 i la norma amb desplaçaments més baixos és la EC-8. Això ens fa intuir quina norma ens donarà valors més alts o més baixos de fragilitat.

¹ Realització pròpia

A continuació, els punts que defineixen els PPs (desplaçament espectral, acceleració espectral) i període de vibració corresponents referents a la NCSE-02 per un PGA de 0,040g.

| Performance Point NCSE-02 - PGA=0,040g | | | | | | | | | |
|--|---------------------|---------------------|------------------------|---------------------|---------------------|------------------------|---------------------|---------------------|------------------------|
| | ED01 | | | ED02 | | | ED01-02-01 | | |
| | S _d [cm] | S _a [cm] | T _{eq-N2} [s] | S _d [cm] | S _a [cm] | T _{eq-N2} [s] | S _d [cm] | S _a [cm] | T _{eq-N2} [s] |
| Y-POS | 1,7710 | 0,1092 | 0,7472 | 1,5674 | 0,0942 | 0,8717 | 1,5267 | 0,1064 | 0,7730 |
| Y-NEG | 1,3639 | 0,1064 | 0,7734 | 1,6285 | 0,1223 | 0,6690 | 1,5674 | 0,1024 | 0,7953 |
| X-POS | 1,8117 | 0,0920 | 0,8876 | 1,6081 | 0,1037 | 0,7868 | 1,5471 | 0,1078 | 0,7605 |
| X-NEG | 1,3639 | 0,1223 | 0,6708 | 1,5471 | 0,1078 | 0,7648 | 1,4657 | 0,1138 | 0,7231 |

Taula 34: Desplaçaments espectrals i períodes per cada PP ambdues direccions¹

Un altre cop, veiem que l'edifici amb un S_d més elevat és el ED01 en el seu eix X positiu i negatiu. Respecte al ED02 i l'agregat, observem valors molt semblants en totes les direccions i sentits.

¹ Realització pròpia

6.2 Fragilitat

| | | Fragilitat | | | | | |
|------------|-------|------------|--------|--------|--------|--------|---------------------|
| | | Direcció | SL [%] | MO [%] | SE [%] | CO [%] | S _a [cm] |
| ED01 | X-POS | 4 | 24 | 48 | 24 | 1,77 | 0 |
| | X-NEG | 2 | 11 | 50 | 37 | 1,81 | 0 |
| | Y-POS | 51 | 17 | 4 | 1 | 1,36 | 27 |
| | Y-NEG | 47 | 21 | 7 | 1 | 1,36 | 76 |
| ED02 | X-POS | 47 | 25 | 6 | 2 | 1,57 | 20 |
| | X-NEG | 43 | 28 | 11 | 2 | 1,61 | 16 |
| | Y-POS | 44 | 27 | 9 | 2 | 1,63 | 18 |
| | Y-NEG | 46 | 26 | 8 | 1 | 1,55 | 19 |
| ED01-02-01 | X-POS | 45 | 25 | 10 | 2 | 1,53 | 18 |
| | X-NEG | 44 | 27 | 11 | 2 | 1,47 | 16 |
| | Y-POS | 46 | 21 | 8 | 1 | 1,57 | 24 |
| | Y-NEG | 43 | 28 | 11 | 2 | 1,55 | 16 |

Taula 35: Comparativa de la fragilitat de les diferents tipologies d'edifici per la norma NCSE-02¹

En quant a l'estudi de fragilitat basat en la metodologia proposada per Risk-UE, i fixant-nos primer amb el ED01, veiem que és l'edifici més afectat en la direcció X tal i com havíem notat a la taula anterior, degut al seu alt PP en aquesta direcció. S'observa una diferència molt gran entre els dos eixos d'aplicació de la força, sent el seu estat de No-Dany de 0% en l'eix X i de 27 i 76% per l'eix Y.

L'altre punt que havia cridat l'atenció per el seu S_d un pèl elevat, era la direcció Y positiva per el ED02, però veiem resultats de danys molt equiparables en tots els sentits i direccions, i també en l'estat de No-Dany.

En l'agregat, tot i que també s'obtenen resultats de fragilitat ambdues direccions molt semblants, tal i com havíem intuït a la taula anterior, té una fragilitat superior en quan a empenta a l'eix de les X i Y negativa. Això podria ser degut a la influència que li provoca l'edifici ED01 en aquesta direcció per ser la seva cara més dèbil.

¹ Realització pròpia

A continuació la taula dels estats de danys com a alternativa a la representació dels danys:

| Estats de dany | X-POS | | | | | Y-POS | | | | |
|----------------|-------|------|-----|-----|-----|-------|-----|-----|-----|-----|
| | Sd0 | Sd1 | Sd2 | Sd3 | Sd4 | Sd0 | Sd1 | Sd2 | Sd3 | Sd4 |
| ED01 | 0,5% | 3,5% | 23% | 49% | 24% | 27% | 49% | 18% | 5% | 1% |
| ED02 | 20% | 47% | 25% | 6% | 2% | 17% | 44% | 26% | 11% | 2% |
| ED01-02-01 | 18% | 45% | 26% | 10% | 1% | 24% | 46% | 21% | 7% | 2% |
| Estats de dany | X-NEG | | | | | Y-NEG | | | | |
| | Sd0 | Sd1 | Sd2 | Sd3 | Sd4 | Sd0 | Sd1 | Sd2 | Sd3 | Sd4 |
| ED01 | 0,5% | 2,5% | 11% | 49% | 37% | 25% | 45% | 20% | 8% | 2% |
| ED02 | 16% | 43% | 27% | 12% | 2% | 19% | 46% | 26% | 7% | 2% |
| ED01-02-01 | 16% | 44% | 28% | 10% | 2% | 16% | 43% | 27% | 12% | 2% |

Taula 36: Comparativa dels estats de dany de les diferents tipologies d'edifici per la norma NCSE-02¹

Seguidament els índex de danys per cada edifici i direcció. Aquests són els indicadors que ens acabaran de concloure la vulnerabilitat dels edificis:

| | Índex de dany | | | |
|------------|---------------|--------------|--------------|--------------|
| | X-POS | Y-POS | X-NEG | Y-NEG |
| | Damage Index | Damage Index | Damage Index | Damage Index |
| ED01 | 74% | 25% | 80% | 28% |
| ED02 | 31% | 34% | 35% | 32% |
| ED01-02-01 | 33% | 29% | 35% | 35% |

Taula 37: Comparativa del Índex de dany de les diferents tipologies d'edifici per la norma NCSE-02²

Com podem veure, intuït en la taula de PP i confirmat en la de la fragilitat, l'edifici més afectat és el ED01 en l'eix X. Salta a la vista però, que és l'edifici menys afectat en l'eix Y. Tal i com s'ha comentat amb anterioritat, això es degut a la ortogonalitat dels seus elements estructurals, i en aquest cas, on la direcció de la força és perpendiculars a aquests, té una afectació major. També és degut a la esveltesa que presenta l'edifici en l'eix de les X a diferència del seu altre eix.

En quan al ED02, té una afectació semblant en els dos eixos d'empenta. Veiem així, en aquesta taula com es confirma la simetria del edifici amb valors gairebé simètrics (31-32% i 34-35%). Veiem també que comparat amb el ED01, dels dos és l'edifici aïllat amb menys afectació global de danys. Aquí és on es posa de manifest la millor geometria de xamfrà del ED02 on es veu una major estabilitat respecte l'edifici de banda ED01.

Per l'agregat, s'observen valors molt semblants al edifici aïllat ED02 tenint en compte que té inclòs l'edifici ED01 com a llast debilitador.

¹ Realització pròpia

² Realització pròpia

6.3 Anàlisi modal

| Anàlisi Modal | | | | | | | | | | | |
|---------------|--------|-------------|------------|--------|--------|-------------|------------|--------|--------------|-------------|------------|
| Direcció X | | | | | | | | | | | |
| | ED01 | | | | ED02 | | | | ED01 -02 -01 | | |
| MODE | T (s) | Tn Massa | % Massa | MODE | T (s) | Tn Massa | % Massa | MODE | T (s) | Tn Massa | % Massa |
| Mode 1 | 0,8380 | 1.065 | 80,21 | Mode 1 | 0,8261 | 818 | 36,64 | Mode 1 | 0,7572 | 3.654 | 87,67 |
| Mode 2 | 0,2909 | 01 | 12,03 | Mode 2 | 0,7650 | 776 | 34,78 | Mode 2 | 0,2582 | 349 | 8,37 |
| Mode 3 | 0,6479 | 45 | 3,4 | Mode 3 | 0,6522 | 154 | 6,9 | Mode 3 | 0,7389 | 50 | 1,21 |
| Direcció Y | | | | | | | | | | | |
| | ED01 | | | | ED02 | | | | ED01 -02 -01 | | |
| MODE | T (s) | Tn Massa | % Massa | MODE | T (s) | Tn Massa | % Massa | MODE | T (s) | Tn Massa | % Massa |
| Mode 1 | 0,6978 | 960 | 72,33 | Mode 1 | 0,8261 | 753 | 33,76 | Mode 1 | 0,7389 | 2.984 | 71,6 |
| Mode 2 | 0,2307 | 189 | 14,26 | Mode 2 | 0,7650 | 795 | 35,61 | Mode 2 | 0,2477 | 603 | 14,46 |
| Mode 3 | 0,1349 | 30 | 2,32 | Mode 3 | 0,6522 | 201 | 9,01 | Mode 3 | 0,6545 | 141 | 3,39 |

Taula 38: Comparativa dels valors modals de les diferents tipologies d'edifici per la norma NCSE-02¹

En la taula 38, veiem els resultats del anàlisi modal. Primer de tot, i comentat amb anterioritat, s'observa que el primer mode de vibració és el que ens desplaça més quantitat de massa. Això ens confirmaria que el mètode N2 aplicat en aquest treball és vàlid ja que l'aplicació d'aquest mètode és pel primer mode de vibració.

Analitzant cada edifici, veiem que el ED01 en la seva direcció X, tenia uns períodes de vibració de 0,7472 i 0,8876 segons en l'empenta positiva i negativa respectivament. Valors molt propers al primer mode de vibració que correspon a 0,8380 segons. Per aquests resultats, veiem que s'està movent més o menys un 80% de la massa del edifici que correspondria a 1.065 Tones.

Per l'eix Y, el ED01 tenia uns períodes de vibració de 0,7734 i 0,6708 segons respectivament, que queda entre mig del primer mode de vibració (0,6978 segons) per l'eix Y amb una massa desplaçada del 72,33% que correspon a 960 Tones.

L'altre edifici individual, el ED02, amb un període en l'eix X de 0,8717 i 0,7868 segons respectivament, queda molt proper del primer mode de vibració (0,8261 segons), desplaçant un 36,64% de la massa el que representa 818 Tones.

¹ Realització pròpia

Per l'eix Y, conta amb un període de 0,6690 i 0,7648 segons respectivament, que deixa entre mig el segon mode de vibració (0,7650 segons). De la mateixa manera, desplaça un 35,61% de la massa que correspon a 795 Tones també.

Referent a l'agregat, en el seu eix X tenim període de vibració de 0,7730 i 0,7605 segons, molt proper al primer mode de vibració (0,7572 segons) que correspon a un 87,67% de massa desplaçada sent aquesta de 3.654 Tones.

Respecte al eix Y, amb període de vibració de 0,7953 i 0,7231 segons, veiem que està molt proper també al primer mode de vibració de 0,7389 segons, amb una participació del 71,6% de massa corresponent a 2.984 Tones.

Com s'ha vist a la taula d'anàlisi modal, tots els edificis d'estudi els ha recaigut el seu període de vibració en valors molt propers al primer mode. Això ens indica que per un sisme d'aquestes característiques s'estaria movent gairebé la totalitat de la massa del edifici.

Segons la tipologia dels edificis, hem vist que com a edifici individual, ha resultat més capaç i menys fràgil el ED02 comparat amb el ED01 (recordant que el primer correspon al edifici xamfrà i el segon a l'edifici de línia), veient també que ED02 té el moviment de masses més baix i distribuït en els dos eixos. També veiem a la taula, que en l'anàlisi modal, l'agregat surt més perjudicat pels alts valors de moviment màssic que li correspon al seu mode de vibració.

6.4 Anàlisi de fragilitat i ductilitat

| | | Pushover | |
|-------|------------|--------------|-------------------|
| | | Tallant [KN] | Desplaçament [cm] |
| X-POS | Individual | 2.000 | 6,8 |
| | Agregat | 4.800 | 3,3 |
| X-NEG | Individual | 1.900 | 7,6 |
| | Agregat | 4.400 | 6,4 |
| Y-POS | Individual | 2.000 | 7,2 |
| | Agregat | 4.700 | 6,9 |
| Y-NEG | Individual | 2.000 | 7,2 |
| | Agregat | 4.700 | 6,5 |

Taula 399: Tallants i desplaçaments del ED02 i l'agregat per totes les direccions i sentits¹

Com s'observa a la taula, de forma general podem afirmar que agregar l'edifici ED02 li ha proporcionat més fragilitat al conjunt, per tant ha guanyat capacitat però ha perdut desplaçament en el sostre. Això ens indica que davant d'una acció sísmica, l'agregat resistiria molt més al moviment, però quan trenqués ho faria de forma més fràgil o menys dúctil que l'edifici individual ED02.

El desplaçament més crític que patiria l'agregat és en la direcció X positiva, on es veu una reducció de ductilitat significativa (4.800KN amb 3,3cm de desplaçament). Tret d'aquest punt, s'evidencia que l'increment de capacitat per la petita pèrdua de ductilitat li proporciona a l'agregat unes característiques sísmico-resistents més favorables de forma global.

¹ Realització pròpia

7. Conclusions

En la realització d'aquest TFG s'han tret varies conclusions més enllà de la intenció inicial d'aquest treball que era veure com afecten els moviments sísmics a les diferents tipologies d'edificis de l'Eixample; edificis de línia i de xamfrà, regint-nos de la normativa sísmica vigent; la NCSE-02, veient paral·lelament com els afectava si es separaven o s'ajuntaven entre ells. I efectivament es demostra que agregar edificis augmenta la capacitat del conjunt a expenses de perdre ductilitat.

A part d'això, conclouem posant de manifest la importància d'aquests estudis en edificis d'aquestes característiques, els quals representen un percentatge important del parc urbà d'habitatges de la ciutat i de l'Eixample, on molts ja han sobrepassat la seva vida útil i a més, per manca de normativa, no s'havien projectat tenint en compte accions sísmiques.

Referent als edificis implicats, s'han estudiat els resultats d'aplicar forces en un sistema de coordenades X i Y en el seu domini positiu i negatiu. Això ens ha permès veure que el sistema dels 3 edificis guarda una simetria d'on es resulten valors realment propers entre direccions i sentits oposats, que en el nostre cas real d'estudi, podem observar que els edificis adjacents a l'edifici de xamfrà pateixen els mateixos efectes en aplicar les anàlisis en les dues direccions. L'anterior es deu a la simetria que existeix pel que fa al centre de l'edifici de cantonada. Això no seria igual en cas de tenir edificis diferents a cada costat, una cosa que s'esperaria en la majoria de casos, amb la qual cosa hauríem d'observar l'efecte de tenir edificis amb més o menys profunditat, o major nombre d'elements resistents, entre d'altres factors.

A diferència dels edificis centrals d'illa, l'edifici de cantonada té elements (parets, columnes, bigues) amb una alineació diferent de la de les direccions d'anàlisi, pel que la seva resposta es compon de dues components, X i Y, fent que el seu anàlisi i interpretació de resultats no sigui tan directa com en el cas dels altres edificis. Això ens porta a concloure que la direccionalitat de l'anàlisi és un factor important en la resposta estructural, ja que també representaria la direccionalitat de la demanda aplicada. Apuntar així, que en aquest estudi, al realitzar els assajos basant-nos en un sistema coordinat X-Y per aplicar les forces, no s'ha tingut en compte que un sísmic, és una sacsejada brusca que allibera energia en forma d'ones sísmiques en totes direccions. És per això, que aquest estudi només és vàlid per a moviments en aquests dos eixos principals, tot i que aquestes dades extretes ens proporcionen una noció molt propera als resultats d'un hipotètic moviment tel·lúric. Seria d'interès poder realitzar en estudis posteriors, un model girat a 45 graus, per determinar la resposta estructural en cas de tenir elements de l'edifici de cantonada alineats amb aquestes direccions d'anàlisi. Idealment, realitzar aquest estudi canviant la direccionalitat 360°, ens donaria la direcció més crítica per a la qual l'edifici tindria la resposta estructural menys òptima.

Com a conclusió afegir fent un punt sobre la importància de seleccionar la demanda sísmica de manera correcta i poder simular els efectes d'un terratrèmol de la manera més versemblant possible, ja que com s'ha vist, un factor decisiu per als resultats és el PGA de cada territori depenent de la normativa. En aquest estudi hem aplicat la normativa estatal, on el PGA corresponent és gairebé 5 vegades més petit que el valor obtingut segons estudis de micro-zonació de la ciutat de Barcelona. Això infereix directament en els resultats dels estats de dany possibles a presentar-se en la nostra estructura, pel que una selecció no encertada, comporta una mala interpretació i consegüentment, una presa de accions insuficients o nul·les davant una rehabilitació que podria ser necessària.

8. Anàlisi de l'impacte ambiental

La intenció d'aquest apartat és estudiar l'impacte a nivell ambiental com a conseqüència del funcionament normal o de possibles problemes que sorgissin com averies o accidents que es derivin d'aquest treball.

Donat que aquest treball estudia i valora el risc sísmic en edificis ja construïts, sense intervenir-hi de forma intrusiva, podent causar-li així cap d'any, en aquest apartat es valorarà de quines altres formes s'ha pogut afectar el medi ambient en quan a la realització d'aquest treball.

Com que actualment el Treball de Fi de Grau s'entrega en format digital, no tenim consum de paper com quadrimestres anterior, tot i així, tenim el consum energètic en els dispositius electrònics emprats per la realització del treball, i les seves conseqüents emissions, que normalment es menysprea. A continuació alguns valors per il·lustrar aquest consum:

| Consum d'energia d'un portàtil | | |
|---------------------------------------|---------------------|--------------|
| Potència PC portàtil: | 73,44 | W |
| Temps de realització: | 360,00 | h |
| grams CO₂/KWh | 392,00 ¹ | g/KWh |
| Consum energètic: | 26438,40 | Wh |
| TOTAL: | 26,44 | KWh |
| TOTAL CO₂: | 10.364,48 | g/KWh |

Taula 40: Consum energètic d'un PC portàtil Acer i5-5200U - NVIDIA 820M en la realització d'aquest treball²

Un altre factor que tindrà amb compte pel fet de que passa desapercebut, però considero que ha representat un impacte més important en el medi ambient, és el consum de combustibles fòssils que he gastat tant per reunions o visites de tutoria com per assistir a la biblioteca. Descomptant algun trajecte en cotxe, la gran majoria s'han realitzat en motocicleta i tenint en compte la residència a Teià, aquí alguns valors:

| Consum i Emissions d'una motocicleta 125cc | | |
|---|------------------|-------------------------|
| Consum combustible | 2,90 | L/100Km |
| Emissions CO₂ | 66,00 | g/Km |
| Km's recorreguts | 350,00 | Km |
| TOTAL consum: | 10,15 | L |
| TOTAL emissions: | 23.100,00 | g CO₂ |

Taula 401: Consums i emissions per una HONDA PCX 125 durant el transcurs del treball³

¹ Canviclimatic.gentcat.cat,(18/12/2018).

² Realització pròpia

³ Realització pròpia

9. Pressupost i/o Anàlisi Econòmica

El desenvolupament d'aquest TFG no ha suposat ni implica ningun cost econòmic directe. Tot i així, tenint en compte que és un treball de caire acadèmic i les llicències de software son gratuïtes, podrien sorgir una sèrie de costos que es poden quantificar:

- Autocad: es disposa d'una llicència gratuïta per estudiants, sinó serien 260,15€/mes.
- Matlab: ofereix una versió web que permet no descarregar el software, d'altre banda costaria 800€/any
- 3Muri: tot i que ha estat subministrat per el tutor, 3Muri és un software de pagament sense llicències gratuïtes.
- Honoraris: En el cas hipotètic de la cotització d'aquestes hores, hauríem de considerar les 15 h que es recomanen per crèdit impartit, on un TFG en consta de 24 ECTS.
- Matricula: en el meu cas, formant part d'una família nombrosa
- Benzina: esmentada en apartats anteriors i considerant el cost actual.
- Costos energètics: considerat en apartats anteriors i considerant la cotització actual.

| Concepte | Quantitat | ut. | Preu | ut. | Subtotal |
|-------------------------|-----------|------|----------|--------|-------------------|
| Honoraris d'enginyer | 360 | h | 15,00 € | €/h | 5.400,00 € |
| Subscripció Autocad | - | mes | - | €/mes | - |
| Subscripció Matlab | - | mes | - | €/mes | - |
| Subscripció 3Muri | 3 | mes | 390,00 € | €/mes | 1.170,00 € |
| Matricula Universitària | 24 | ECTS | 22,39 € | €/ECTS | 537,36 € |
| Benzina 95 octns. | 10,15 | L | 1,26 € | €/L | 12,79 € |
| Energia consumida | 26,44 | KWh | 0,15 € | €/KWh | 3,91 € |
| TOTAL | | | | | 7.124,06 € |

Taula 412: Taula de costos de la realització d'aquest treball¹

¹ Realització pròpia

10. Bibliografia

Referenciada:

- Avila-Haro, J. A., R. González-Drigo, Lluís G. Pujades, and Alex H. Barbat. "Probabilistic Seismic Damage Assessment of URM Buildings Based on Incremental Dynamic Analysis." *16th World Conference on Earthquake Engineering*, 2017, 1–13.
<http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84935879495&partnerID=tZOtx3y1>.
- Barbat, L.G. Pujades; A.H. "Estimación de La Vulnerabilidad Sísmica de Las Tipologías Constructivas Más Representativas de Los Edificios de Importancia Especial En Cataluña," 2007.
- Bonett, Ricardo, Alex H Barbat, and Lluís Pujades. "Curvas de Fragilidad Sísmica Para Edificios Tradicionales de Mampostería No Reforzada de Barcelona, España," 2004, 16.
- Casas, Eva Gimeno i, and Francesc Magrinyà i Torner. "La Intervenció de Cerdà En La Construcció de l'Eixample," 1970.
- Castillo, Maria Andrea Martinez. "Evaluación Del Uso de Espectros de Diseño Al Análisis Del Riesgo Sísmico. Aplicación a Barcelona.," 2009.
- Committee, European, F O R Standardization, and Europaisches Komitee F O R Normung. "Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance- Part 1: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings," no. December (1998).
- Fajfar, Peter. "A Nonlinear Analysis Method for Performance Based Seismic Design." *Jazyki Mira, Ural'skiye Jazyki* 16, no. 3 (1996): 90–115. <https://doi.org/10.1193/1.1586128>.
- Fomento, El Ministro De. "NCSE-02," 2002, 35898–967.
- Janira Irizarry Padilla. "An Advanced Approach to Seismic Risk Assessment." *Application to the Cultural Heritage and the Urban System Barcelona. Dpto. Ingeniería Del Terreno, Cartográfica y Geofísica. Barcelona, Spain: Universidad Politécnica de Cataluña*, no. July (2004).
- . "Chapter 4 : Probabilistic Seismic Hazard in the Catalonia Region Using Spectral Values," 2004, 49–66.
- . "Seismic Hazard Assessment for Barcelona," 2004, 1–2.
<https://doi.org/10.1016/j.tetlet.2005.09.146>.
- Javier Muñoz Alvarez. "La Modernidad de Cerdà: Más Allá Del Ensanche," 2009, 225.
<https://doi.org/M-50111-2009>.
- Máca, J;J.A.Avila-Haro. "A COMPARISON BETWEEN METHODOLOGIES IN THE SEISMIC ASSESSMENT OF URM BUILDINGS," 2015, 1–9.
- Mauri, D. José Soteras. "Barcelona y El Plan Cerdà," 1960.
- Ministerio de obras publicas, transporte y medio ambiente. "NCSE-94," 1995.
<http://normativa.itafec.com/obras-de-paso-puentes-estructuras/ES.07.02.005.OM.pdf>.

- Miralles, Manuel Sifón. “Aplicación Del CSM Al Diseño Sísmico Prestacional de Estructuras Aporticadas de Hormigón Armado. Comparación de Los Métodos FEMA EL y N2.” 2016.
- Muñoz, Francesc. “La Razon de La Ciudad: El Plan Cerda.” *Metropolis*, no. 76 (2009).
- Permanyer, Lluís. *L'Eixample, 150 Anys d'Història*. Barcelona: Viena Edicions i Ajuntament de Barcelona., 2008.
- Rosangel Moreno, Ricardo Bonett, Alex Barbat, Lluís Pujades, Andrea Penna, Sergio Lagomarsino. “Evaluación de La Vulnerabilidad Sísmica de Estructuras de Mampostería No Reforzada. Aplicación a Un Edificio de La Zona Del Eixample En Barcelona,” 2003, 146.
- Santa-Maria, Glòria. *Decidir La Ciutat Futura. Barcelona 1859*. Barcelona: Ayuntamiento de Barcelona, 2009.
- Avila-Haro, J. A., R. González-Drigo, Lluís G. Pujades, and Alex H. Barbat. “Probabilistic Seismic Damage Assessment of URM Buildings Based on Incremental Dynamic Analysis.” *16th World Conference on Earthquake Engineering*, 2017, 1–13.
<http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84935879495&partnerID=tZOtx3y1>.
- Barbat, L.G. Pujades; A.H. “Estimación de La Vulnerabilidad Sísmica de Las Tipologías Constructivas Más Representativas de Los Edificios de Importancia Especial En Cataluña,” 2007.
- Bonett, Ricardo, Alex H Barbat, and Lluís Pujades. “Curvas de Fragilidad Sísmica Para Edificios Tradicionales de Mampostería No Reforzada de Barcelona, España,” 2004, 16.
- Casas, Eva Gimeno i, and Francesc Magrinyà i Torner. “La Intervenció de Cerdà En La Construcció de l'Eixample,” 1970.
- Castillo, Maria Andrea Martinez. “Evaluación Del Uso de Espectros de Diseño Al Análisis Del Riesgo Sísmico. Aplicación a Barcelona.” 2009.
- Fajfar, Peter. “A Nonlinear Analysis Method for Performance Based Seismic Design.” *Jazyki Mira, Ural'skije Jazyki* 16, no. 3 (1996): 90–115. <https://doi.org/10.1193/1.1586128>.
- Fomento, El Ministro De. “NCSE-02,” 2002, 35898–967.
- Janira Irizarry Padilla. “Chapter 4 : Probabilistic Seismic Hazard in the Catalonia Region Using Spectral Values,” 2004, 49–66.
- Janira Irizarry Padilla. “Seismic Hazard Assessment for Barcelona,” 2004, 1–2.
<https://doi.org/10.1016/j.tetlet.2005.09.146>.
- Javier Muñoz Alvarez. “La Modernidad de Cerdà: Más Allá Del Ensanche,” 2009, 225.
<https://doi.org/M-50111-2009>.
- Máca, J;J.A.Avila-Haro. “A COMPARISON BETWEEN METHODOLOGIES IN THE SEISMIC ASSESSMENT OF URM BUILDINGS,” 2015, 1–9.
- Mauri, D. José Soteras. “Barcelona y El Plan Cerdá,” 1960.
- Ministerio de obras publicas, transporte y medio ambiente. “NCSE-94,” 1995.
<http://normativa.itafec.com/obras-de-paso-puentes-estructuras/ES.07.02.005.OM.pdf>.
- Miralles, Manuel Sifón. “Aplicación Del CSM Al Diseño Sísmico Prestacional de Estructuras

- Aporticadas de Hormigón Armado. Comparación de Los Métodos FEMA EL y N2.," 2016.
- Muñoz, Francesc. "La Razon de La Ciudad: El Plan Cerda." *Metropolis*, no. 76 (2009).
- Permanyer, Lluís. *L'Eixample, 150 Anys d'Història*. Barcelona: Viena Edicions i Ajuntament de Barcelona., 2008.
- Rosangel Moreno, Ricardo Bonett, Alex Barbat, Lluís Pujades, Andrea Penna, Sergio Lagomarsino. "Evaluación de La Vulnerabilidad Sísmica de Estructuras de Mampostería No Reforzada. Aplicación a Un Edificio de La Zona Del Eixample En Barcelona," 2003, 146.
- Santa-Maria, Glòria. *Decidir La Ciutat Futura. Barcelona 1859*. Barcelona: Ayuntamiento de Barcelona, 2009.

Complementaria:

- AVILA-HARO, J. A., ELSHOURA A. AND MACA J. 2016. Seismic Assessment of Unreinforced Masonry Buildings. *Applied Mechanics and Materials*, Trans Tech Publ.
- BARBAT, A. H., PUJADES, L. G., LANTADA, N. & MORENO, R. 2008. Seismic damage evaluation in urban areas using the capacity spectrum method: application to Barcelona. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 28, 851–865.
- CABRE, A. AND. MUÑOZ, F. 1994. Ildefons Cerdà i la insuportable densitat urbana: algunes consideracions a partir de la cartografia i anàlisi de les estadístiques contingudes a la " Teoria General", Universitat Autònoma de Barcelona, Centre d'Estudis Demogràfics.
- CID, J. 1998. "Zonación sísmica de la ciudad de Barcelona basada en métodos de simulación numérica de efectos locales. PhD. Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Spain.
- CID, J., SUSAGNA T., GOULA X., CHAVARRIA L., FIGUERAS S., FLETA J., CASAS A. AND ROCA A. 2001. "Seismic zonation of Barcelona based on numerical simulation of site effects." *Pure and Applied Geophysics* 158(12): 2559-2577.
- ATC-40 1996. *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings*. California, U.S.A.: California Seismic Safety Commission.
- CORNADÓ, C. (2015). "Comportament mecànic-estructural dels edificis històrics de murs d'obra de fàbrica de maó de l'Eixample de Barcelona."
- DE LUCA, F., IERVOLINO, I. & VAMVATSIKOS, D. 2011. Improving the Static Pushover Analysis in the Italian Seismic Code by Proper Piece-wise-linear Fitting of Capacity Curves. ANIDIS2011 Convention on Seismic Engineering, 2011. Bari, Italy.
- C.S.LL.PP. 2008. Decreto Ministeriale del 14 gennaio 2008. Nuove norme tecniche per le costruzioni. *Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana*, 4 febbraio 2008.
- EUROCODE-8-1. 2004. *Design of Structures for Earthquake Resistance. Part 1: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings*. Comité Européen de Normalisation.
- PARICIO, A. 2001. *Secrets d'un Sistema Constructiu*. Barcelona, España. Edicions UPC.
- PERMANYER, L. AND GALLART R. 1991. *Història de l'Eixample*, Plaza & Janés.
- PERMANYER, L. AND VENTEO D. 2008. *L'Eixample: 150 anys d'història*, Viena.

- PUJADES, L., BARBAT, A., GONZÁLEZ-DRIGO, R. & AVILA-HARO, J. 2012. Seismic Performance of a Block of Buildings Representative of the Typical Construction in the Eixample District in Barcelona (Spain). *Bulletin of Earthquake Engineering*, 331-349.
- SECANELL, R., GOULA X., SUSAGNA T., FLETA J. AND ROCA A. 1998. Analysis of seismic hazard in Catalonia (Spain) through different probabilistic approaches. *Proceedings of the 11th European conference on earthquake engineering*, Ed. Balkema. Paris, France.
- SECANELL, R., GOULA X., SUSAGNA T., FLETA J. AND ROCA A. 2004 . "Seismic hazard zonation of Catalonia, Spain, integrating random uncertainties." *Journal of Seismology* 8(1): 25-40.
- SUSAGNA, T. AND GOULA X. 1999. "Catàleg de sismicitat." *Atlas sísmic de catalunya*. Institut Cartogràfic de Catalunya, Barcelona 1: 436.
- TARRAGÓ, S. 1994. "L'evolució de l'intervies de Cerdà. Tres propostes (1855, 1859, 1863) per la fundació d'una nova ciutat industrial." *CERDÀ. URBS I TERRITORI. UNA VISIÓ DE FUTUR*.
- FEMA-440/ATC-55. 2005. *Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures*. California, U.S.A.: Federal Emergency Management Agency
- GIMENO, E. AND MAGRINYÀ F. 1994. "La intervenció de Cerdà en la construcció de l'Eixample." *Cerdà. Ciudad y territorio. Una visión de futuro*(Editorial Electa y Fundació Catalana per a la Recerca): 167-188.
- PGS-1 1968. *Norma Sismorresistente P.G.S.-1*, Comisión Interministerial de la Presidencia del Gobierno, Decreto 106/1969 de 16 de enero de 1969.
- GONZÁLEZ-DRIGO, R., AVILA-HARO, J., BARBAT, A., PUJADES, L., VARGAS, Y., LAGOMARSINO, S. & CATTARI, S. 2015. Modernist URM buildings of Barcelona. *Seismic Vulnerability and Risk Assessment. International Journal of Architectural Heritage*, 9, 214-230.
- HEREU, P., OLIVERAS J., PARICIO A., RODRÍGUEZ C., ROSSELLÓ M. AND SERRA J. 2014. "El Teixit residencial en la formació de la metròpolis moderna: el cas de Barcelona (1840-1936). Vol. 2, Les operacions de creació d'habitatge dins l'Eixample (1860-1936)."
- IRIZARRY J. 2004 *An advanced approach to seismic risk assessment. Application to the cultural heritage and the urban system pf Barcelona*. PhD. Thesis. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya.
- JONES, T. 1996. "The basics of Brick Kiln Technology." *GATE, GTZ & BASIN*: 39.
- LAGOMARSINO, S., GALASCO, A. & PENNA, A. 2002. Pushover and dynamic analysis of URM buildings by means of a non-linear macro-element model. *International Conference on Earthquake Loss Estimation and Risk Reduction*. Bucharest: RISK-UE project.27
- LANTADA, N. 2007. *Aplicación de Técnicas GIS a Estimación de Riesgos Naturales*. PhD, Universitat Politècnica de Catalunya.
- MILUTINOVIC, Z. V. AND TRENDAFILOSKI G. 2003. "WP4: Vulnerability of current buildings." *RISK-UE project of the EC: an advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to different European towns*.
- NEWMARK NM, HALL WJ 1982 *Earthquake spectra and design*. Engineering monographs on earthquake criteria, structural design, and strong motion records, vol 3. Earthquake Engineering Research Institute, University of California, Berkeley, CA. 8/5
