

TRABAJO DE FIN DE GRADO

Grado en Ingeniería Mecánica

**EFFECTO DE LA VARIABILIDAD DE LAS PROPIEDADES
MECÁNICAS DE LOS MATERIALES EN LA RESPUESTA
ESTRUCTURAL DE EDIFICIOS DE MAMPOSTERÍA NO
REFORZADA**



Memoria

Autor: Ricardo Gracia Madrudejos

Director: Jorge Arturo Ávila Haro

Departamento RMEE

Convocatoria: Junio 2018

Resumen

El distrito de L'Eixample de Barcelona fue construido en su mayor parte entre los años 1860 y 1940. Por esta razón, la gran mayoría de estos edificios, normalmente levantados con mampostería no reforzada, ya han superado su vida útil.

Con el fin de poder estudiar la vulnerabilidad sísmica de este grupo de edificios, el trabajo se ha enfocado en la comparación de dos hipótesis de distribución de las propiedades mecánicas para un mismo edificio característico de la zona.

Para llevar a cabo este trabajo se ha usado el método N2, que compara la capacidad del edificio con la demanda aplicable a la zona en la que se encuentra la estructura. De cara a poder usar este método, se han tenido en cuenta tanto la Normativa de Construcción Sismo-resistente Española (NCSE-02) como el Eurocódigo (EC8), así como los resultados de estudios de microzonación disponibles para el área de interés recogidos en la tesis "*An Advanced Approach to Seismic Risk Assessment. Application to the Cultural Heritage and the Urban System of Barcelona.*" de Janira Irizarry (2004).

El modelado y el procesamiento de resultados de los diversos análisis se han llevado a cabo usando los programas *TreMuri* y *MatLab*, respectivamente. Así mismo, se han definido distintos estados de daño según lo establecido en el documento RISK-UE, con la finalidad de determinar la probabilidad de ocurrencia de los mismos.

Resum

El districte de l'Eixample de Barcelona va ser construït en gran part entre els anys 1860 i 1940. Per aquesta raó, la gran majoria d'aquests edificis, normalment aixecats amb maçoneria no reforçada, ja han superat la seva vida útil.

Amb la finalitat de poder estudiar la vulnerabilitat sísmica d'aquest grup d'edificis, el treball s'ha enfocat en la comparació de dues hipòtesis de distribució de les propietats mecàniques per a un mateix edifici característic de la zona.

Per portar a terme aquest treball s'ha utilitzat el mètode N2, que compara la capacitat de l'edifici amb la demanda aplicable a la zona en la que es troba l'estructura. De cara a poder utilitzar aquest mètode, s'han tingut en compte tant la *Normativa de Construcción Sismo-resistente Española* (NCSE-02) com l'Eurocodi (EC8), així com els resultats d'estudis de microzonació disponibles per a l'àrea d'interès recollits a la tesi "*An Advanced Approach to Seismic Risk Assessment. Application to the Cultural Heritage and the Urban System of Barcelona.*" de Janira Irizarry (2004).

El modelatge i el processament de resultats de diversos anàlisis s'ha dut a terme utilitzant els programes *TreMuri* i *MatLab*, respectivament. Així mateix, s'han definit diferents estats de dany segons està establert al document RISK-UE, amb la finalitat de determinar la probabilitat d'ocurrència dels mateixos.

Abstract

Barcelona's district of *l'Eixample* was mainly built between the years 1860 and 1940. For this reason, the majority of these buildings, usually raised with unreinforced masonry, have already fulfilled their lifespan.

With the purpose of being able to study the seismic vulnerability of this group of buildings, the project is focused on the comparison of two mechanical properties distribution hypothesis. The building used to compare both hypotheses is an example of the architecture of the zone.

To be able to conduct this research project, the N2 method was used. This method compares the capacity of the building with the appropriate demand of the zone in which the structure is. The *Normativa de Construcción Sismo-resistente Española* (NCSE-02) and the Eurocode (EC8) were considered to use this method, alongside with the results of microzonation studies available for the area of interest collected in Janira Irizarry's thesis "*An Advanced Approach to Seismic Risk Assessment. Application to the Cultural Heritage and the Urban System of Barcelona.*" (2004)

Lastly, it should be pointed out that the analysis mentioned before was implemented using the programs *TreMuri* and *MatLab*, respectively. Also, different damage status were defined using the RISK-UE document, with the aim of determining their own occurrence probability.

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a mi familia todo el apoyo que he recibido mientras llevaba a cabo este trabajo y durante la realización de todo el grado.

También quiero dar las gracias a todos y cada uno de mis compañeros y amigos por los momentos que hemos pasado durante estos últimos años en la universidad.

Y por último y más importante para la finalización de este proyecto, a mi tutor y profesor Jorge Ávila. Agradecerle toda la ayuda que me ha proporcionado, toda la información sin la cual no habría podido hacer este trabajo y todas las horas que ha dedicado a reunirse conmigo y al proyecto en sí.

Índice

RESUMEN	3
RESUM	4
ABSTRACT.....	5
AGRADECIMIENTOS.....	6
1. INTRODUCCIÓN.....	9
2. INTRODUCCIÓN HISTÓRICA.....	10
2.1. BARCELONA	10
2.2. PLAN CERDÁ	11
3. MOTIVACIONES.....	15
4. EDIFICIO SELECCIONADO.....	18
4.1. INFORMACIÓN GENERAL.....	18
4.2. MUROS Y APERTURAS	19
4.3. FORJADOS.....	20
5. NORMATIVAS DE LA ZONA A ESTUDIAR	22
6. METODOLOGÍA	25
6.1. MÉTODO ESTÁTICO NO LINEAL (N2).....	25
6.2. <i>TREMURI</i>	25
6.3. CAPACIDAD	26
6.4. DEMANDA	29
6.4.1. <i>NCSE-02</i>	30
6.4.2. <i>EC-8</i>	35
6.4.3. <i>Irizarry</i>	38
6.4.4. <i>Comparativa de demandas</i>	42
6.5. DESEMPEÑO.....	44
6.6. ESTADOS DE DAÑO	47
7. CÁLCULOS Y RESULTADOS.....	50
7.1. MODELO 3D	50
7.2. HIPÓTESIS DE ESTUDIO	53
7.2.1. <i>Primera hipótesis</i>	53
7.2.2. <i>Segunda hipótesis</i>	56
7.3. ANÁLISIS MODAL.....	57
7.3.1. <i>Primera hipótesis</i>	57
7.3.2. <i>Segunda hipótesis</i>	58
7.4. ANÁLISIS.....	58
7.4.1. <i>Primera hipótesis</i>	63
7.4.1.1. <i>Análisis 1: dirección X positiva</i>	63
7.4.1.2. <i>Análisis 2: dirección Y positiva</i>	69
7.4.1.3. <i>Análisis 3: dirección Y negativa</i>	72

7.4.2. Segunda hipótesis	75
7.4.2.1. Análisis 4: dirección X positiva.....	75
7.4.2.2. Análisis 5: dirección Y positiva.....	78
7.4.2.3. Análisis 6: dirección Y negativa	81
7.5. ESTADOS DE DAÑO	84
7.5.1. Primera hipótesis.....	84
7.5.1.1. Análisis 1: dirección X positiva.....	84
7.5.1.2. Análisis 2: dirección Y positiva.....	84
7.5.1.3. Análisis 3: dirección Y negativa	85
7.5.2. Segunda hipótesis	85
7.5.2.1. Análisis 4: dirección X positiva.....	85
7.5.2.2. Análisis 5: dirección Y positiva.....	86
7.5.2.3. Análisis 6: dirección Y negativa	86
7.6. COMPARATIVA DE RESULTADOS	86
7.6.1. Análisis modal	86
7.6.1. Análisis	87
8. CONCLUSIONES	89
9. PRESUPUESTO	92
BIBLIOGRAFÍA	93
LISTA DE FIGURAS	95
LISTA DE TABLAS	99

1. Introducción

Un sismo, o seísmo, es una sacudida violenta de la corteza y manto terrestre, ocasionada por fuerzas que actúan en el interior de la tierra (RAE, 2018). Estas sacudidas, dependiendo de su magnitud y su zona de acción, pueden llegar a ocasionar grandes destrozos. Los riesgos en los que incurre una zona al producirse un sismo, no son solamente físicos, sino también económicos, sociales y ambientales. Estas fuerzas que actúan en el interior de la tierra son la razón por la cual este fenómeno está siempre incluido entre los denominados desastres o fenómenos naturales. El ser humano poco puede hacer para evitar que éstos ocurran, pero en lo que sí que puede hacer hincapié es en intentar que dejen de ser llamados desastres y pasen a llamarse solamente fenómenos naturales.

Con este fin, este trabajo está orientado a poder determinar la vulnerabilidad sísmica de un edificio ante una determinada demanda. Esto se logra mediante la evaluación estructural del edificio ante una demanda plausible, permitiendo así identificar su desempeño, elementos más demandados y por tanto las líneas de actuación a seguir para su rehabilitación o refuerzo estructural. El proyecto está centrado en el distrito de L'Eixample de Barcelona, uno de los más icónicos de la ciudad y, a su vez, el más normalizado. Este hecho siempre ha sido muy útil para los ingenieros que se dedican a discernir si los edificios son habitables o no, ya que al tener una estructura muy similar, las diferencias entre los cálculos de unos y otros no presentan grandes cambios.

Los estudios y cálculos de los cuales se hablará más adelante, tienen como finalidad comparar la capacidad estructural del edificio con la demanda que podría presentarse en dicho emplazamiento, y así cuantificar su respuesta estructural. Esta demanda a la que se hace referencia es dependiente del tipo de terreno y se ha de considerar dentro del marco de normativas como el Eurocódigo (EC) o la Norma de Construcción Sismorresistente (NCSE). La capacidad de la estructura, por otra parte, se calcula a partir de un modelo que toma en cuenta las propiedades mecánicas de los materiales usados y su disposición.

Para poder estudiar el efecto de la variabilidad de las propiedades mecánicas de los materiales en la respuesta estructural de edificios de mampostería no reforzada se obtendrá la respuesta estructural de la estructura de interés cambiando las propiedades mecánicas de sus materiales, haciendo una comparativa con la respuesta obtenida al mantener dichas propiedades constantes. Este procedimiento será útil para poder comparar las variaciones en la respuesta estructural de las diferentes variantes y así poder extraer las conclusiones necesarias.

2. Introducción histórica

2.1. Barcelona

La Barcelona de principios del siglo XIX era una ciudad con una situación social y sanitaria asfixiante y con un crecimiento que se hacía insostenible debido a la imposibilidad de expansión por culpa de la muralla y las leyes que la consideraban “plaza militar fuerte”.

El interior de la muralla de 6 kilómetros que rodeaba la ciudad tenía una superficie ligeramente superior a los 6 millones de metros cuadrados, de los cuales el 40% estaba ocupado por cuarteles, hospitales, iglesias, etc. Esta superficie acogía en 1818 a 83.000 habitantes, pero el crecimiento era tan grande que en 1850 llegó hasta los 187.000 habitantes. Estos números, sumados a la falta de infraestructuras sanitarias, hacían de Barcelona el lugar ideal para grandes pandemias, que durante esos años se cobraron la vida de decenas de miles de personas. Durante la época, la esperanza de vida de la clase alta era de 36 años y la de la clase baja de 23. (Ayuntamiento de Barcelona, 2009)

Paradójicamente, las murallas estaban rodeadas de un amplio espacio vacío, pero sobre el que, debido a la obsesión por defender la ciudad, recaía la prohibición de levantar cualquier construcción a una distancia de un tiro de cañón (Figura 1). Además de las voces de la ciudadanía en contra de la prohibición de construir fuera de los límites de la muralla, el ayuntamiento, en 1838 mediante la “Junta de Ornato”, pidió una ampliación de la muralla entre la puerta de los Estudios (la Rambla) y el baluarte de Junqueras. Más tarde, en 1841, convocó también un concurso para pedir ideas sobre las ventajas que traería consigo el derribo de las murallas. El premio fue para el médico e higienista Pere Felip Monlau y su “Abajo las murallas!!!”, título que también se haría famoso en los siguientes años como grito reivindicativo (Navascués Palacio, 2000). A éste se le sumó el pensador y teólogo Jaume Balmes, explicando en una serie de artículos las ventajas de una ciudad que no estuviera limitada por barreras artificiales.

Catorce años después, y tras numerosas revueltas (la más famosa fue la que causó el derribo de una parte de la ciudadela y que fue sofocada por el general Espartero desde Montjuic) el ayuntamiento aprobó un proyecto preparado por el secretario Manuel Durán i Bas y firmado por el consistorio al completo con el fin de poder derribar las murallas. Este proyecto finalmente consiguió la aprobación del gobierno progresista, el cual promulgó una Real Orden para destruir todas las murallas de la ciudad a excepción de la muralla mar, el castillo de Montjuic y la Ciudadela.



Figura 1: Parcelario agrícola del llano de Barcelona antes del Plan Cerdà (fuente: www.anycerda.org)

2.2. Plan Cerdà

Tras el derribo de las murallas, el Ministerio de Fomento encargó a Ildefons Cerdà un plano topográfico de todo el llano que cubría desde Barcelona a Gracia y desde Sants hasta Sant Andreu del Palomar, y también un primer estudio del posible ensanche. A finales de 1858 y después de la Real Orden, las competencias sobre la ciudad pasaron a ser de Fomento, ya que se dejó de considerar la ciudad como plaza fuerte y la defensa dejó de ser una prioridad. Tras este traspaso de competencias, en 1859 Cerdà obtuvo la autorización para realizar el proyecto de ensanche, el cual entregó rápidamente ya que llevaba trabajando en él los cinco años anteriores. Entretanto, el Ayuntamiento de Barcelona convocó un concurso para la urbanización de la zona exterior y comenzó un pulso de instituciones en el cual ninguna de ellas se mostraba dispuesta a ceder. El 7 de Junio de 1859, el Ministerio aprobó el plan realizado por Cerdà mediante una Real Orden. El Ayuntamiento, contrariamente, declaró vencedor del concurso al arquitecto Antoni Rovira i Trias y el Consistorio empezó a presionar al Gobierno para que este plan sustituyese al de Cerdà. Tras presentar el Ayuntamiento este proyecto, como cuenta De Terán en su artículo “El caso del plan Cerdà”: *la prensa se hizo clamoroso eco, alineada contra Cerdà, que fue objeto de cruel maltrato, quedando muy clara la general preferencia pública, política y también profesional, por el trabajo de Rovira*. Sin embargo, el 31 de mayo de 1860, el Ministerio hizo caso omiso a las críticas locales y zanjó la cuestión mediante un Real Decreto por el cual aprobaba definitivamente el proyecto del ingeniero Cerdà (Figura 2). De esta manera, el Gobierno antepuso el progresismo de dicho proyecto al modelo radiocéntrico y conservador de Antoni Rovira (Figura 3) (de Terán, 2014).



Figura 2: Plano del proyecto de Ildefonso Cerdà i Sunyer. (Tomada de Cerdà, 1859 | Fuente: MUHBA)



Figura 3: Plano del proyecto de Antoni Rovira i Trias. (Tomada de Rovira, 1859 | Fuente: MUHBA)

Al ser estudiado hoy en día, queda claro que fue un proyecto pionero en la evolución del urbanismo moderno. Este urbanismo tan homogéneo de Cerdà se justifica con su búsqueda de la igualdad. Con el fin de igualar el valor de los diferentes hábitats, diseñó la ciudad para que no existieran unas vías más cómodas que otras ya que tanto si se circula por una vía como si se hace por sus transversales, los cruces entre ellas se encuentran a la misma distancia.

La estructura hipodámica inicial preveía una anchura de calles de 20 metros, en un ensanche ilimitado que permitía alterarlo cuando conviniese. Solamente en casos especiales como la Gran Vía o el Paseo San Juan se permitía una anchura mayor. Sobre el trazado desplegado a partir de la Gran Vía de las Cortes Catalanas, el ingeniero agrupó las manzanas en “distritos” de 10 por 10, en cada uno de los cuáles dejó espacios para centros sociales tales como mercados, iglesias, escuelas, etc. La distribución uniforme de equipamientos en barrios y distritos

plasman otra vez más, la igualdad que buscaba (Padrés Creixell & Vela Parés, 1976). Otros dos aspectos, no menos importantes de la planificación, eran: la orientación de las calles, paralelas y perpendiculares al mar, para asegurar que todas las viviendas recibieran la luz solar a lo largo del día, y los chaflanes en todas las manzanas, para facilitar la visibilidad en los cruces. En lo que respecta a las infraestructuras, diseñó un sistema subterráneo para la recolección de las aguas e integró en la trama viaria la comunicación por ferrocarril.

En el proyecto inicial, la cuadrícula no debía ser corrompida de ninguna manera para la creación de espacios verdes o parques, estos se debían encontrar en el interior de las manzanas ya que solamente dos lados de estas debían ser edificadas. Cerdà pensó que estos “patios interiores” debían ser espacios de uso común para todos los ciudadanos. En su planificación, también estaba previsto que en las aceras se plantara un árbol cada 8 metros y que estos fueran Plátanos de sombra, ya que según sus estudios, eran la mejor elección para adaptarse a la ciudad. Los edificios que se debían construir en dos de los cuatro lados de la manzana no debían superar nunca los 16 metros ni los 14 metros de espesor, estas normas, al igual que la anchura y orientación de las calles, perseguían una ventilación e iluminación perfecta para las viviendas, todas ellas con vistas a la fachada anterior y posterior del edificio.

Debido al carácter antiautoritario, antijerárquico, igualitario y racionalista del Plan Cerdà, la burguesía barcelonesa, encontró en un pueblo descontento por la imposición desde Madrid del proyecto, el aliado perfecto para la actividad especulativa. Esta oposición a Cerdà permitió a los inversores demandar más suelo edificable, edificios más altos e incluso la ocupación de los “patios interiores” para fines empresariales o industriales (Figura 4). Así pues, a raíz de las grandes inversiones realizadas en la década de 1870 (“fiebre del oro”), durante la vuelta de los indianos y antes de la Exposición Universal de 1888, la ciudad integró en 1897 los municipios de Sants, Les Corts, Sant Gervasi, Gracia, Sant Andreu y Sant Martí, y se convirtió en lo que es hoy Barcelona.

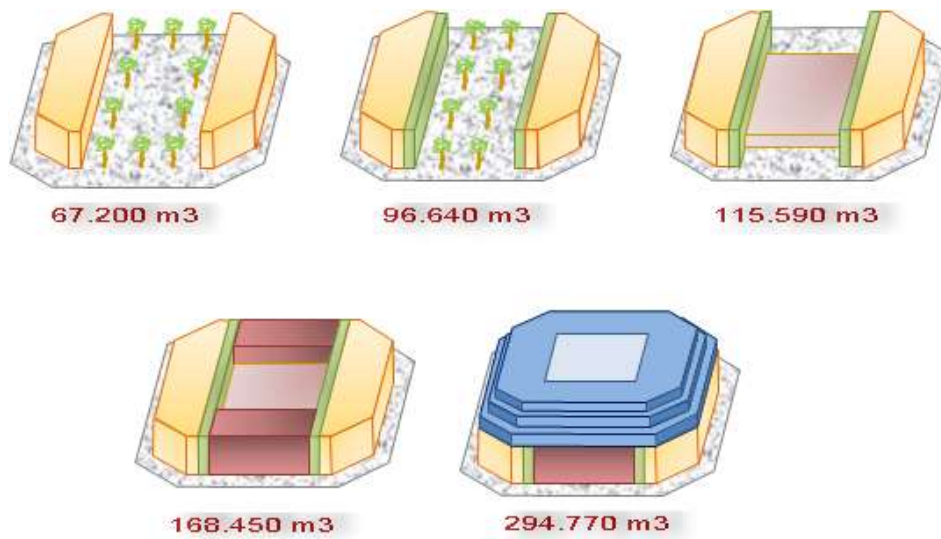


Figura 4: Evolución de la manzana tipo del Eixample y de su espacio construido aproximado. (Tomada de Dalmau Salvia, 1972)

3. Motivaciones

El Eixample fue construido en su mayor parte entre los años 1860 y 1940 (Figura 5). Sus estructuras, que solían tener entre cuatro y seis alturas, estaban diseñadas únicamente a carga vertical y sin consideraciones sismo-resistentes debido a que casi todos los diseños son anteriores a la primera normativa de diseño sismo-resistente en España (PGS-1, 1968) (Blázquez Martínez, 1997). Este hecho, además de otros que se pueden ver a simple vista, como las plantas bajas de alturas superiores al resto y el uso en éstas de vigas y pilares metálicos, dejan entrever que la vulnerabilidad sísmica de estos edificios puede ser bastante alta (Penna, Lagomarsino, Moreno, Bonett, Pujades, & Barbat, 2003).

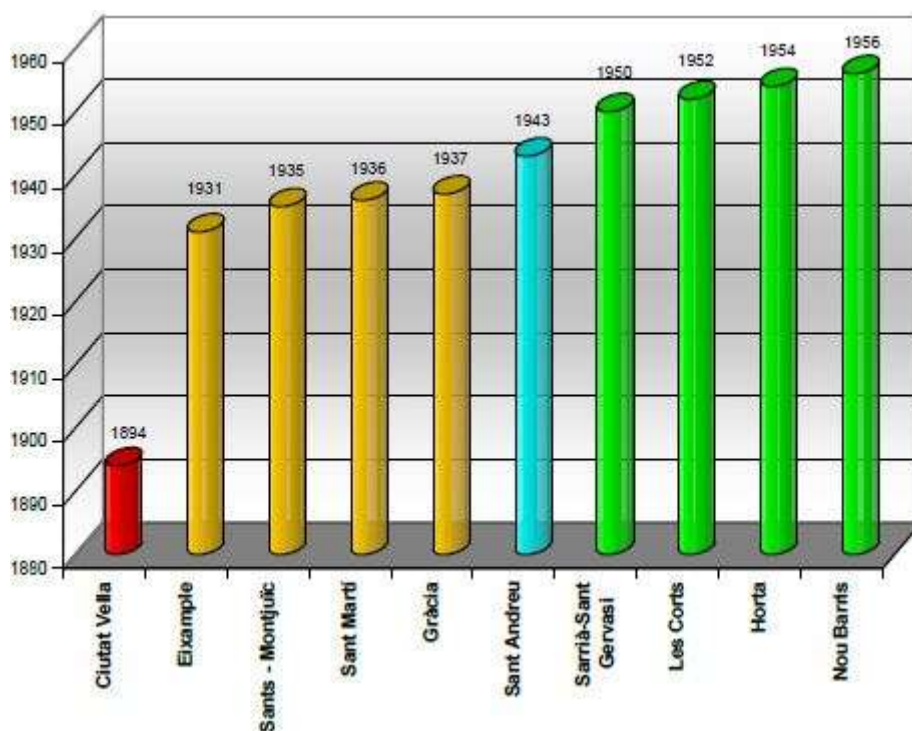


Figura 5: Año de construcción medio de los edificios por ciudad en Barcelona (Fuente: Lantada, 2007)

Otro factor que influye de manera considerable en la resistencia de un edificio son las características de sus materiales. La cerámica fue uno de los componentes más utilizado durante este periodo en la construcción y éste es un material que suele tener una variabilidad muy grande en cuanto a calidad y resistencia. Los ladrillos, que se usaban en los edificios del Eixample tanto para paredes, como escaleras o techos, podían tener unas características mecánicas muy distintas entre ellos debido a las siguientes variables:

- El tipo de horno que se usara: antes de 1925, la dispersión en éstos era enorme, las piezas en una misma hornada podían resultar quemadas o poco cocidas. A partir de 1918 se implantaron los hornos tipo Hoffman, que aumentaban un poco la

uniformidad de las piezas, pero no fue hasta después de este periodo que se empezaron a usar los túneles de cocción que se usan hoy en día.

- El proceso de obtención: durante la época de la construcción del Eixample, se empiezan a mecanizar los tejares. Estos cambios mejoraban cosas como la compactación de las piezas, que disminuía la porosidad, o los perfiles de los ladrillos, los cuales conseguían una mayor homogeneidad en la cocción y una mayor ligereza. (Paricio Casademunt, 2001)

Teniendo en cuenta que la gran mayoría de edificios del plan Cerdà han cumplido ya su vida útil y que la construcción se hizo, en su mayoría, con mampostería de ladrillo no reforzada, con viguetas de madera, acero u hormigón armado, y con bovedillas de cerámica u hormigón, es evidente la necesidad de analizar esta tipología constructiva. Con este fin se ha intentado escoger un edificio que se asemejara lo máximo posible a los estándares principales de construcción del Plan Cerdà (Figura 6).

Además, el hecho de escoger un edificio que se asemeje a los estándares principales puede dar mucha información acerca del parque de viviendas de Barcelona, ya que este tipo de edificios construidos antes de la existencia de la primera norma sismo-resistente supone un 78,9 % del total en la ciudad de Barcelona (Lantada, H. Barbat, & G. Pujades, 2008).



Figura 6: Edificio a analizar (Fuente propia, 2018)

4. Edificio seleccionado

4.1. Información general

El edificio seleccionado para el estudio (de ahora en adelante, E-01) se encuentra situado en el barrio de l'Antiga Esquerra de l'Eixample y fue construido en el año 1930 según el catastro. La estructura tiene una altura total de 24,5 metros dividida en una planta baja de 4 metros de altura, cinco pisos de 3,2 metros y un último piso superior de 3,1 metros. La planta del edificio mide 16 metros de ancho y 31,5 metros de largo, de los cuales, los últimos 3,5 constituyen la galería de la fachada interior. La planta baja tiene una altura superior debido a su utilización como comercio, almacén e incluso a veces como taller o fábrica, usos que requieren de espacios más grandes y diáfanos, los cuales se han resuelto mediante vigas y columnas metálicas, lo que la diferencia del resto de plantas. Como se mencionó anteriormente, el material constructivo predominante en las distintas plantas consiste en mampostería no reforzada.

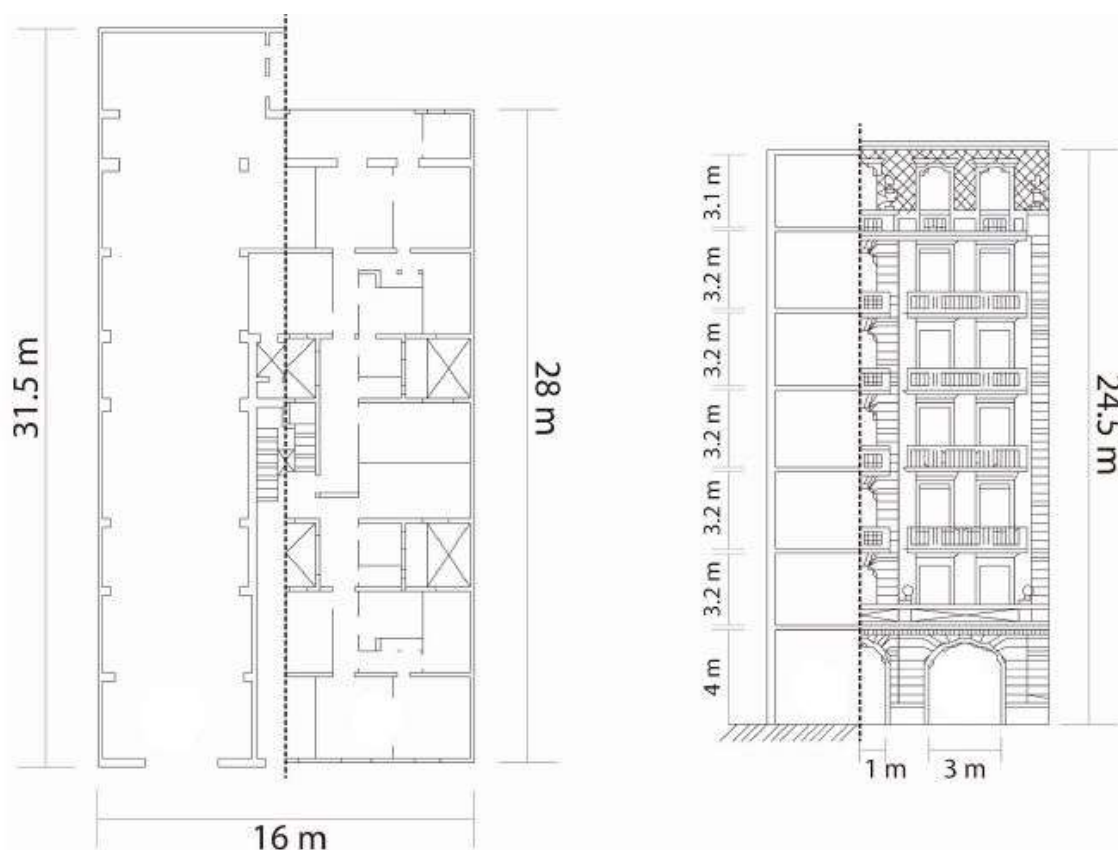


Figura 7: Plano de un edificio de las mismas características que el escogido (modificado de Gonzalez-Drigo et al., 2016)

4.2. Muros y aperturas

Los muros de las fachadas son de mampostería no reforzada y tienen un espesor de 0,45 metros para la planta baja y de 0,30 metros para el resto de plantas. A su vez, las paredes medianeras (Figura 8), también de ladrillo, tienen un espesor de 15 centímetros, igual que el resto de muros portantes. Los tabiques y muros sin capacidades estructurales tienen un espesor de 10 centímetros o incluso inferior. Las aperturas en las fachadas, tanto para puertas como para ventanas, están salvadas mediante dinteles de acero o madera según la dimensión de la apertura en cuestión y, en algunas ocasiones, con un semi-arco de ladrillo situado unos centímetros por encima del dintel que ayuda a distribuir las cargas hacia los dos lados de la apertura (Figura 9).



Figura 8: Vista exterior de la pared medianera del edificio

Tabla 1: Anchuras de las diferentes paredes del edificio

Nivel	Fachadas [m]	Paredes medianeras [m]	Muros portantes [m]	Tabiques y muros sin capacidades estructurales [m]
1	0,45	0,15	0,30	0,05 – 0,10
2	0,30	0,15	0,15	0,05 – 0,10
3	0,30	0,15	0,15	0,05 – 0,10
4	0,30	0,15	0,15	0,05 – 0,10
5	0,30	0,15	0,15	0,05 – 0,10
6	0,30	0,15	0,15	0,05 – 0,10
7	0,30	0,15	0,15	0,05 – 0,10



Figura 9: Vista exterior del dintel de una apertura de la fachada delantera

4.3. Forjados

Los forjados de este edificio, con un total de 20 centímetros de espesor para todas las plantas, están contruidos mediante viguetas de acero simplemente apoyadas en las distintas paredes de carga y orientadas de manera que la distancia a salvar sea lo más pequeña posible. La distancia entre estas viguetas oscila entre los 70 y los 80 centímetros y entre ellas se encuentran las típicas bovedillas cerámicas sobre las que reposa el mortero de cal y el pavimento del piso superior (Figura 10 y Figura 11).

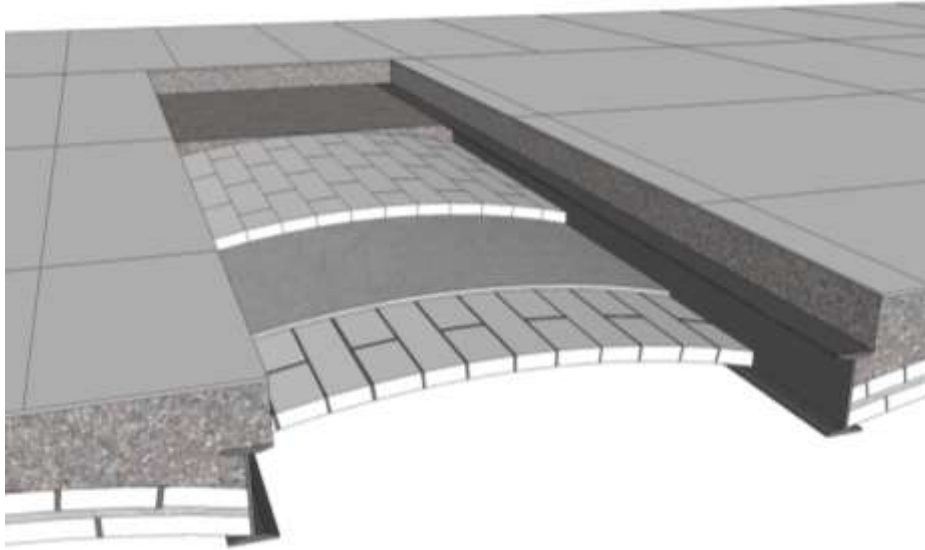


Figura 10: Forjado tipo de un edificio del Eixample



Figura 11: Vista inferior del forjado tipo de un edificio del Eixample

5. Normativas de la zona a estudiar

Debido al aumento de los desastres provocados por terremotos en las zonas urbanas, a partir de la década de los 70 en España se tomó mayor conciencia de lo peligrosos que eran los seísmos para la vida humana. Con el fin de prevenir estos riesgos, en 1995 vio la luz la Directriz Básica de Protección Civil ante el Riesgo Sísmico creada por el Ministerio del Interior, juntamente con la cual se dio el primer paso para la elaboración de mapas de riesgos. Esta directriz establecía los requisitos mínimos que debían y deben cumplir los correspondientes Planes Especiales de Protección Civil de las Comunidades Autónomas cuyo territorio incluyera áreas de peligrosidad sísmica igual o superior a VI en el Mapa de Peligrosidad Sísmica para un período de retorno de 500 años que se incluye en el anexo I de la Directriz.

Por consiguiente, en Cataluña, como región afectada por estas directrices, se creó el Plan de Emergencias Sísmicas de Catalunya (SISMICAT). Este plan es el encargado de estimar los daños causados por los seísmos en viviendas, hospitales y parques de bomberos usando la escala de intensidades de la European Macroseismic Scale (EMS 98), además de coordinar los procedimientos de actuación con los planes estatal y municipal, informar a la población y catalogar los medios y recursos específicos para hacer frente a las emergencias producidas por seísmos. Aparte de todo esto, SISMICAT establece a partir del estudio de peligrosidad sísmica realizado en el Institut Geològic de Catalunya (IGC) qué municipios tienen que crear el correspondiente Plan de Actuación Municipal. (Martínez Castillo, 2009)



Figura 12: Iglesia de Santiago tras el terremoto de Lorca en 2011 (Fuente: B.A.B. Arquitectos)

Hoy en día, la normativa vigente en España es la Norma de Construcción Sismo-resistente (NCSE-02), que estima que las aceleraciones en todo el país varían entre los 0,04 y 0,24g para un periodo de retorno de 500 años. En ésta se establece que Barcelona está emplazada en una zona de sismicidad moderada dentro de Catalunya, en la cual las aceleraciones oscilan entre 0,04 y 0,14g. Sabiendo con certeza que un mismo terremoto puede causar diferentes daños en diferentes edificios de una misma zona, los edificios pueden ser clasificados en los siguientes grupos según la NCSE-02:

- Edificios de importancia moderada: aquellos cuyo riesgo de provocar víctimas o interrumpir un servicio primario por culpa de su derrumbamiento sea despreciable.
- Edificios de importancia normal: aquellos cuya destrucción pueda ocasionar víctimas o interrumpir un servicio para la colectividad pero nunca un servicio primario o capaz de dar lugar a efectos catastróficos.
- Edificios de importancia especial: aquellos cuya caída pueda interrumpir un servicio imprescindible o dar lugar a efectos catastróficos.

Teniendo en cuenta estos grupos y que la actual normativa sísmica obliga a su cumplimiento en edificios de importancia normal o especial cuando la aceleración sísmica básica es mayor o igual a 0,04g, el SISMICAT también incluye un método de evaluación para las tipologías constructivas más representativas e importantes de Cataluña. Es decir, un manual para calcular la vulnerabilidad sísmica de los edificios considerados de especial o normal importancia para cada municipio. (Pujades & Barbat, 2007)

Como normativa más general, en Europa se puede encontrar el Eurocodigo-8 (EC-8). Este conjunto de normas europeas de carácter voluntario es una modernización de la primera serie de Eurocódigos publicados durante la década de los 80. Éstos fueron una consecuencia de la puesta en marcha en el año 1975 de una actuación en base al artículo 95 del Tratado. Este artículo hace hincapié en que el Consejo deberá intentar con sus medios aproximar las disposiciones legales, reglamentarias y administrativas que incidan directamente en el funcionamiento del mercado común. El fin de estos códigos encargados por la Comisión Europea al Comité Europeo de Normalización es, como dice la propia página web del Ministerio de Fomento: *“proporcionar una serie de métodos comunes para calcular la resistencia mecánica de los elementos que desempeñan una función estructural en una obra de construcción”* (Ministerio de Fomento del Gobierno de España, 2018).

Por otro lado y aparte de las normas oficiales del país, Janira Irizarry Padilla en su tesis *“An Advanced Approach to Seismic Risk Assessment. Application to the Cultural Heritage and the*

Urban System of Barcelona.” analizó el riesgo sísmico a nivel regional y local para la ciudad de Barcelona basándose en diversos estudios y trabajos de microzonación y caracterización disponibles en la época (Cid (1998), Goula & Godefroy (1985) y Secanell (1999), entre otros) . Esta tesis tuvo como objetivo aplicar a esta zona de manera más exhaustiva algunas de las metodologías avanzadas para la evaluación del riesgo sísmico que se obtuvieron en el proyecto Risk-UE (Irizarry Padilla, 2004).

6. Metodología

6.1. Método estático no lineal (N2)

El método N2 de cálculo es un método estático no lineal simplificado (NSP de sus siglas en inglés, Non-linear Static Procedure). Este método tiene su origen en el Capacity Spectrum Method (CSM), creado en los años 70, y que fue adoptado por el Applied Technology Council de California en el ATC-40 para el análisis de estructuras de hormigón (Comartin, Niewiarowski, & Rojahn, 1996). En años posteriores, y con la finalidad de solventar algunas de las limitaciones del CSM, así como el hecho de crear métodos que no sólo sirvieran para analizar edificios de hormigón reforzado, se desarrollaron una gran cantidad de NSPs, dentro de los cuales se encuentra el método N2.

De manera general, los diversos métodos NSP enfrentan entre sí la capacidad de un edificio con la demanda que crea un sismo. A partir de esta comparación se encuentra el punto de intersección de ambas, conocido como punto de desempeño de la estructura, el cual depende de la forma en la que la capacidad puede hacer frente a la demanda (Fajfar & Gasperisic, 1996).

6.2. TreMuri

TreMuri o *3Muri* es un programa desarrollado en la Universidad de Génova por Penna (2002), Galasco (2006) y Lagomarsino y Catari (2009). El programa está especialmente creado para el análisis sísmico y estructural de edificios de mampostería. Con este fin, el programa permite realizar análisis estáticos no lineales o dinámicos de modelos 3D de edificios con un compromiso óptimo entre exactitud y carga computacional. (Galasco, 2018)

El programa esquematiza las paredes, forjados, vigas o pilares mediante varios macro-elementos que crean un modelo apto para ser analizado. La calibración de estos modelos para poder considerar el daño estructural que puede sufrir el edificio se ha hecho mediante la observación y estudio de los mecanismos de disipación observados en casos reales.

Para poder considerar estos resultados, el modelo 3D debe ser lo más fiel posible a la realidad. El modelo debe tener en cuenta los diferentes materiales que se usen en la estructura, a su vez, las propiedades mecánicas de estos materiales, las aperturas en los muros, la dirección de los forjados, etc. (Múrria Nogués, 2017).

6.3. Capacidad

La capacidad es la representación de la habilidad de la estructura para resistir una determinada sollicitación. Dicha representación se lleva a cabo mediante la denominada curva de capacidad o curva “pushover”, la cual es obtenida mediante el programa 3Muri (Figura 13).

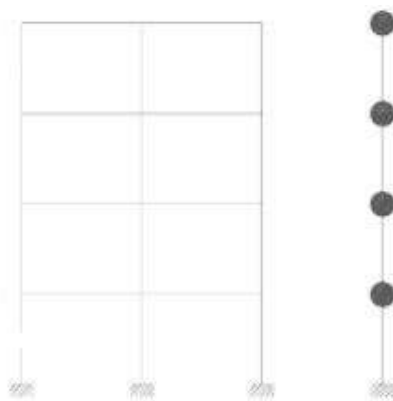


Figura 13: Simplificación de la estructura a un nodo por altura (modificada de J. Campbell et al., 2005)

El análisis pushover consigue transformar la deformación compleja que acontece en un edificio cuando éste es sacudido por un terremoto, en algo sencillo como una curva que compara el cortante en la base con el desplazamiento de un punto de control que se encuentre en la parte superior del edificio. Este análisis se lleva a cabo mediante la aplicación monotónica incremental de un patrón de fuerzas. Comúnmente, en estructuras regulares como la nuestra, dicho patrón se asemeja al primer modo de vibración de la estructura (Figura 14), ya que este modo es el que mayor masa activa, soliendo sobrepasar el 70% de la masa total.

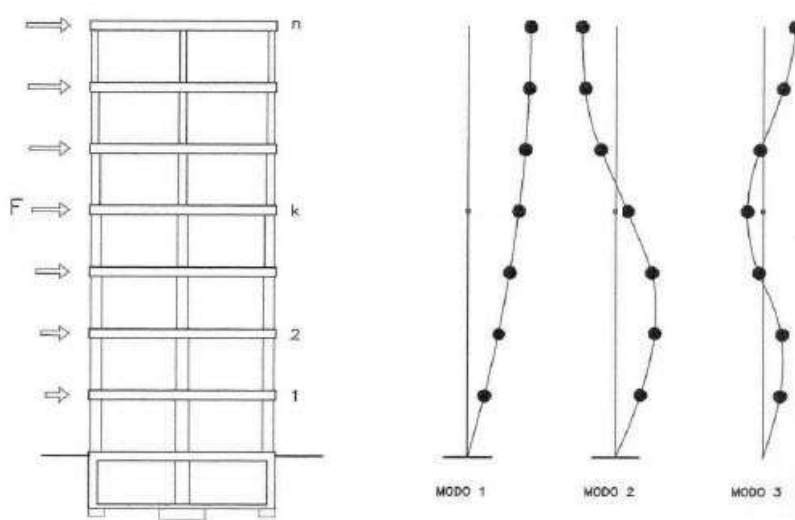


Figura 14: Modos de vibración de un edificio (modificada de Ministerio de Fomento, 2002)

Con el objetivo de justificar el uso del primer modo solamente, solicitamos al programa *TreMuri* 21 modos de vibración, 3 por cada nivel. Los modos obtenidos son ordenados en una tabla según el porcentaje de masa activada para cada una de las direcciones (X e Y). A partir de esta tabla podremos ver, como pasa en la gran mayoría de edificios regulares, como el primer modo es el que mayor porcentaje de masa mueve y juntamente con los dos siguientes pueden llegar a sumar más del 90% de la masa total (Figura 15).

Direction	Mode	Period T[s]	Mx [kg]	My [kg]	IFx [%]	IFy [%]	Mx [%]	My [%]
X	1	0.54	2197037	403	99.981	0.018	87.21	0.02
	2	0.19	255066	4	99.996	0.002	10.12	0.00
	3	0.10	34918	54	99501	0.154	1.39	0.00
Σ							98.72	
Y	1	0.55	467	1872181	0.025	99.975	0.02	74.31
	2	0.18	2	350873	0.001	99.999	0.00	13.93
	3	0.11	5	69973	0.002	26.361	0.00	2.78
Σ							91.02	

Figura 15: Ejemplo de justificación del uso del primer modo (Fuente: Gonzalez-Drigo, 2016)

De la información obtenida del programa, se puede sacar la curva mencionada (Figura 16). En esta curva se pueden diferenciar una zona recta (elástica) que acaba en el punto de fluencia o “yielding”, el punto de máximo cortante de la base y el punto último, el cual es muy difícil de calcular pero que, de acuerdo a criterios que se pueden encontrar en la literatura, se supondrá en el punto en el cual la curva decrece un 20% del punto de cortante máximo (Figura 17).

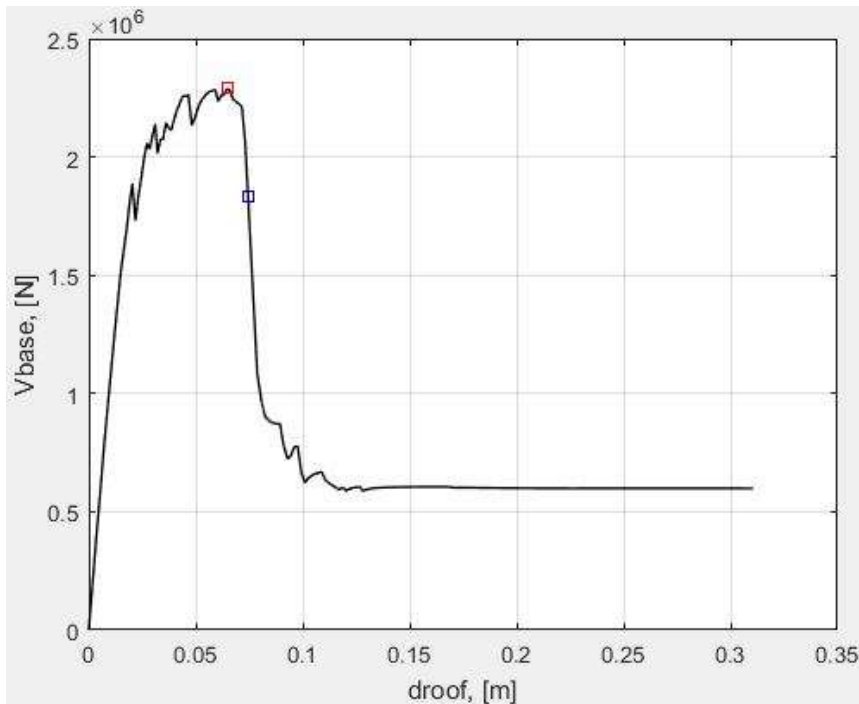


Figura 16: Ejemplo de curva de capacidad

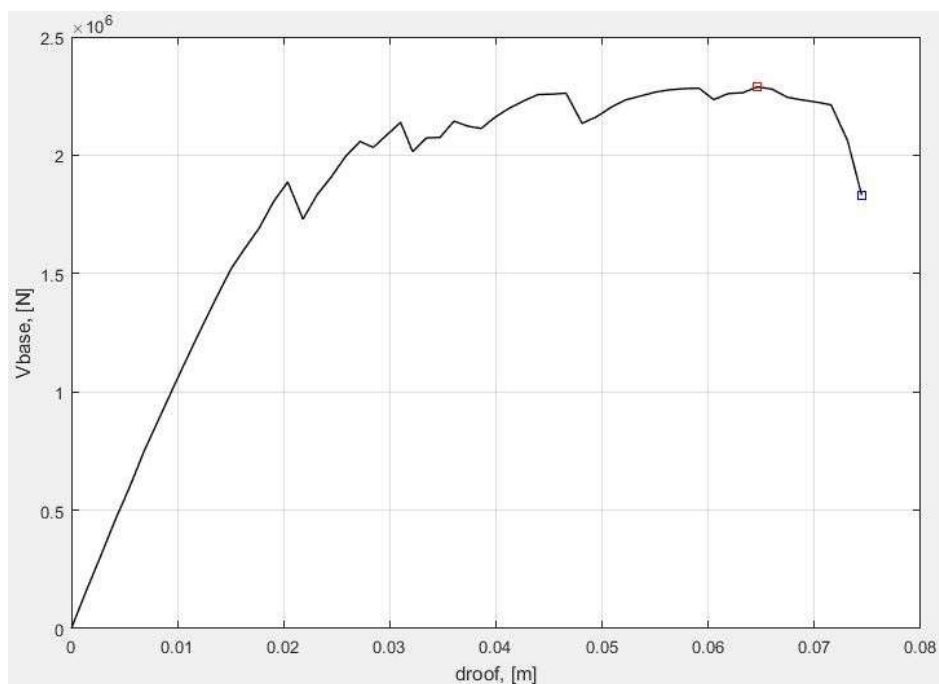


Figura 17: Ejemplo de curva de capacidad cortada en el punto último

De cara a poder comparar la curva de capacidad con la demanda, hay que convertir la primera a su espectro de capacidad en formato ADRS (de sus siglas en inglés Acceleration Displacement Response Spectra) mediante las siguientes fórmulas (Ec. 1 y Ec. 2). Esta transformación se consigue mediante un coeficiente llamado factor de participación modal (“ Γ ”), el cual es calculado por el programa *TreMuri*. Este “ Γ ” convierte el cortante de la base (V_{base}) y el desplazamiento en el techo ($droof$) en aceleración espectral (S_a) y desplazamiento espectral (S_d) respectivamente (Figura 18).

$$D' = \frac{D_t}{\Gamma} \quad (\text{Ec. 1})$$

$$F' = \frac{V}{\Gamma} \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde:

D_t : El desplazamiento en la curva de capacidad.

D' : El desplazamiento equivalente en formato ADRS.

F' : La fuerza equivalente en formato ADRS.

V : El cortante en la base en la curva de capacidad.

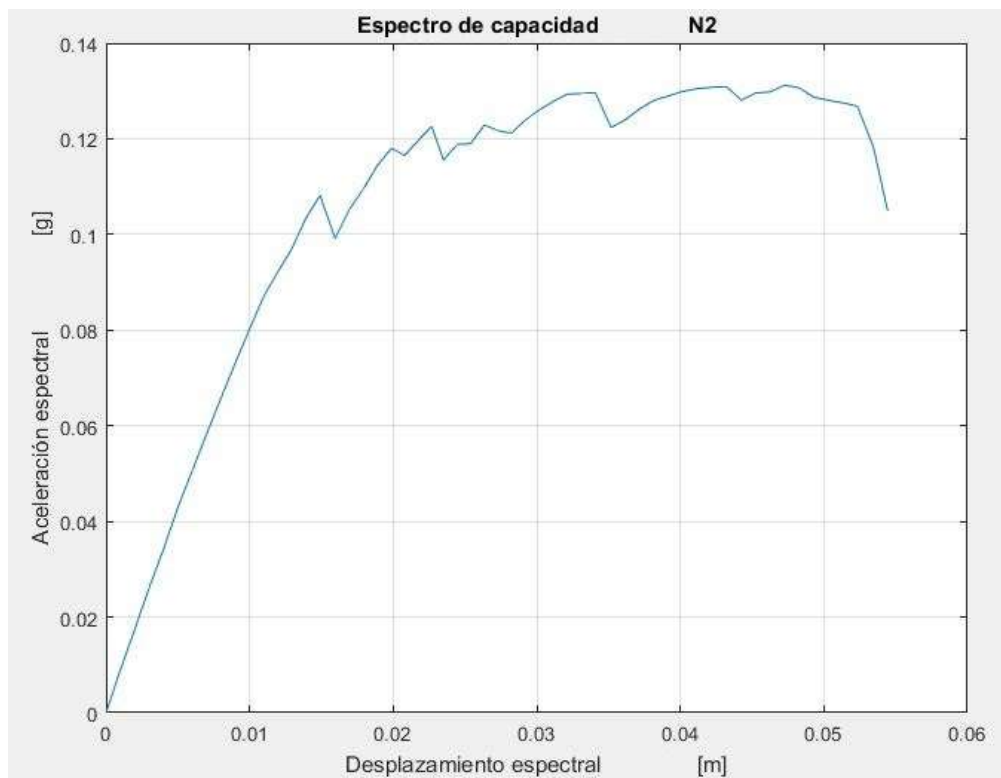


Figura 18: Ejemplo de espectro de capacidad ADRS

6.4. Demanda

La demanda es la representación del movimiento del terreno en el que se encuentra el edificio a estudiar. Para determinar esta demanda se usarán en este trabajo tres documentos diferentes: la Norma de Construcción Sismo-resistente Española (NCSE-02), el Eurocodigo (EC-8) y la tesis “*An Advanced Approach to Seismic Risk Assessment. Application to the Cultural Heritage and the Urban System of Barcelona.*” de Janira Irizarry (2004). A partir de cada uno de estos documentos se podrá graficar una función del espectro de demanda ADRS comparable con el espectro de capacidad.

6.4.1. NCSE-02

La aceleración sísmica para el cálculo se define mediante el siguiente producto (Figura 19):

$$a_c = S \cdot \rho \cdot a_b$$

donde:

a_b : Aceleración sísmica básica

ρ : Coeficiente adimensional de riesgo, función de la probabilidad aceptable de que se exceda a_c en el período de vida para el que se proyecta la construcción.

Toma los siguientes valores:

construcciones de importancia normal $\rho = 1,0$
 construcciones de importancia especial $\rho = 1,3$

S: Coeficiente de amplificación del terreno. Toma el valor:

Para $\rho \cdot a_b \leq 0,1 \text{ g}$ $S = \frac{C}{1,25}$

Para $0,1 \text{ g} < \rho \cdot a_b < 0,4 \text{ g}$ $S = \frac{C}{1,25} + 3,33 \left(\rho \cdot \frac{a_b}{g} - 0,1 \right) \left(1 - \frac{C}{1,25} \right)$

Para $0,4 \text{ g} \leq \rho \cdot a_b$ $S = 1,0$

siendo:

C: Coeficiente de terreno. Depende de las características geotécnicas del terreno de cimentación

Figura 19: Fórmulas para el cálculo de la aceleración sísmica (Fuente: Ministerio de Fomento, 2002)

El cálculo de esta aceleración básica será necesario para poder multiplicarlo por el espectro de respuesta elástica normalizado y así poder tener el espectro específico para la zona particular de estudio.

El espectro de respuesta elástica normalizado, con un amortiguamiento de referencia del 5%, se define mediante las siguientes fórmulas (Figura 20). Este amortiguamiento se debe a que por convenio, se adjudica a todos los materiales del edificio un amortiguamiento del 5%, el cuál luego se adaptará al edificio en cuestión.

Si $T < T_A$	$\alpha(T) = 1 + 1,5 \cdot T/T_A$
Si $T_A \leq T \leq T_B$	$\alpha(T) = 2,5$
Si $T > T_B$	$\alpha(T) = K \cdot C/T$

siendo:

- $\alpha(T)$: Valor del espectro normalizado de respuesta elástica.
- T : Periodo propio del oscilador en segundos.
- K : Coeficiente de contribución
- C : Coeficiente del terreno, que tiene en cuenta las características geotécnicas del terreno de cimentación
- T_A, T_B : Periodos característicos del espectro de respuesta, de valores:

$$T_A = K \cdot C/10$$

$$T_B = K \cdot C/2,5$$

Figura 20: Formulas para el cálculo del espectro normalizado de respuesta elástica (Fuente: Ministerio de Fomento, 2002)

Para poder usar estas fórmulas, es necesario conocer tanto el coeficiente de contribución como el coeficiente del terreno, como la aceleración sísmica básica (a_b o PGA). El coeficiente de contribución viene dado por el mapa sísmico de la norma sismo-resistente (Figura 21), pero también se puede encontrar en el anejo de la misma, de igual manera que la aceleración sísmica básica. En el caso de Barcelona $K=1,0$ y $PGA= 0,04g$.



Figura 21: Mapa sísmico de la Norma Sismorresistente (Fuente: Ministerio de Fomento, 2002)

El coeficiente del terreno, por otro lado, viene dado por una clasificación en cuatro tipos diferentes. Los tipos son los siguientes:

- Terreno tipo I: roca compacta, suelo cementado o granular muy denso. Velocidad de propagación de las ondas elásticas transversales o de cizalla, $V_s > 750$ m/s.
- Terreno tipo II: roca muy fracturada, suelos granulares densos o cohesivos duros. Velocidad de propagación de las ondas elásticas transversales o de cizalla, $750 \text{ m/s} \geq V_s > 400$ m/s.
- Terreno tipo III: suelo granular de compacidad media, o suelo cohesivo de consistencia firme a muy firme. Velocidad de propagación de las ondas elásticas transversales o de cizalla, $400 \text{ m/s} \geq V_s > 200$ m/s.
- Terreno tipo IV: suelo granular suelto, o suelo cohesivo blando. Velocidad de propagación de las ondas elásticas transversales o de cizalla, $V_s \leq 200$ m/s.

Esta clasificación, a su vez, da lugar a los valores para el coeficiente del terreno de la siguiente tabla (Tabla 2):

Tabla 2: Coeficientes del terreno para la NCSE-02, según tipo de terreno

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

A partir de estos datos, se pueden graficar los espectros de capacidad normalizados (Figura 22)

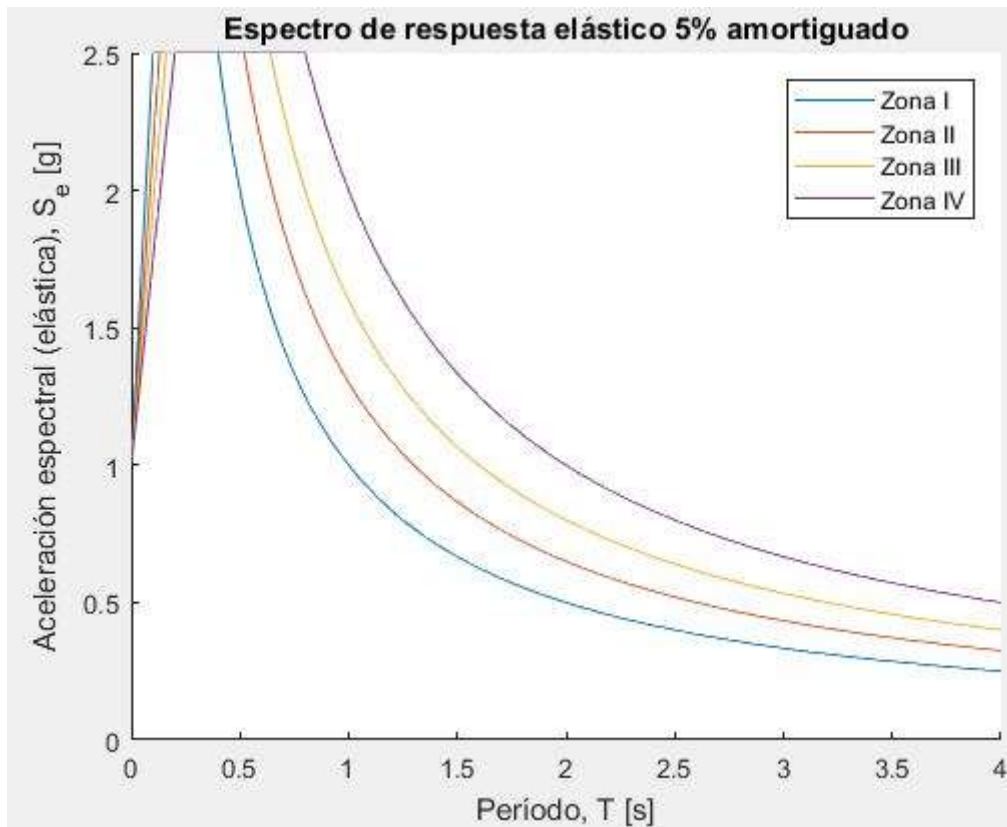


Figura 22: Espectro de respuesta elástico para Barcelona según la NCSE-02

Con el fin de poder comparar el espectro de capacidad con el de demanda, se transforma el espectro elástico al formato ADRS (Figura 23):

$$(S_d)_i = (S_e)_i \cdot g \cdot \frac{(t_i)^2}{(2 \cdot \pi)^2} \quad (\text{Ec. 3})$$

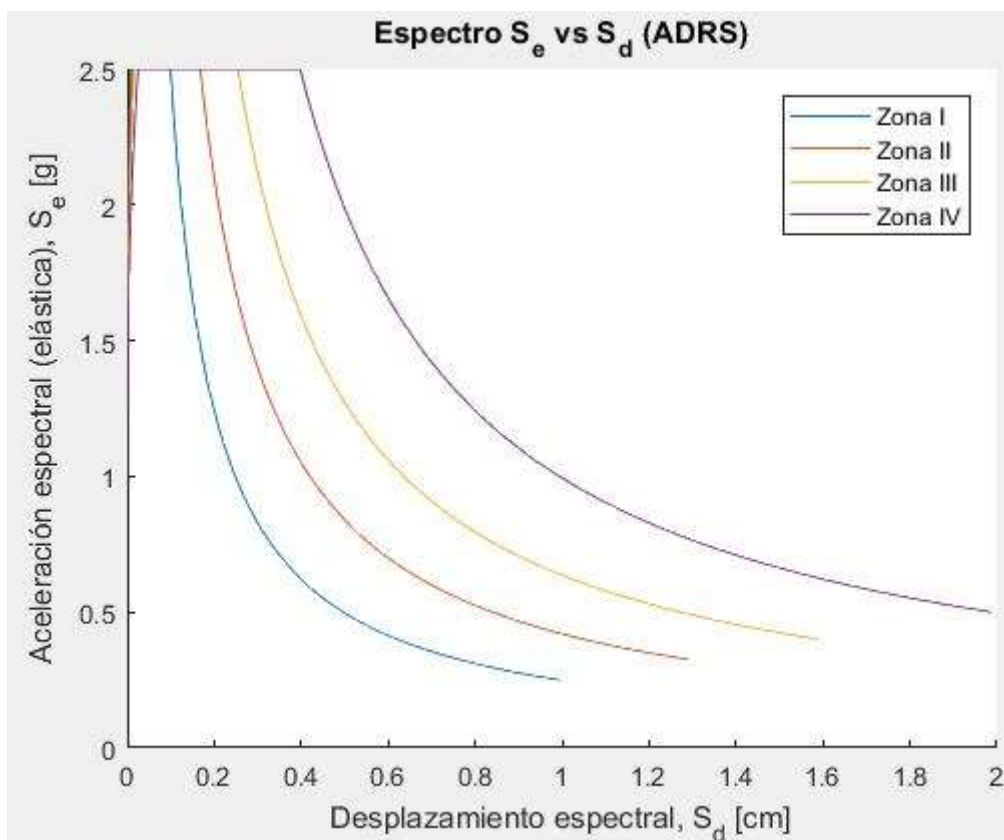


Figura 23: Espectro de demanda para Barcelona según la NCSE-02

Una vez llegados a este punto, se ha de determinar la zona en la que está ubicado nuestro edificio, que en nuestro caso es la Zona II y graficar la demanda espectral ADRS (Figura 24)

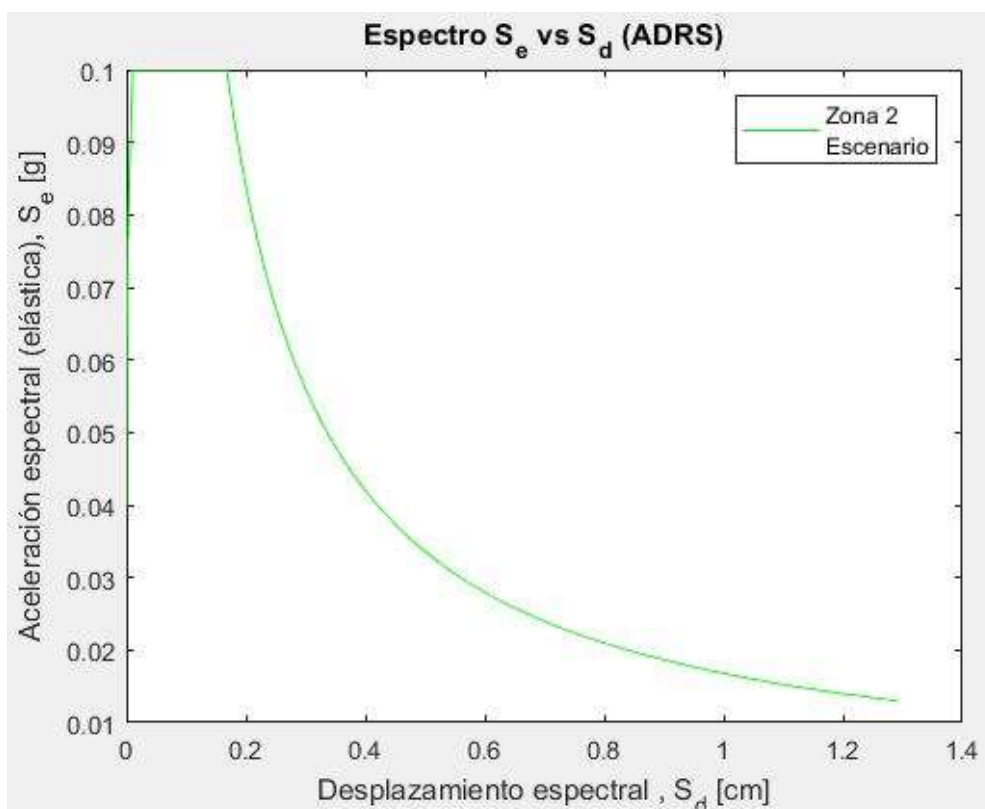


Figura 24: Espectro de demanda para E-01 según la NCSE-02

6.4.2. EC8

A diferencia de la NCSE-02, el espectro de respuesta elástica con amortiguamiento de referencia del 5% se define mediante las siguientes fórmulas (Figura 25):

$$0 \leq T \leq T_B : S_e(T) = a_g \cdot k \cdot S \cdot \left[1 + \frac{T}{T_B} \cdot (\eta \cdot 2,5 - 1) \right]$$

$$T_B \leq T \leq T_C : S_e(T) = a_g \cdot k \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5$$

$$T_C \leq T \leq T_D : S_e(T) = a_g \cdot k \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5 \left[\frac{T_C}{T} \right]$$

$$T_D \leq T \leq 4 \text{sec} : S_e(T) = a_g \cdot k \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5 \left[\frac{T_C T_D}{T^2} \right]$$

donde:

$S_e(T)$ = ordenada del espectro de respuesta elástica
 T = periodo de vibración de un sistema lineal con un grado de libertad
 a_g = aceleración sísmica para el cálculo
 k = factor modificador para regiones especiales (recomendado $k=1$)
 T_B, T_C = límites de la rama de aceleración espectral constante
 T_D = comienzo del rango de respuesta de desplazamiento constante
 S = parámetro del suelo
 η = factor corrector de la amortiguación ($\eta=1$ para 5%)

Figura 25: Fórmulas para el cálculo del espectro de respuesta elástico (Fuente: Irizarry, 2004)

Para poder utilizar estas fórmulas, es necesario conocer los valores de T_B , T_C , T_D , S y a_g . En esta normativa, los valores vienen definidos por una clasificación del terreno diferente a la de la norma española:

- Tipo A: formación geológica rocosa o parecida, incluyendo como máximo 5 metros de material más débil en la superficie. $V_s > 800$ m/s
- Tipo B: depósitos de arena muy densa, gravilla, o arcilla dura de al menos varias decenas de metros de profundidad. Caracterizado por el aumento de sus propiedades mecánicas con la profundidad. $360 \text{ m/s} < V_s < 800 \text{ m/s}$
- Tipo C: depósitos profundos de arena densa o medio densa, gravilla o arcilla dura con profundidades que van desde las decenas a las muchas centenas de metros. $180 \text{ m/s} < V_s < 360 \text{ m/s}$
- Tipo D: depósitos de suelo poco firme o medianamente sin cohesionar (con o sin capas de cohesivo blando), o de predominantemente suelo cohesivo blando. $V_s < 180 \text{ m/s}$

- Tipo E: suelo consistente en una capa superficial de entre 5 y 20 metros con valores de velocidad de propagación similares a los tipos C y D, con un suelo subyacente de velocidad de propagación superior a la del tipo A.

A partir de esta clasificación, se pueden leer los valores necesarios para aplicar las fórmulas en la siguiente tabla (Tabla 3):

Tabla 3: Valores del EC-8 para los diferentes tipos de suelo

Tipo de suelo	T_B [s]	T_C [s]	T_D [s]	S
A	0,05	0,25	1,2	1,0
B	0,05	0,25	1,2	1,35
C	0,10	0,25	1,2	1,5
D	0,10	0,30	1,2	1,8
E	0,05	0,25	1,2	1,6

A parte de estos valores, el Eurocódigo define que la aceleración del terreno (a_g) viene definida por la normativa de cada país. En el caso que nos incumbe, la NCSE-02, como hemos visto anteriormente.

A partir de estos datos, se pueden graficar los espectros de capacidad (Figura 26)

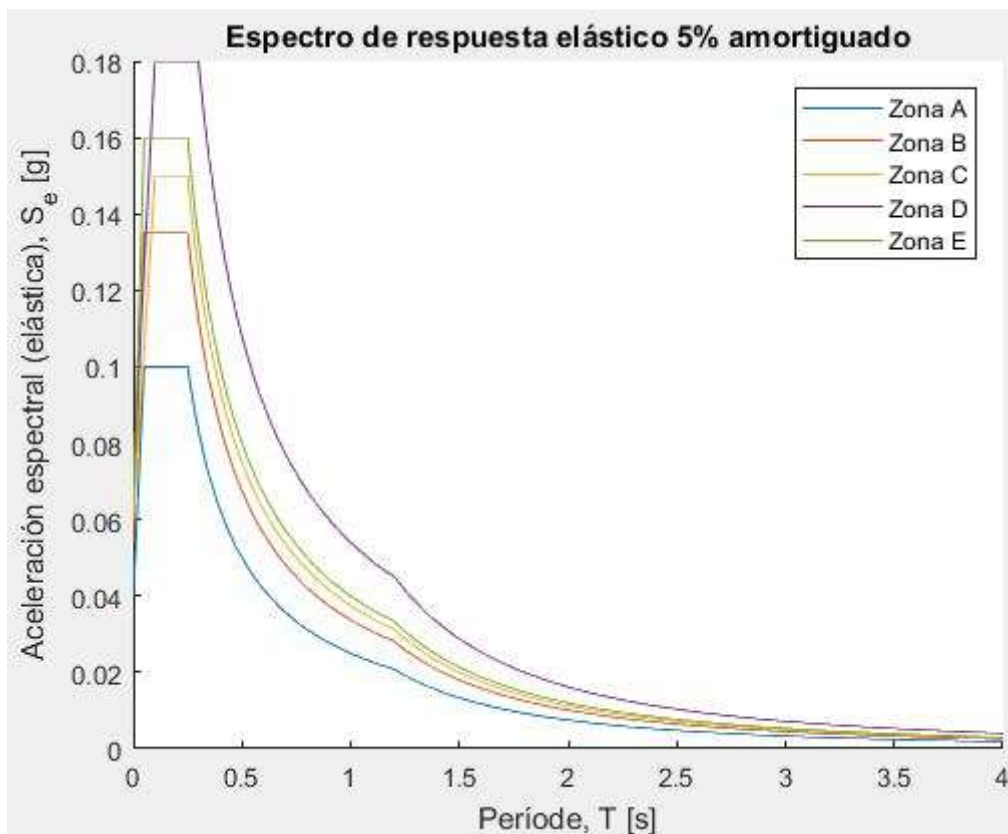


Figura 26: Espectro de respuesta elástico para Barcelona según el EC-8

Tal como se hizo para la NCSE-02, y con el fin de poder comparar el espectro de capacidad con el de demanda, se transforma el espectro al formato ADRS (Figura 27) usando la ecuación 3:

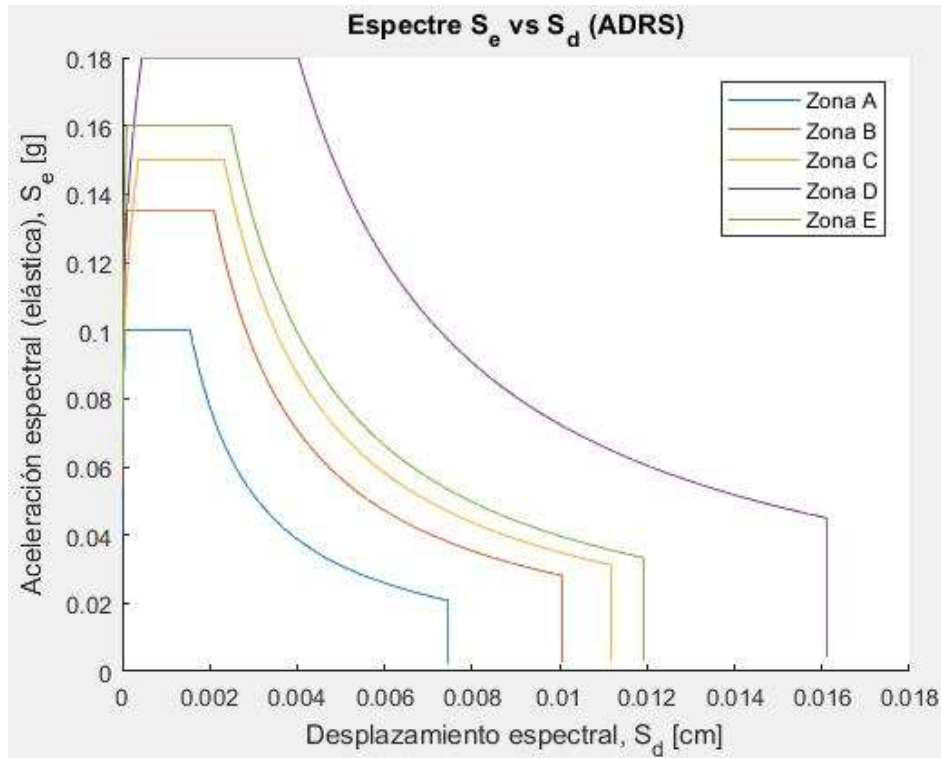


Figura 27: Espectro de demanda para Barcelona según el EC-8

La zona en la que está ubicada nuestro edificio es del Tipo B, cuyo espectro de demanda ADRS se observa en la Figura 28

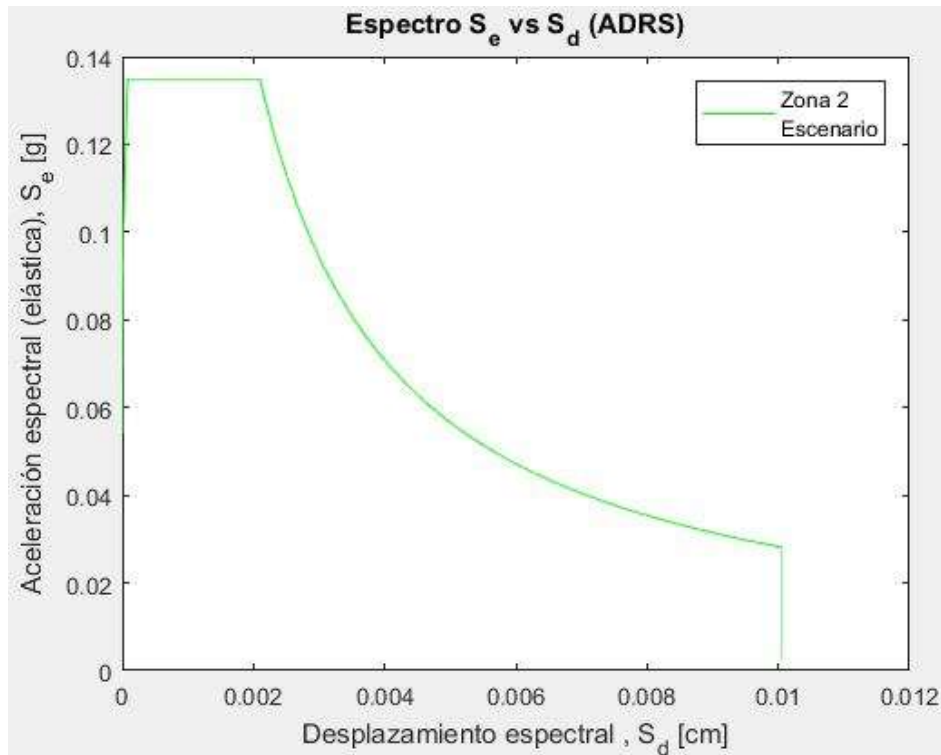


Figura 28: Espectro de demanda para E-01 según el EC-8

6.4.3. Irizarry

Irizarry, en su trabajo expone que hay dos maneras de evaluar el riesgo sísmico:

- Enfoque determinista: se basa en la asunción de que con la información obtenida de sismos pasados se puede evaluar el peligro sísmico de una región. Por ejemplo, en un lugar donde nunca ha habido un terremoto, se asume que no hay ninguna probabilidad de que uno ocurra.

Este enfoque, en el caso de Barcelona, está basado en dos terremotos: el de 1448 ocurrido en Cardedeu y el de 1428 ocurrido en la provincia de Gerona.

- Enfoque probabilista: se basa en estudios sísmicos y sismotectónicos para determinar la probabilidad de ocurrencia de un terremoto en una región. En este caso, escogido a su vez por el proyecto Risk-UE, se usa el código CRISIS 99-18 (Ordaz, Aguilar, & Arboleda, 1999).

Este código adaptado a las necesidades del proyecto que nos incumbe usa las siguientes fórmulas para mostrar el espectro de respuesta elástica con amortiguamiento de referencia del 5% (Figura 29):

$0 \leq T \leq T_B$	$S_a(T) = pga \cdot \left[1 + \frac{T}{T_C} (B_C - 1) \right]$
$T_B \leq T \leq T_C$	$S_a(T) = pga \cdot B_C$
$T_C \leq T \leq T_D$	$S_a(T) = pga \cdot \left(\frac{T_C}{T} \cdot B_C \right)$
$T_D \leq T \leq 4 \text{ sec}$	$S_a(T) = pga \cdot \left(\frac{T_C \cdot T_D}{T^2} \right) \cdot B_C$

Siendo:

$S_a(T)$ La ordenada del espectro de respuesta elástica.

T Período de vibración del SDOF.

pga La aceleración pico del terreno (el documento EC8 lo define como a_{gR}).

B_C Factor definido por $\frac{S_{a \max}}{pga}$.

T_B, T_C Los límites de la recta del espectro que define la aceleración constante.

T_D El inicio del desplazamiento constante en el espectro.

Figura 29: Fórmulas para el cálculo del espectro de respuesta elástico según Irizarry (Modificada de Irizarry, 2004)

Los diferentes valores a utilizar en estas fórmulas vienen determinados por la zona en la que se enfoca el trabajo. Para nuestro caso, al estar enfocado en Barcelona, Irizarry propone cuatro

tipos diferentes de terrenos que son los siguientes (Figura 30):

- Zona I: depósitos del Holoceno provenientes de los deltas del Besós y el Llobregat.
- Zona II: formaciones del Pleistoceno con una base del Terciario de espesor suficiente para tener una influencia en la amplificación.
- Zona III: afloramientos del Pleistoceno sin una base Terciaria de espesor suficiente para tener influencia en la respuesta.
- Zona R: afloramientos rocosos del Paleozoico y el Terciario.

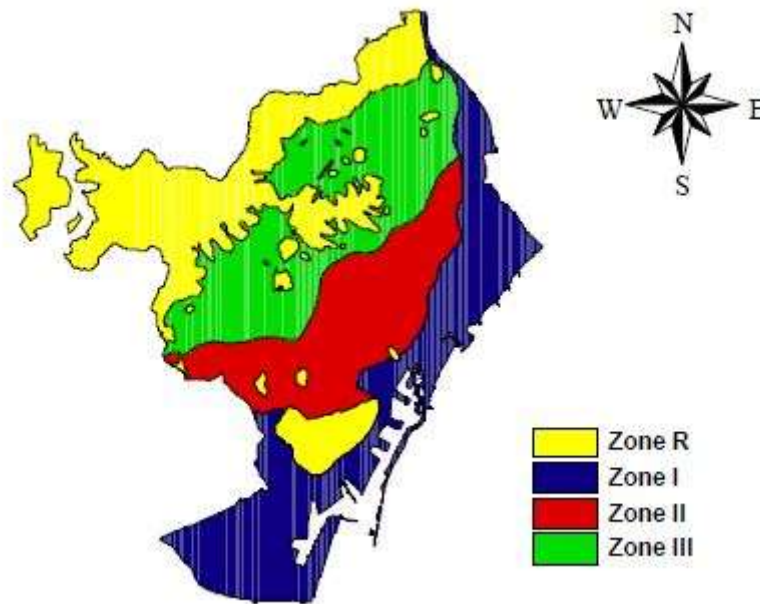


Figura 30: Zonas de terreno según Irizarry (Fuente: Irizarry, 2004)

Estas zonas de terreno diferente son las que nos aportan los valores necesarios para usar las fórmulas y representar el espectro de respuesta elástica. Los valores necesarios para las zonas de Barcelona son los siguientes (Tabla 4):

Tabla 4: Valores necesarios para el cálculo del espectro de demanda según Irizarry (2004)

	Determinista					Probabilista				
	T _B	T _C	T _D	B _C	PGA	T _B	T _C	T _D	B _C	PGA
Zona I	0,1	0,39	2,3	1,91	0,136	0,1	0,4	2,85	2,0	0,188
Zona II	0,1	0,22	2,2	2,45	0,141	0,1	0,23	2,21	2,5	0,194
Zona III	0,1	0,22	2,0	2,29	0,122	0,1	0,19	1,77	2,57	0,169
Zona R	0,1	0,23	1,75	2,26	0,072	0,1	0,25	1,75	2,29	0,1

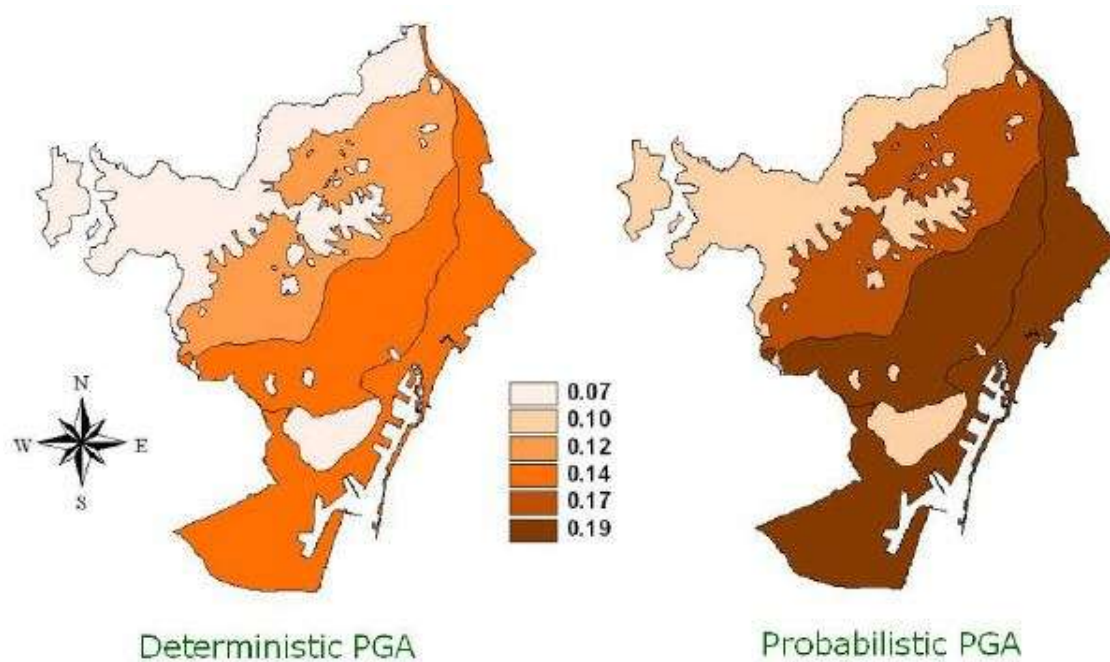


Figura 31: PGAs para cada zona de Barcelona según Irizarry (Fuente: Irizarry, 2004)

De cara a este proyecto, solamente usaremos el enfoque probabilista, ya que tiene en cuenta muchos más datos que el determinista y da una veracidad más alta al proyecto en general.

A partir de estos datos podemos graficar los espectros de capacidad (Figura 32)

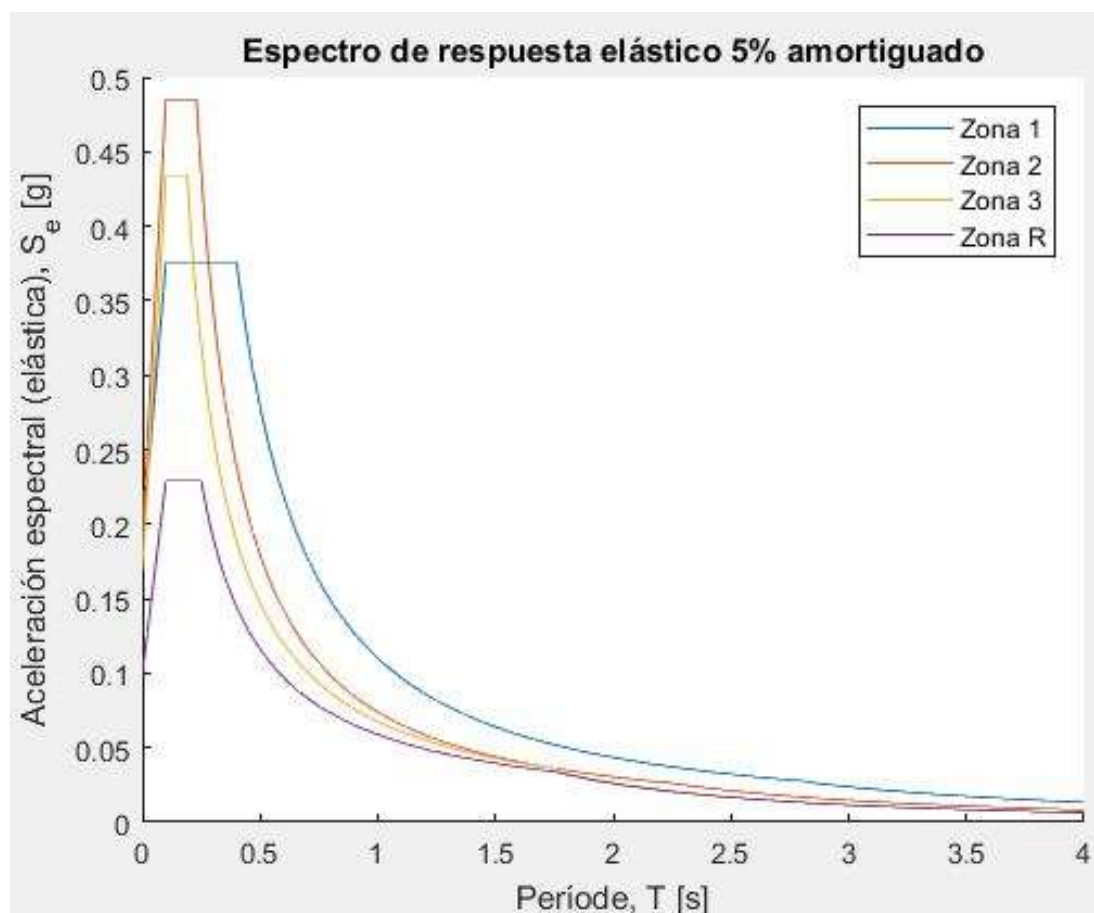


Figura 32: Espectro de respuesta elástica para Barcelona según Irizarry

Con el fin de poder comparar el espectro de capacidad con el de demanda transformamos el espectro al formato ADRS (Figura 33) usando la ecuación 3:

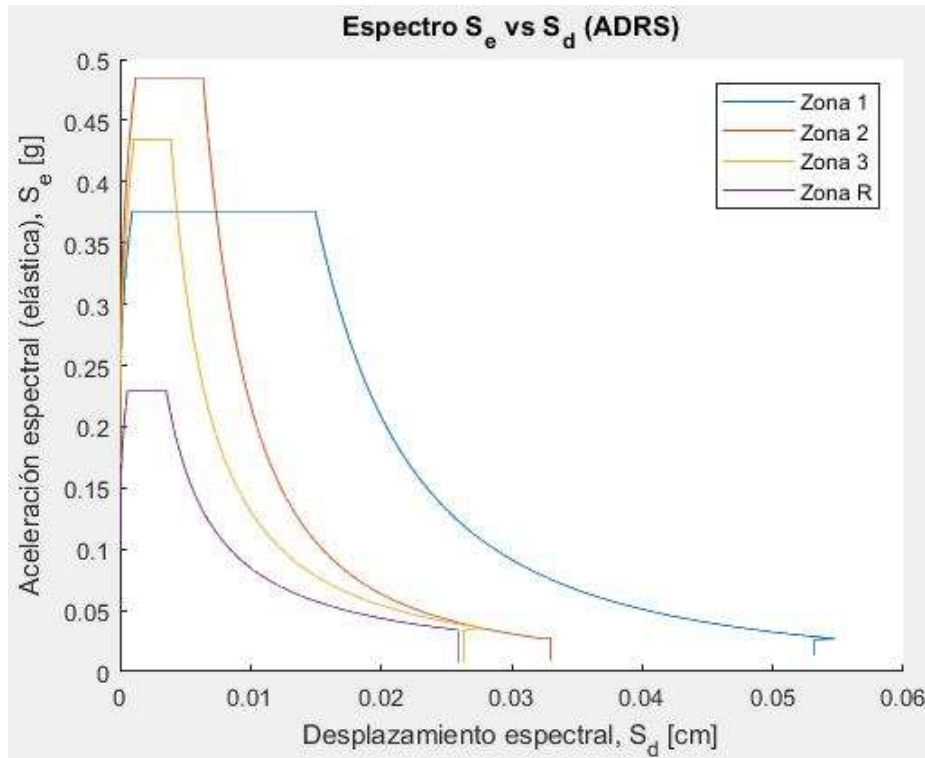


Figura 33: Espectro de demanda para Barcelona según Irizarry

La zona en la que está ubicada nuestro edificio es la Zona II, cuyo espectro de demanda ADRS se observa en la Figura 34.

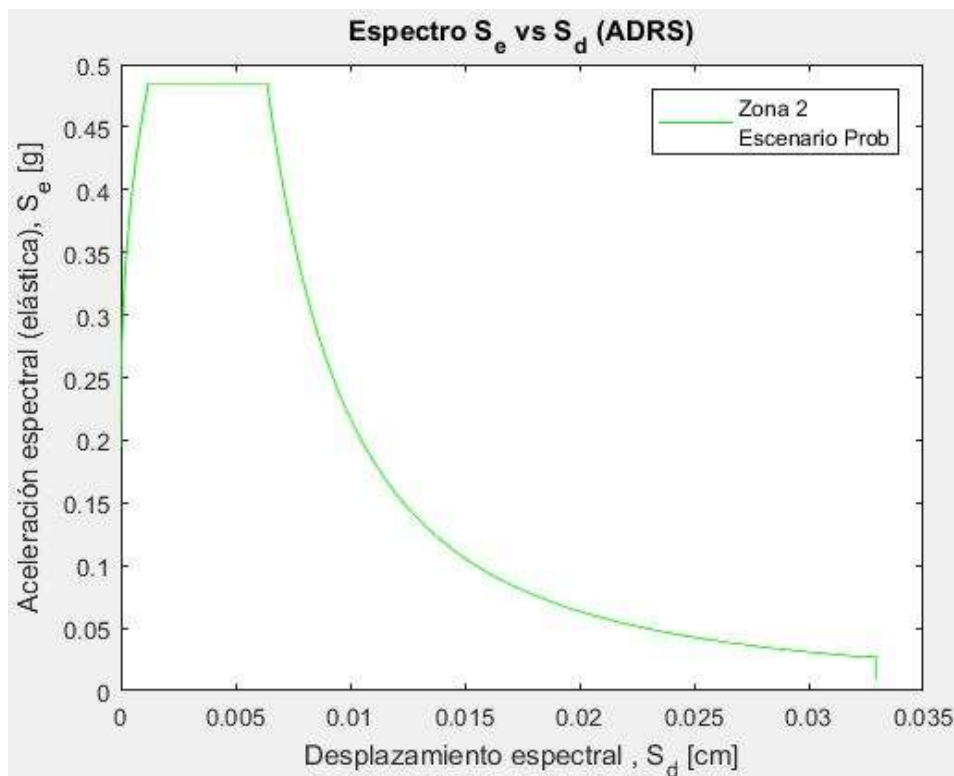


Figura 34: Espectro de demanda para E-01 según Irizarry

6.4.4. Comparativa de demandas

Una vez determinados los espectros de demanda aplicables a un edificio de la zona de Barcelona vamos a proceder a compararlas. En el siguiente gráfico se pueden ver las funciones de la NCSE-02, el EC8 e Irizarry para unos PGAs de 1g (normalizado) (Figura 35), 0,04g (Figura 36) y 0,0194g (Figura 37) en la zona escogida para este proyecto:

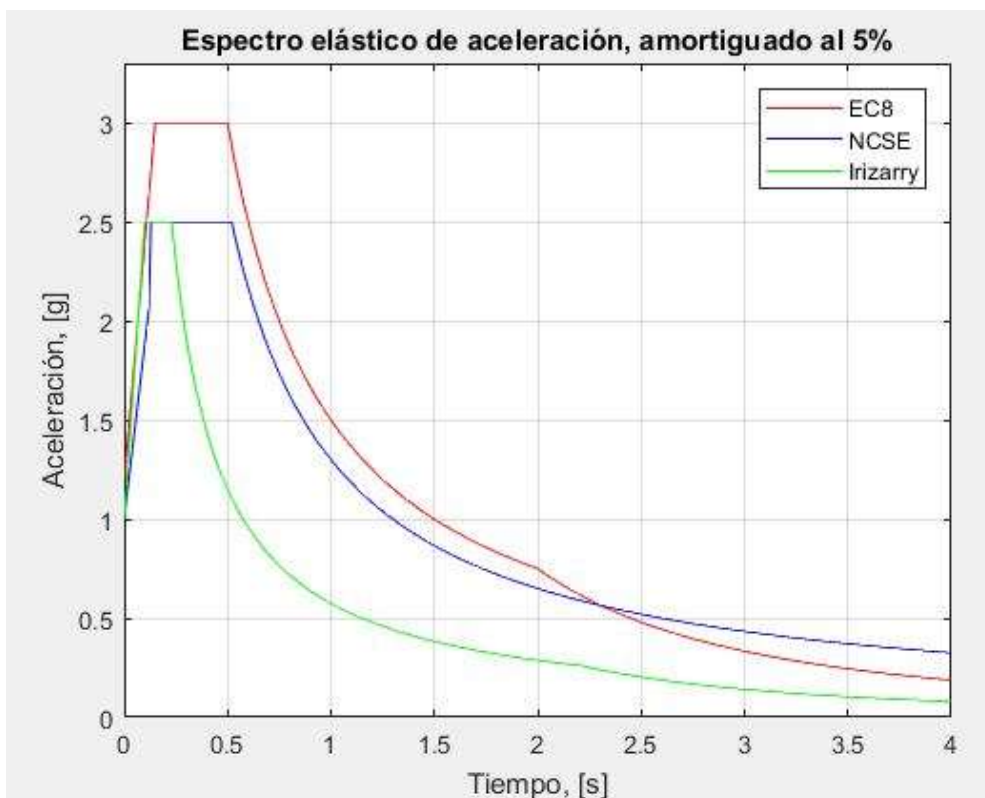


Figura 35: Demanda de cada una de las normativas para la zona escogida con PGA=1g

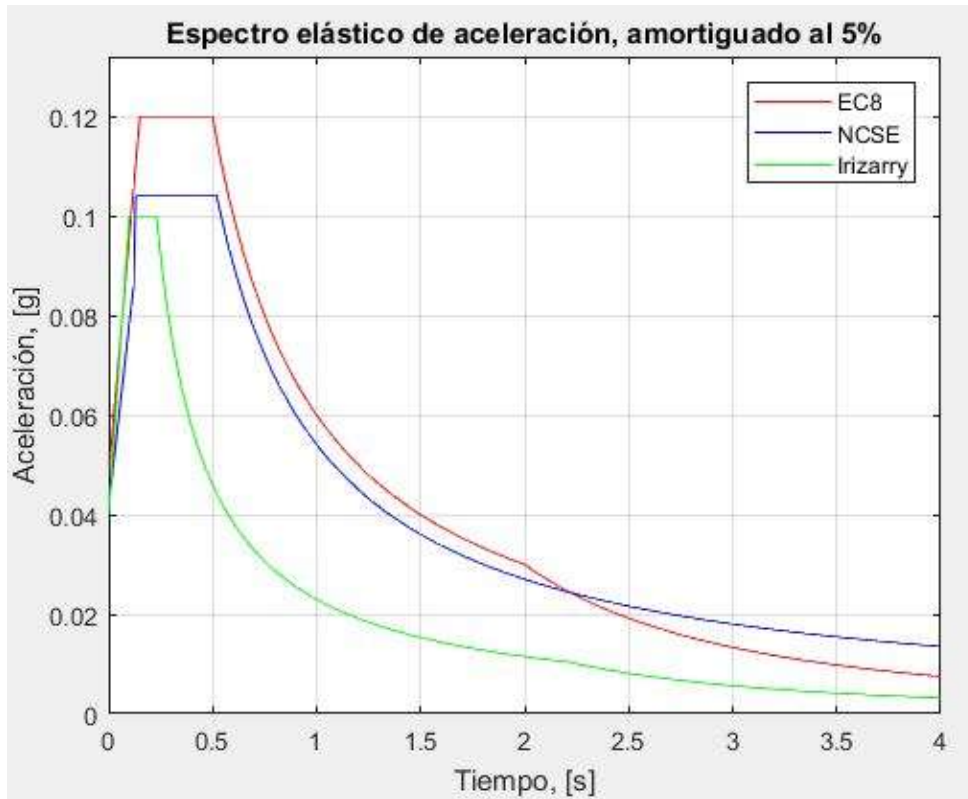


Figura 36: Demanda de cada una de las normativas para la zona escogida con PGA=0,04g

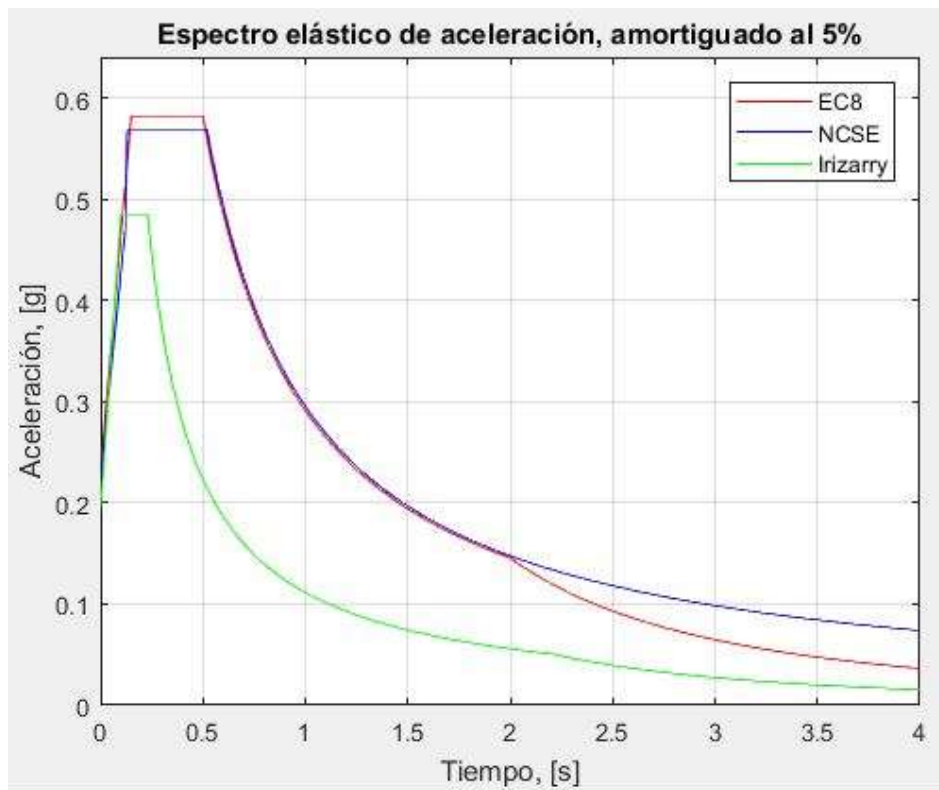


Figura 37: Demanda de cada una de las normativas para la zona escogida con PGA=0,194g

Tras estos gráficos, vamos a comparar cada una de las demandas con sus respectivos PGAs propuestos por su norma o estudio, es decir, 0,04g para NCSE-02 y EC8, y 0,194g para Irizarry (Figura 38):

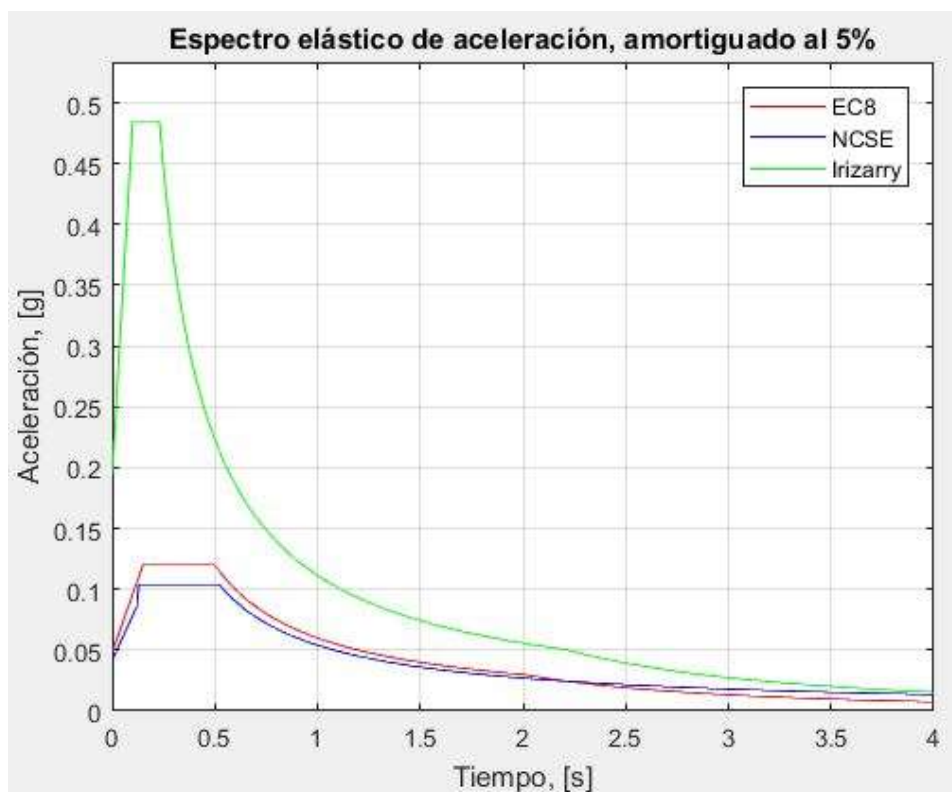


Figura 38: Demanda de cada una de las normativas para la zona escogida

Como se puede observar a partir de los gráficos anteriores, existen diferencias importantes en las mesetas de aceleración máxima constante, principalmente observables en el espectro propuesto por Irizarry. Así mismo, la selección de distintos PGAs, de acuerdo a lo preestablecido por cada documento representa también un factor clave. Para este estudio se utilizarán los espectros generados a partir del documento propuesto por Irizarry al tratarse de un estudio de micro-zonación especialmente realizado para la zona de interés. No obstante, además de utilizar el PGA propuesto por Irizarry para dicha zona, se han utilizado otros PGAs entre los cuales se encontrará el de las normativas NCSE-02 y EC8 para poder sacar las conclusiones adecuadas.

6.5. Desempeño

Encontrar el punto de desempeño es el paso final para analizar el riesgo sísmico del edificio. Con el fin de facilitar este análisis, se debe convertir el espectro de capacidad del edificio en una curva bilineal (Figura 39). Esta bilineal deberá tener las siguientes características:

- Cubrir la misma área inferior que el espectro de capacidad original.
- Tener su inicio en el mismo punto cero que la curva original.
- Cruzar con el espectro de capacidad original a una altura del 70% del punto de máxima aceleración espectral.
- La recta horizontal deberá tener la misma altura que el punto de máxima aceleración espectral.
- El punto de máxima aceleración espectral será el final de la bilineal
- Las dos rectas se unirán en el llamado punto de yielding.

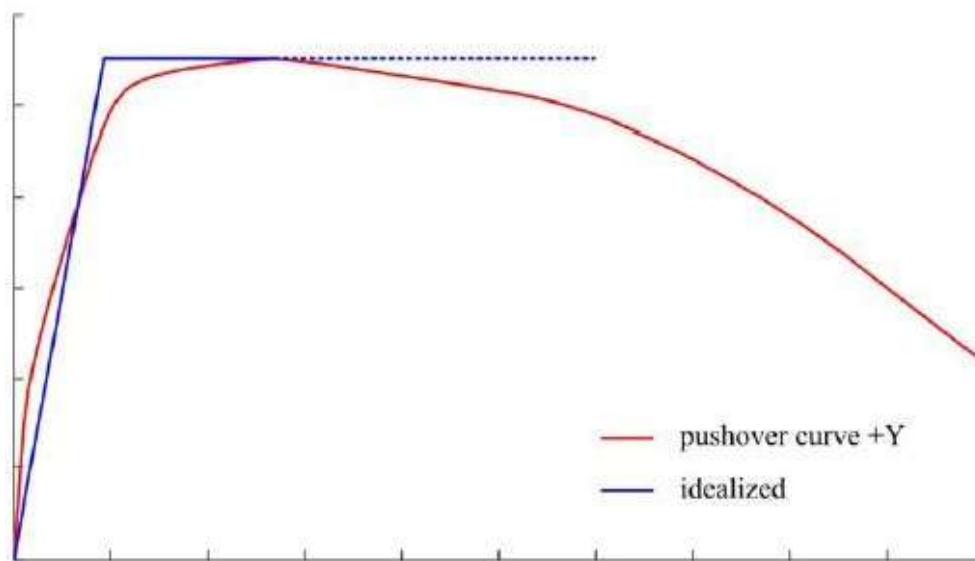


Figura 39: Ejemplo de transformación del espectro de capacidad a la curva bilineal (Modificada de Matjaž Dolšek, 2011)

Una vez obtenida esta curva bilineal se deben encontrar diversos factores como el factor de reducción (R), la ductilidad (μ) y el periodo ideal (T_{ideal}), recogidos entre otros en el programa para *MatLab* preparado por el profesor Ávila Haro. Estos factores (Figura 40) serán los que ayudarán a convertir el espectro de demanda elástico en uno inelástico que satisfaga la demanda real del edificio concreto. La representación de esta curva inelástica no es trivial, por ese motivo, en este trabajo, en las gráficas aparecerá representado únicamente el espectro elástico como medida de referencia, pero teniendo en cuenta que todos los cálculos posteriores consideran dicho espectro inelástico, como debe ser. Para más información acerca de estos factores pueden consultar el “*PBEE toolbox – Examples of application*” de Matjaž Dolšek (2011).

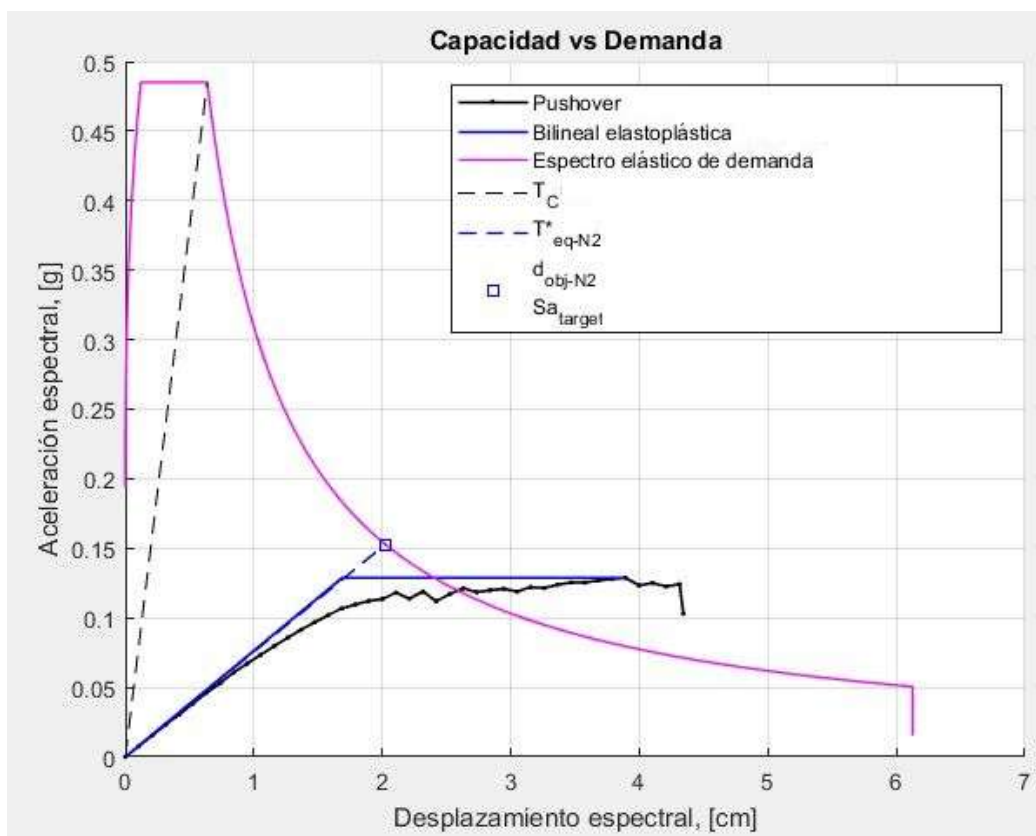


Figura 40: Ejemplo de gráfico capacidad vs. demanda en el que se pueden encontrar los factores comentados

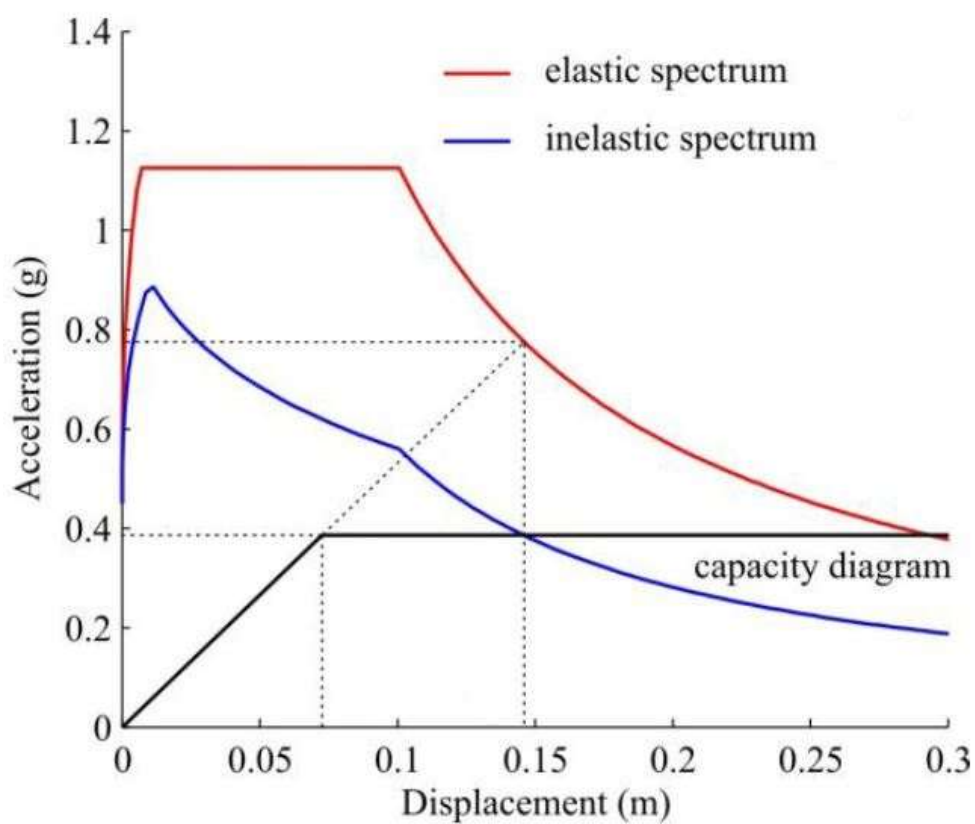


Figura 41: Ejemplo de transformación de un espectro elástico a un inelástico (modificada de Matjaž Dolšek, 2011)

6.6. Estados de daño

Con el objeto de poder estudiar los estados de daño se marcarán en la curva de capacidad bilineal los cuatro puntos señalados a continuación (Milutinovic & Trendafiloski, 2003):

$$\text{Estado de daño 1} = 0,7 \cdot Sd_y \quad (\text{Ec. 4})$$

$$\text{Estado de daño 2} = Sd_y \quad (\text{Ec. 5})$$

$$\text{Estado de daño 3} = Sd_y + 0,25 \cdot (Sd_u - Sd_y) \quad (\text{Ec. 6})$$

$$\text{Estado de daño 4} = Sd_u \quad (\text{Ec. 7})$$

Donde:

Sd_y : Desplazamiento espectral de fluencia (yielding)

Sd_u : Desplazamiento espectral último

Al no estar muy claros los umbrales de daño reales según estas fórmulas, se ha decidido, siguiendo el ejemplo de Martínez Castillo (Martínez Castillo, 2009), usar estas fórmulas para representar los umbrales de la siguiente manera (Figura 42):

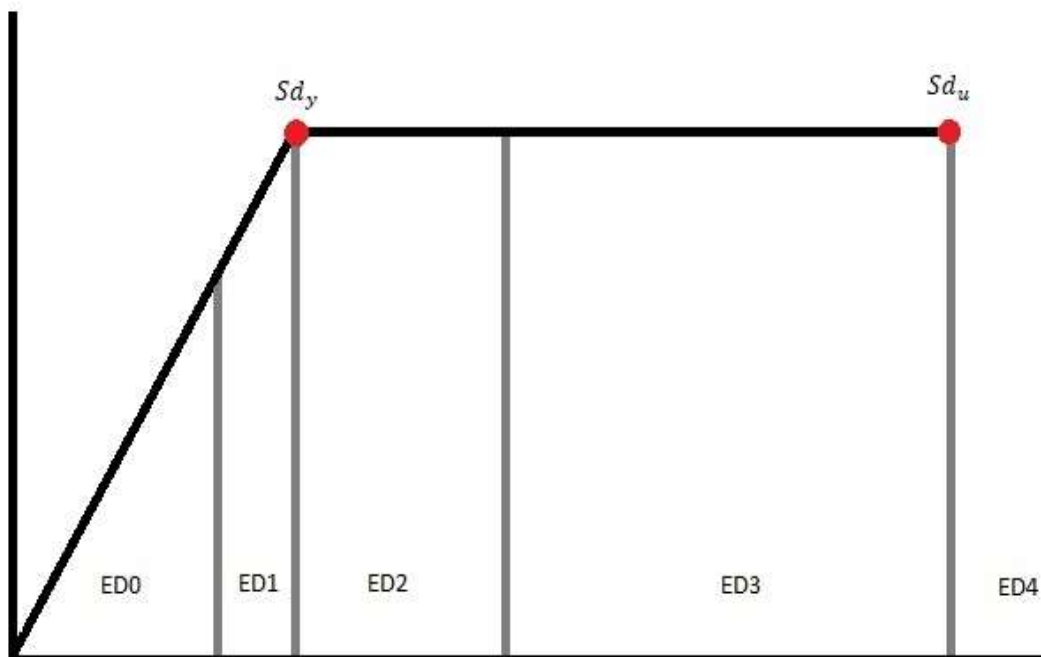


Figura 42: Umbrales de daño

La probabilidad de alcanzar un estado de daño se calcula mediante unas curvas de fragilidad y el desplazamiento espectral del punto de desempeño del edificio seleccionado. Para calcular estas curvas de fragilidad se debe usar la siguiente expresión de distribución log-normal:

$$P \left[ED \geq \frac{ED_i}{S_d} \right] = \Phi \left[\frac{1}{\beta_{ED_i}} \ln \left(\frac{S_d}{\bar{S}_{dED_i}} \right) \right] \quad (\text{Ec. 8})$$

Donde:

\bar{S}_{dED_i} : Valor medio del desplazamiento espectral en el que se alcanza el estado de daño ED_i

β_{ED_i} : Desviación estandar del logaritmo natural de este desplazamiento espectral

Φ : Función de distribución normal estandar acumulada

A partir de estas fórmulas se graficarán las curvas de fragilidad (Figura 43) y conociendo el desplazamiento espectral del punto de desempeño se averiguarán los porcentajes de ocurrencia de cada uno de los estados de daño para ese caso concreto.

Estas curvas de capacidad se muestran en un gráfico que compara la probabilidad de ocurrencia con el desplazamiento espectral. Con tal de discernir cuales son estas probabilidades, se creará un histograma con las probabilidades de ocurrencia de estos estados de daño, para que se pueda ver con más claridad.

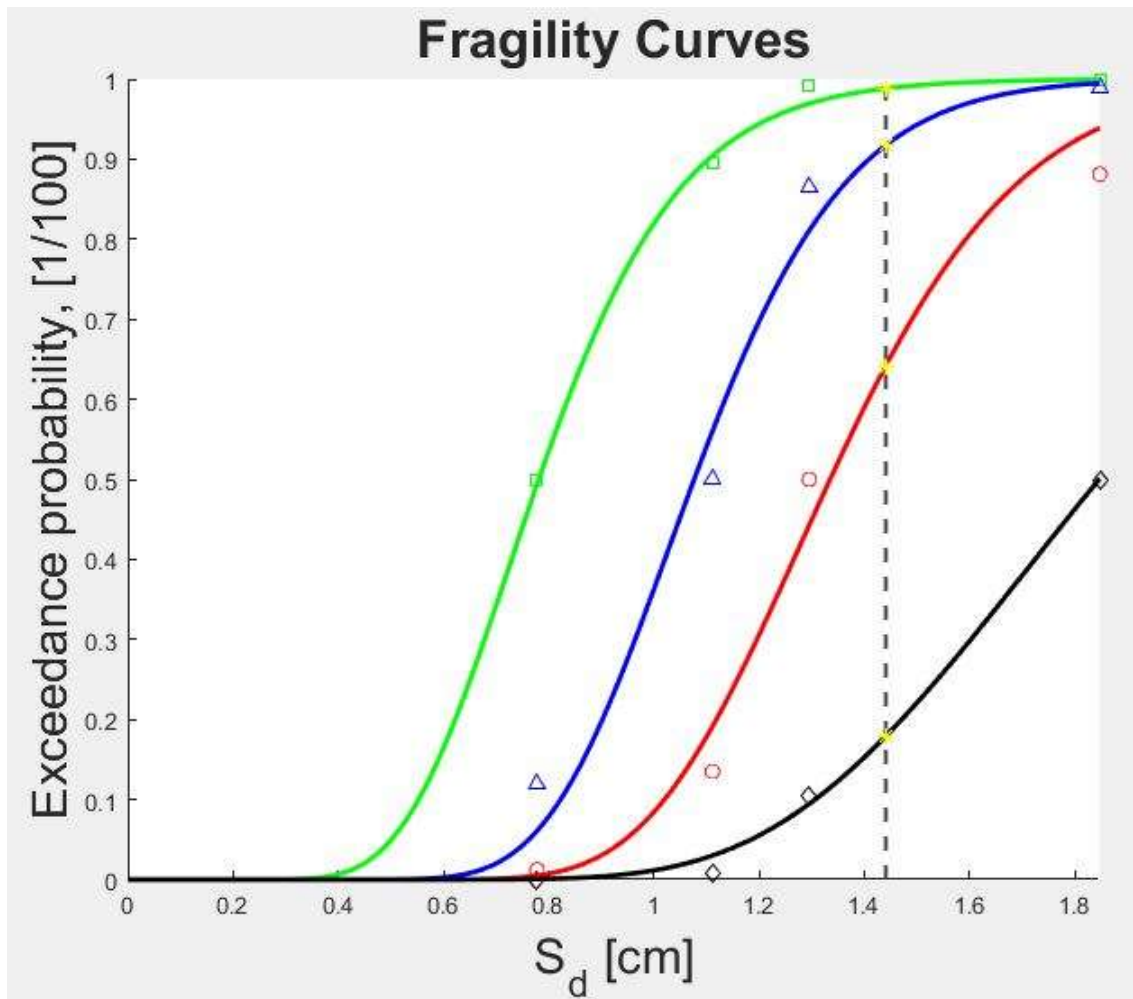


Figura 43: Ejemplo de un gráfico de las curvas de fragilidad

A partir de estos datos se desarrollarán las conclusiones del trabajo, según la probabilidad de que un estado de daño pueda ocurrir en el edificio seleccionado.

7. Cálculos y resultados

Mediante el programa *TreMuri* se ha diseñado el modelo en tres dimensiones del edificio seleccionado (E-01). Este diseño que tiene en cuenta todos los elementos estructurales del edificio y sus características es esencial para poder extraer la información necesaria para el proyecto.

7.1. Modelo 3D

Planta baja:

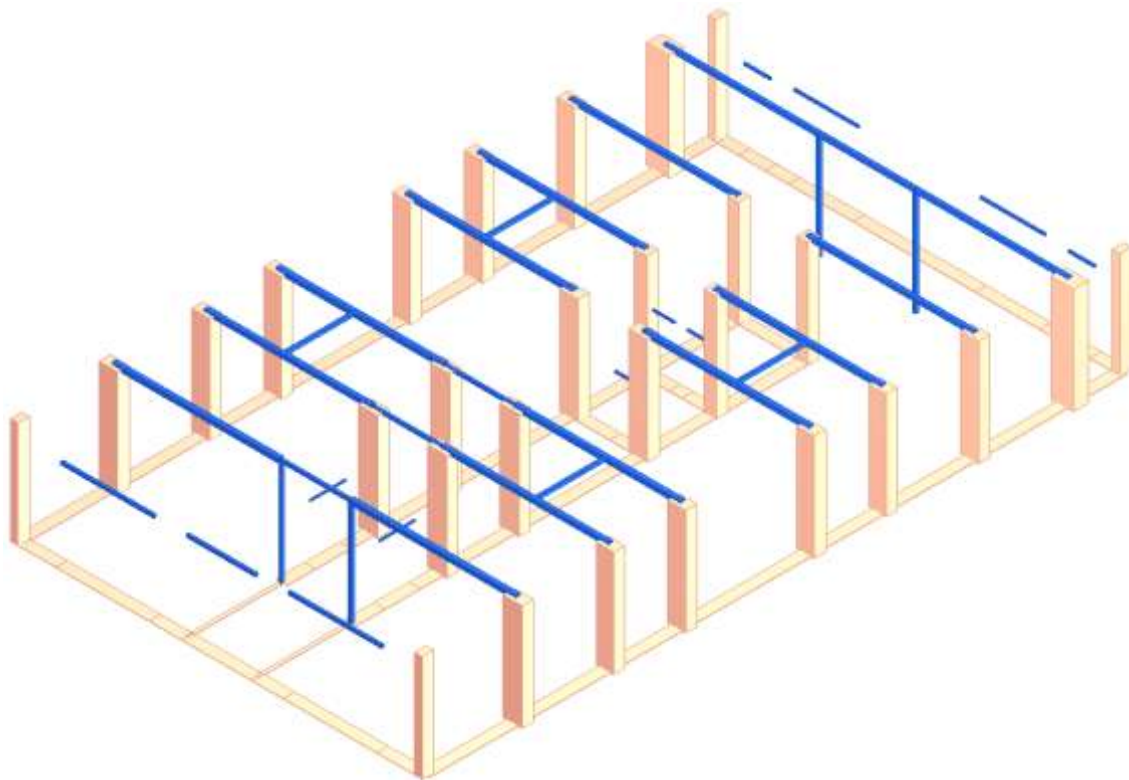


Figura 44: Columnas y dinteles (misma disposición que en plantas superiores) de la planta baja del edificio

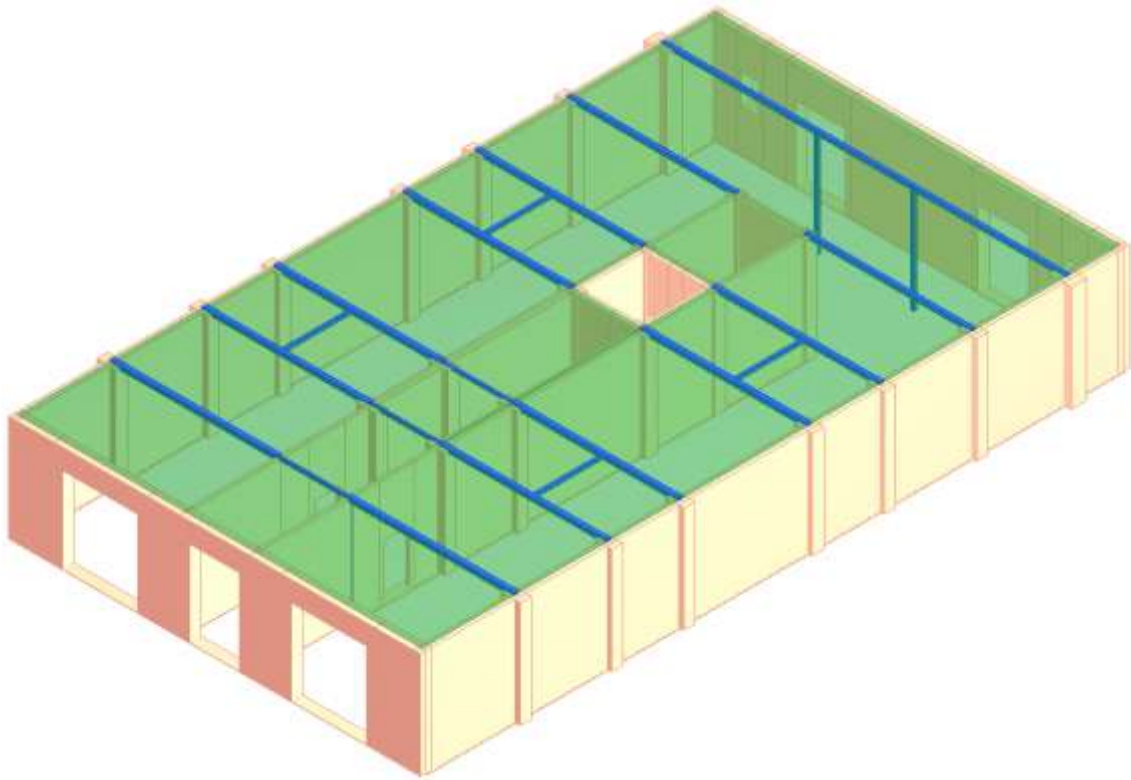


Figura 45: Modelo de la planta baja del edificio

Plantas superiores:

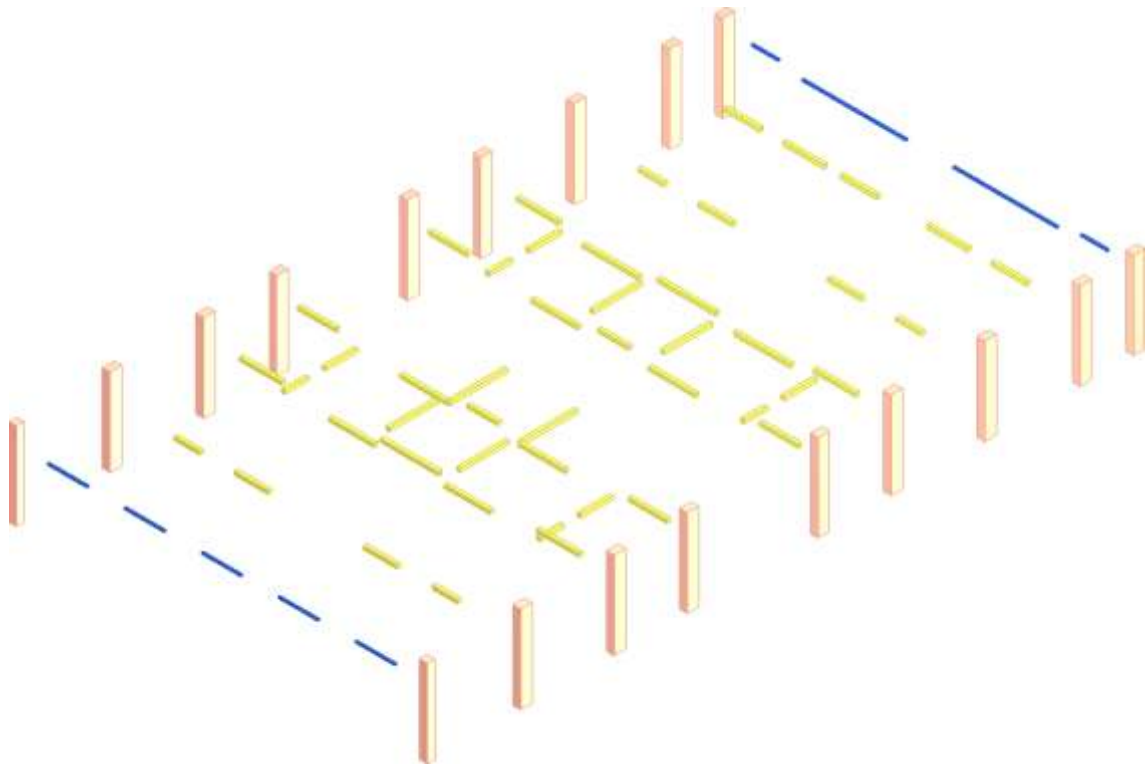


Figura 46: Columnas y dinteles de la planta tipo del edificio

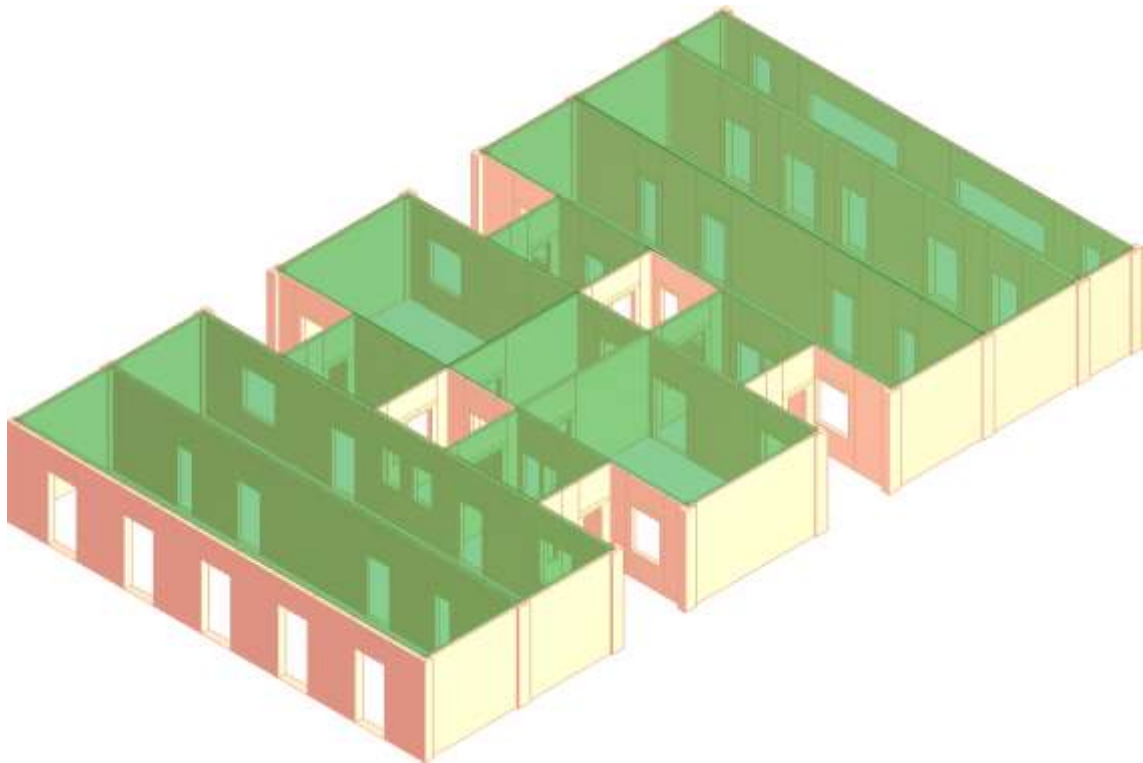


Figura 47: Modelo de la planta tipo del edificio

Modelo completo:

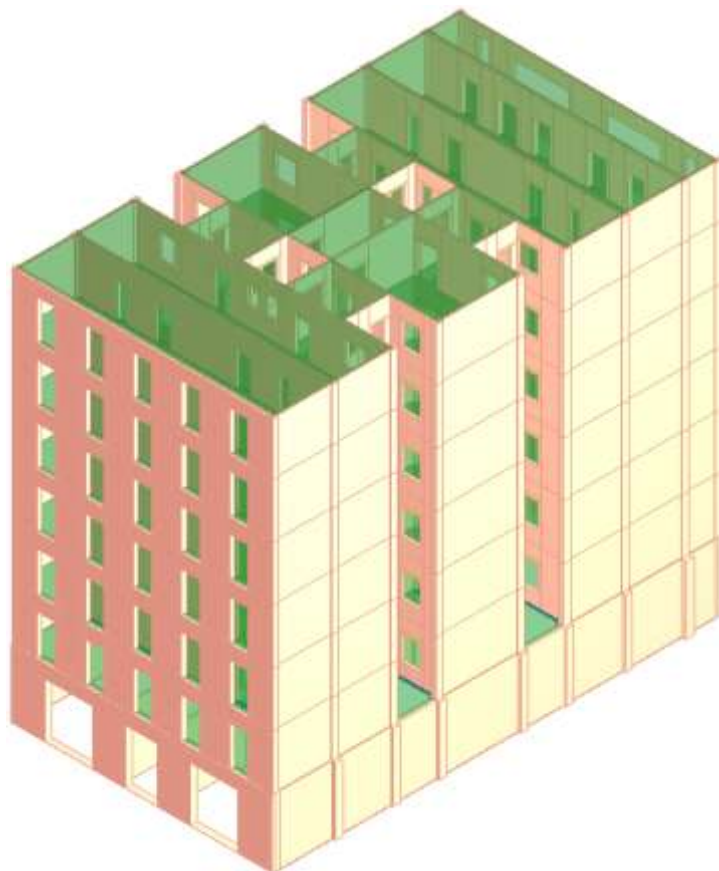


Figura 48: Modelo completo del edificio

7.2. Hipótesis de estudio

El estudio de este proyecto consistirá en comparar, como se ha explicado anteriormente, dos escenarios en los cuáles la única diferencia será la calidad y características (i.e. propiedades mecánicas) de los materiales utilizados en cada planta. Para trabajar en *TreMuri*, es necesario conocer los valores para las siguientes propiedades mecánicas de los materiales: el módulo de elasticidad o de Young (E), el módulo de cortante (G), el esfuerzo de cortante (τ), la resistencia a compresión (f_m) y el peso específico (w).

7.2.1. Primera hipótesis

Como se ha comentado anteriormente, en los años en los que se construyó el edificio, la calidad de los materiales era muy dispar entre unos y otros. Estas diferencias en las características, calidades y por ende comportamiento de las diversas piezas eran conocidas y mitigadas mediante la colocación de los materiales con mejores características en las plantas bajas, y de aquellos con propiedades inferiores en las plantas superiores. Debido a esto, en la primera hipótesis de este trabajo se tendrá en cuenta una distribución de propiedades mecánicas capaces de representar lo expuesto anteriormente.

Para encontrar los valores necesarios se adoptarán 1000 valores que estén entre los límites indicados para mampostería no reforzada (Tabla 5) siguiendo una distribución normal (Figura 49).

Para el caso del peso específico usaremos el valor estándar para la mampostería no reforzada, que es igual a 18 kN/m^3 :

Tabla 5: Valores límite de las propiedades mecánicas para mampostería no reforzada

	f_m [N/cm ²]	E [N/cm ²]	G [N/cm ²]	τ [N/cm ²]
Límite inferior	215,00	107500	35833	6,45
Valor medio	300,00	150000	50000	9,00
Límite superior	385,00	192500	64167	11,55

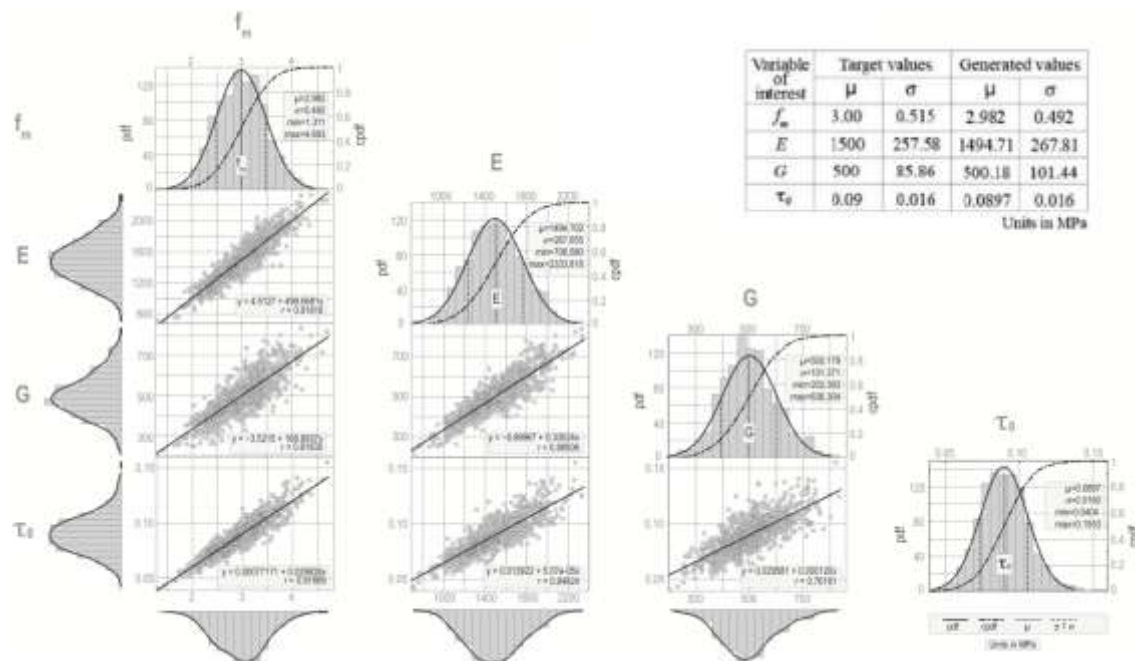


Figura 49: Histogramas y funciones de distribución de la simulación de las propiedades mecánicas para mampostería (Fuente: Ávila Haro et al, 2017)

Hechos los cálculos, se ha procedido a dividir estos valores en siete franjas que simulan los siete pisos que tiene el edificio siguiendo una distribución normal (Figura 50, Figura 51, Figura 52 y Figura 53):

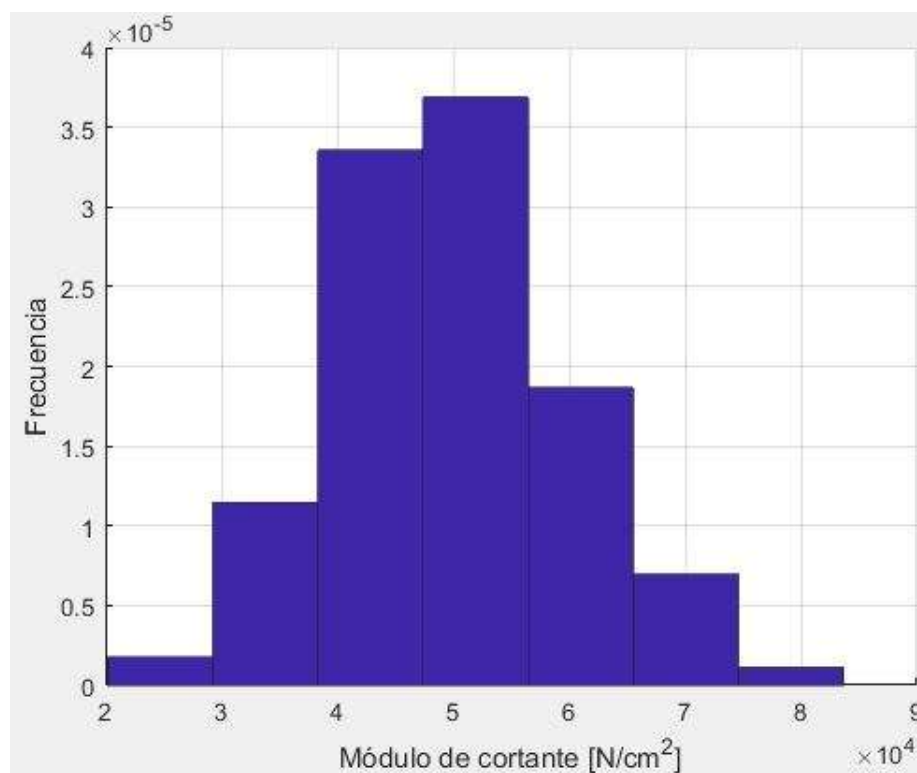


Figura 50: Histograma para el módulo de cortante

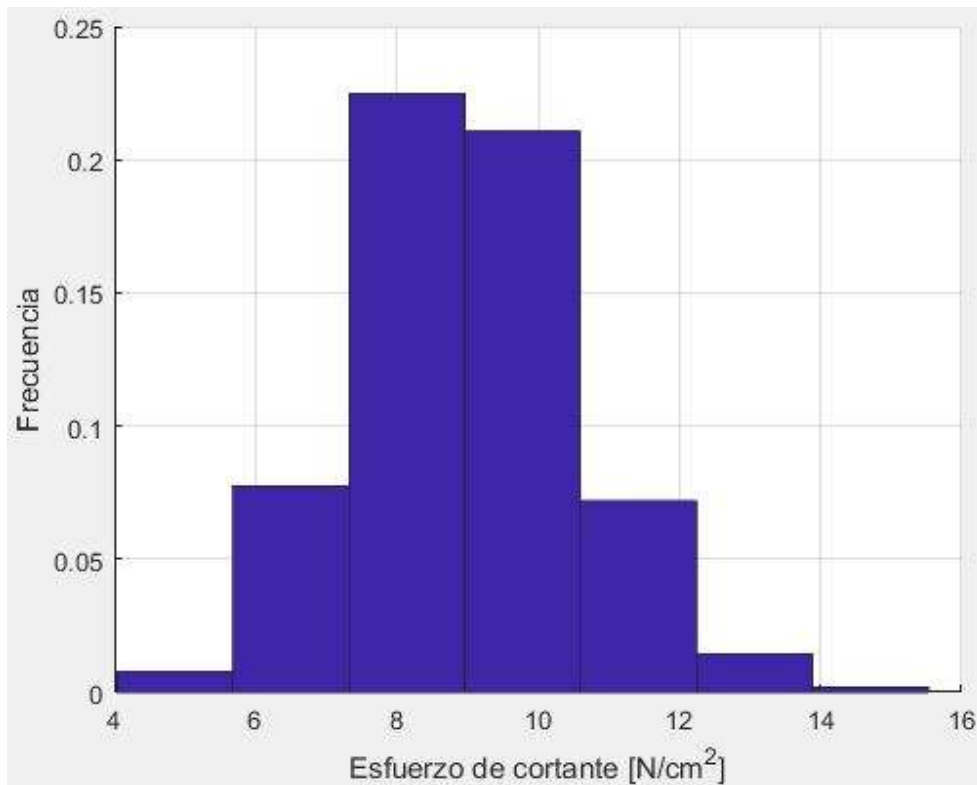


Figura 51: Histograma del esfuerzo de cortante

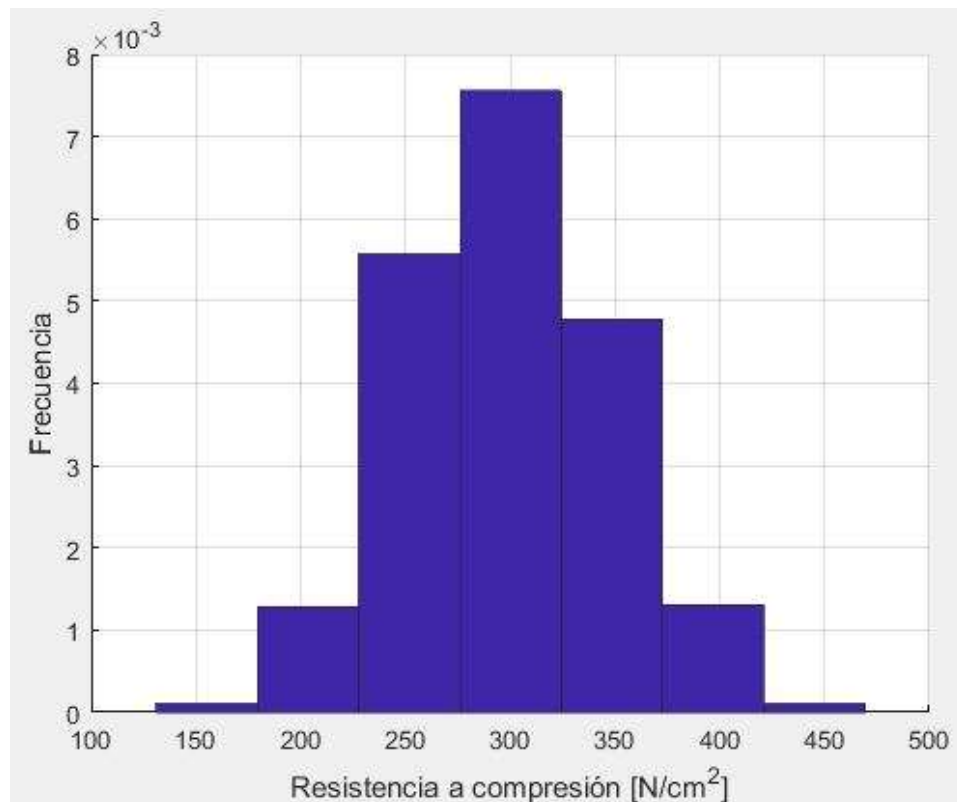


Figura 52: Histograma de la resistencia a compresión

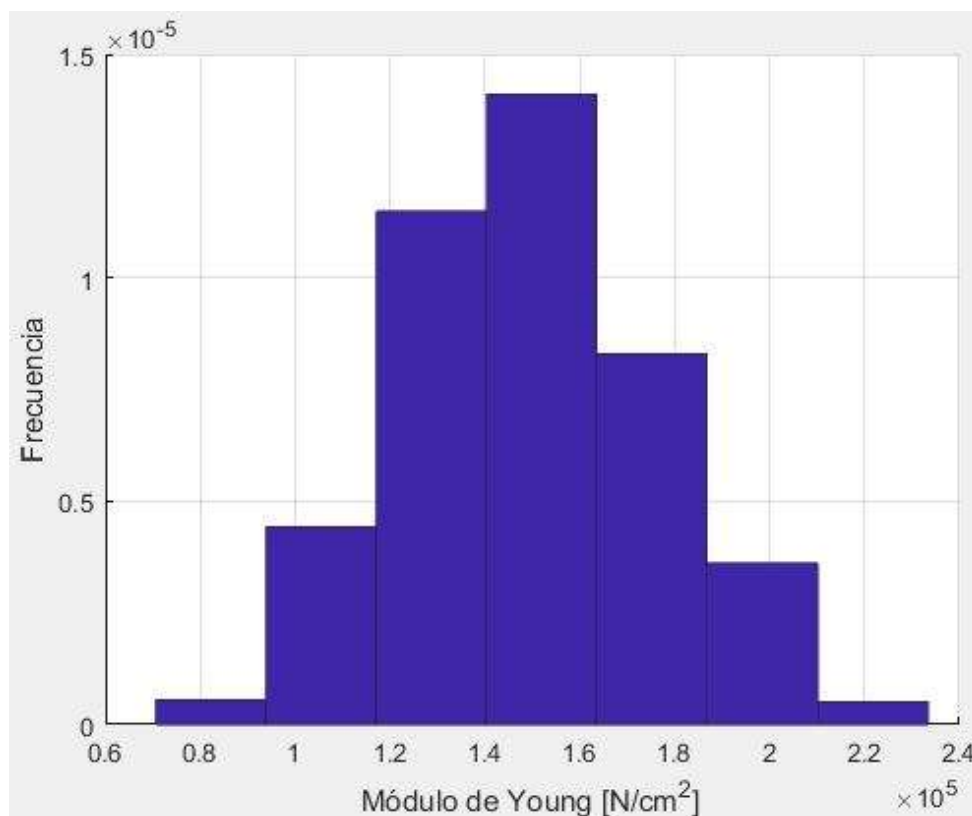


Figura 53: Histograma del módulo de Young

A partir de esta división, se ha escogido el valor medio de cada franja, como valor de cada una de las diferentes propiedades para cada piso o nivel. Los valores definitivos son los siguientes (Tabla 6):

Tabla 6: Valores de las propiedades de los materiales en la primera hipótesis

Nivel	f_m [N/cm ²]	E [N/cm ²]	G [N/cm ²]	τ [N/cm ²]
1	445,1176	221770	79109	14,7104
2	396,8108	198520	70052	13,0684
3	348,5040	175270	60995	11,4264
4	300,1972	152020	51938	9,7845
5	251,8905	128780	42881	8,1425
6	203,5837	105530	33824	6,5005
7	155,2769	82280	24767	4,8586

7.2.2. Segunda hipótesis

La segunda hipótesis consistirá en mantener una calidad de materiales uniforme para todos los pisos del edificio. El hecho de que la fabricación de materiales haya avanzado tanto estos

últimos años, nos da la posibilidad de crear materiales con una calidad mucho más uniforme que en épocas pasadas. Este segundo escenario, pues, nos dará una visión del desempeño que tendría el edificio si se usaran los valores medios de calidad de este material para todas las plantas.

Así pues, los valores usados para las calidades serán los mismos para todas las plantas. Éstos se muestran a continuación (Tabla 7):

Tabla 7: Valores de las propiedades de los materiales en la segunda hipótesis

Nivel	f_m [N/cm ²]	E [N/cm ²]	G [N/cm ²]	τ [N/cm ²]
1	300,00	150000	50000	9,00
2	300,00	150000	50000	9,00
3	300,00	150000	50000	9,00
4	300,00	150000	50000	9,00
5	300,00	150000	50000	9,00
6	300,00	150000	50000	9,00
7	300,00	150000	50000	9,00

7.3. Análisis modal

7.3.1. Primera hipótesis

Tabla 8: Análisis modal de justificación de los cálculos con el primer modo

Dirección	Orden	Periodo [s]	m_x [kg]	M_x [%]	m_y [kg]	M_y [%]
X	1	0,78876	2.056.962	80,99	10	0
	2	0,29911	345.720	13,61	385	0,02
	3	0,16455	45.186	1,78	1	0
Σ 96,38 %						
Y	1	0,85509	13	0	1.729.545	68,1
	2	0,30246	334	0,01	396.002	15,59
	3	0,17993	2	0	119.915	4,72
Σ 88,41 %						

7.3.2. Segunda Hipótesis

Tabla 9: Análisis modal de justificación de los cálculos con el primer modo

Dirección	Orden	Periodo [s]	mx [kg]	Mx [%]	my [kg]	My [%]
X	1	0,74382	2.139.460	84,24	2	0
	2	0,64896	73.898	2,91	2	0
	3	0,26113	250.129	9,85	54	0
Σ 97 %						
Y	1	0,77007	2	0	1.889.445	74,4
	2	0,25691	37	0	353.718	13,93
	3	0,1505	2	0	108.943	4,29
Σ 92,62 %						

Con el fin de justificar los cálculos, como se ha comentado en el apartado 6.2, se ha hecho un análisis modal que ha tenido los resultados mostrados en las Tablas 8 y 9.

De los 21 modos demandados a *TreMuri* se han escogido los tres primeros de cada dirección. Como se puede comprobar en ambas tablas, la cantidad de porcentaje de masa movido (i.e. activado) por el primer modo en comparación con el resto es muy grande. De estos datos se puede sacar la conclusión de que el primer modo da una información veraz sobre cómo trabaja el edificio ante una demanda sísmica, y por tanto, será el que usemos para nuestro análisis.

7.4. Análisis

Para cada hipótesis se calcularán tres curvas de capacidad o *pushover* diferentes que coincidirán con las direcciones positiva y negativa de las coordenadas X e Y (Figura 54). En el caso de la dirección X, hay que tener en cuenta que el edificio es simétrico y que tanto muros como propiedades son iguales para ambos lados, con lo cual tan solo hará falta calcular uno de los dos *pushover*. Teniendo en cuenta que el número de hipótesis a trabajar en este proyecto es de dos, calcularemos un total de seis *pushovers* los cuales están listados a continuación:

- *Pushover* en la dirección X positiva de la primera hipótesis
- *Pushover* en la dirección Y positiva de la primera hipótesis
- *Pushover* en la dirección Y negativa de la primera hipótesis
- *Pushover* en la dirección X positiva de la segunda hipótesis
- *Pushover* en la dirección Y positiva de la segunda hipótesis
- *Pushover* en la dirección Y negativa de la segunda hipótesis

Las direcciones en las que trabajará el edificio serán las siguientes (Figura 54):

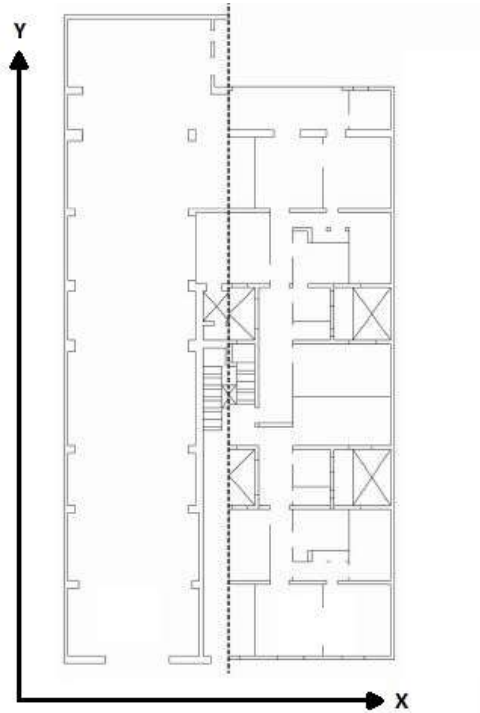


Figura 54: Coordenadas del edificio seleccionado (modificado de Gonzalez-Drigo et al., 2016)

Con tal de poder ver como se desplaza el edificio en el primer modo, se ha graficado con *TreMuri* un ejemplo del movimiento de cada planta en comparación con el plano original del nivel en cuestión:

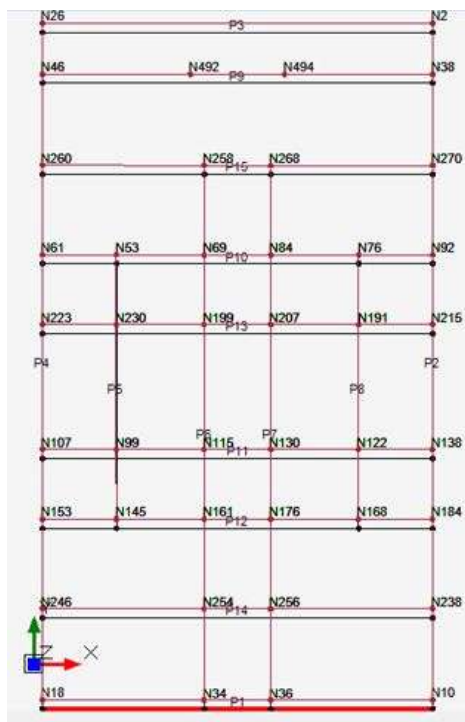


Figura 55: Movimiento del nivel 1 del edificio en el primer modo

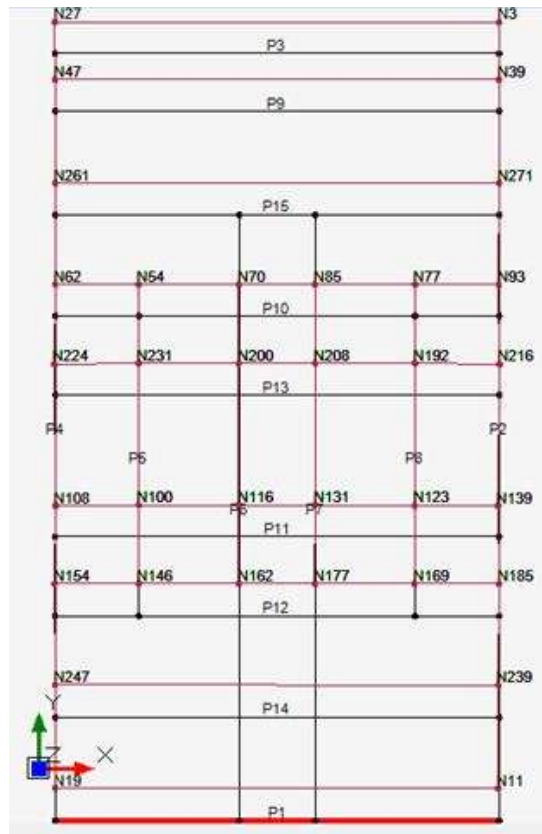


Figura 56: Movimiento del nivel 2 del edificio en el primer modo

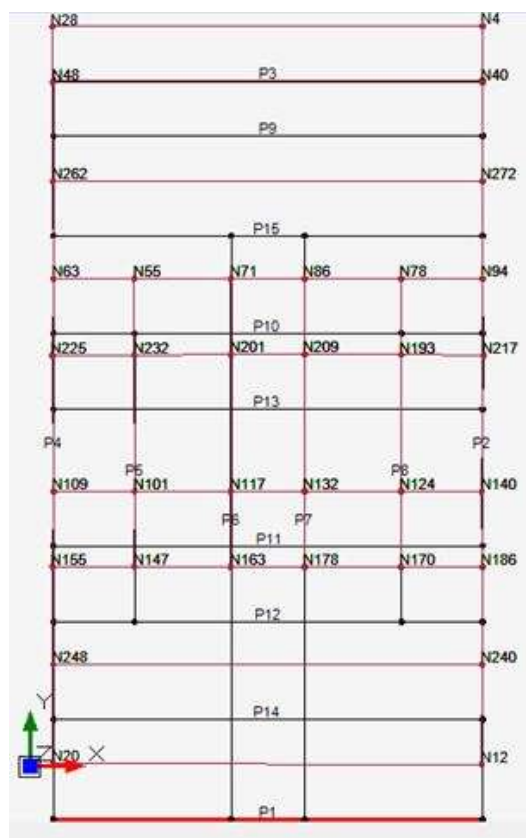


Figura 57: Movimiento del nivel 3 del edificio en el primer modo

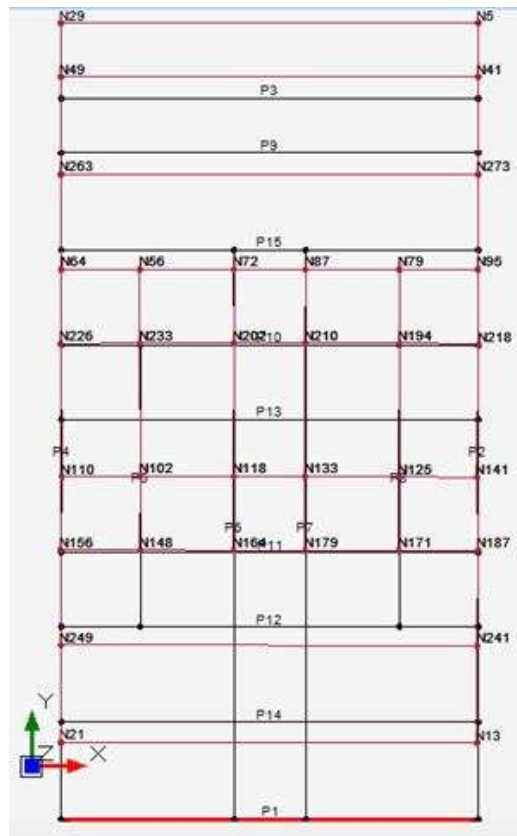


Figura 58: Movimiento del nivel 4 del edificio en el primer modo

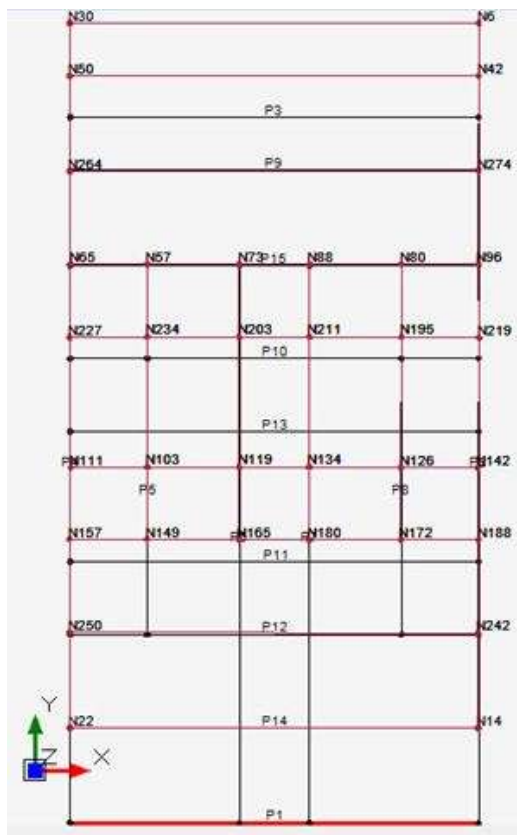


Figura 59: Movimiento del nivel 5 del edificio en el primer modo

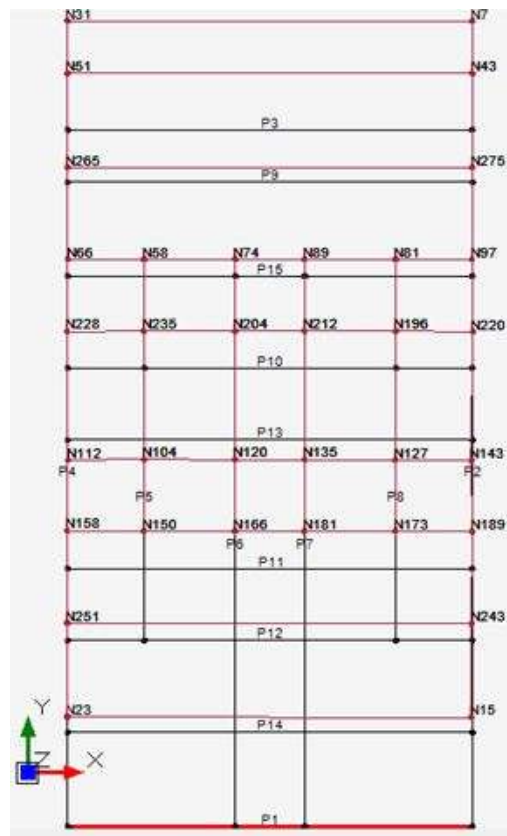


Figura 60: Movimiento del nivel 6 del edificio en el primer modo

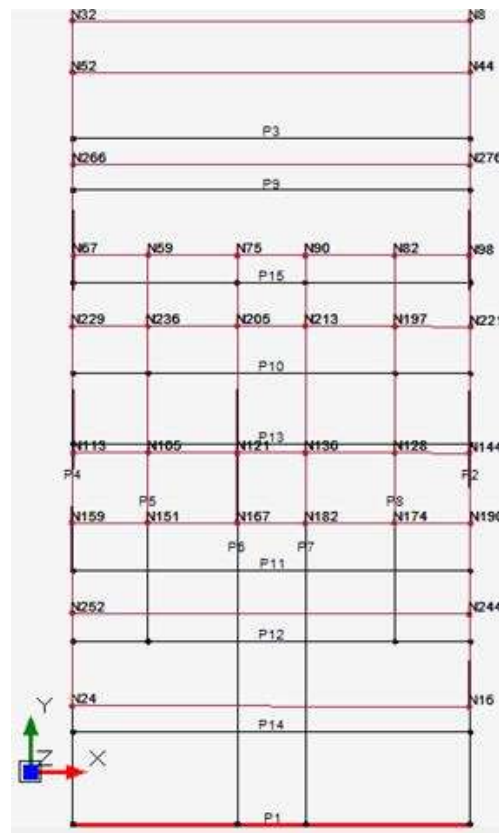


Figura 61: Movimiento del nivel 7 del edificio en el primer modo

7.4.1. Primera hipótesis

7.4.1.1. Análisis 1: dirección X positiva

Como se ha comentado en los diferentes apartados de la metodología, se procede a hacer el análisis del edificio. Primeramente, a partir de los datos de *TreMuri* y usando MatLab para graficar, se obtienen las curvas de capacidad (Figura 62) y el espectro de capacidad (Figura 63):

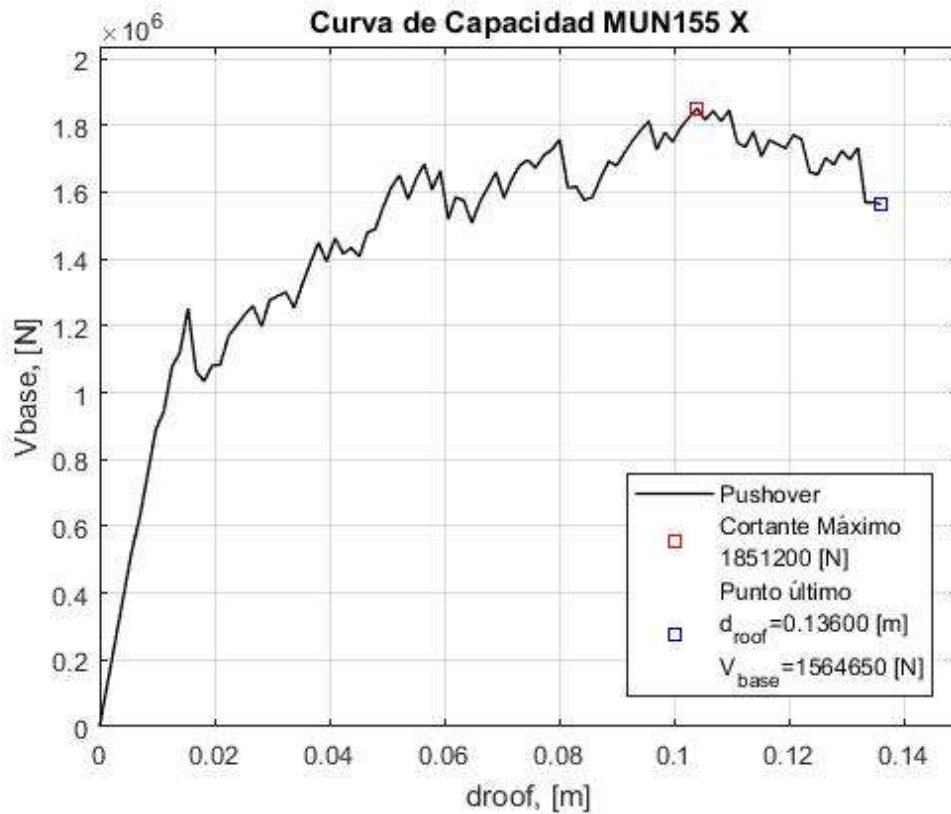


Figura 62: Curva de capacidad del edificio en la dirección positiva de las X

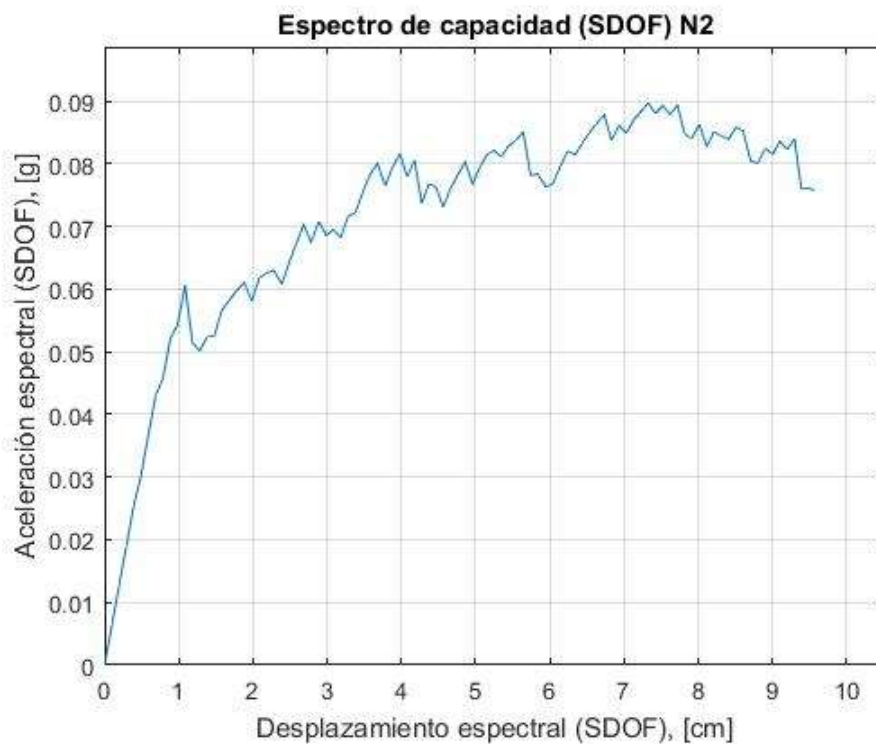


Figura 63: Espectro de capacidad del edificio en la dirección positiva de las X

Tras estas dos curvas, se debe graficar la bilineal y de ahí obtener el punto de desempeño del gráfico de capacidad contra demanda (Figura 64, Figura 65, Figura 66 y Figura 67):

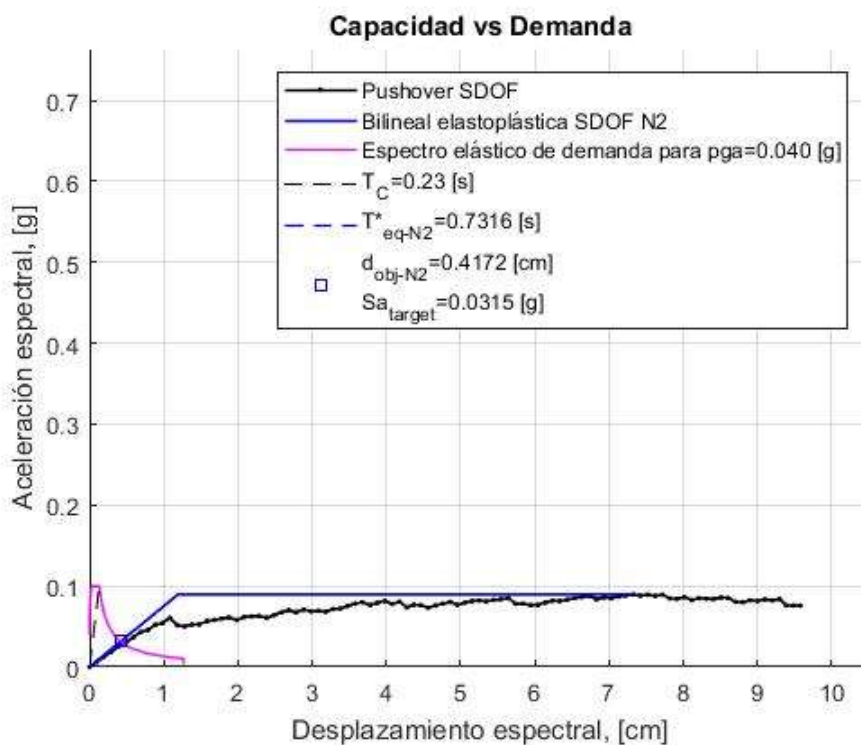


Figura 64: Curva de capacidad vs. demanda para un PGA=0,04g

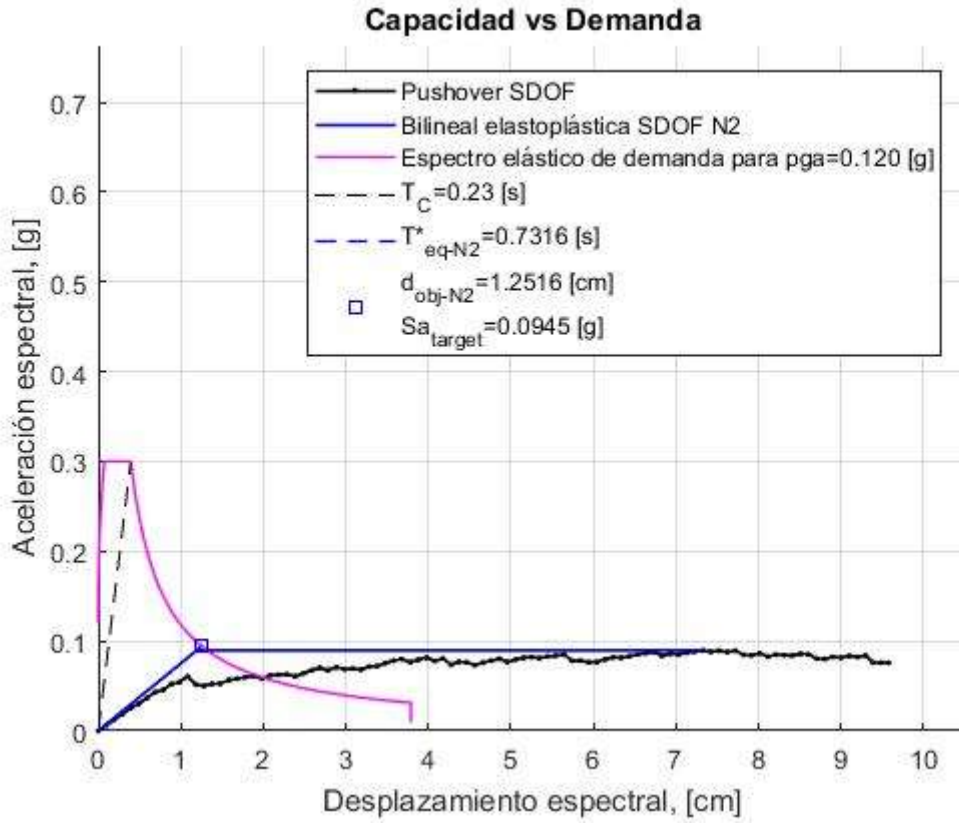


Figura 65: Curva de capacidad vs. demanda para un PGA=0,120g

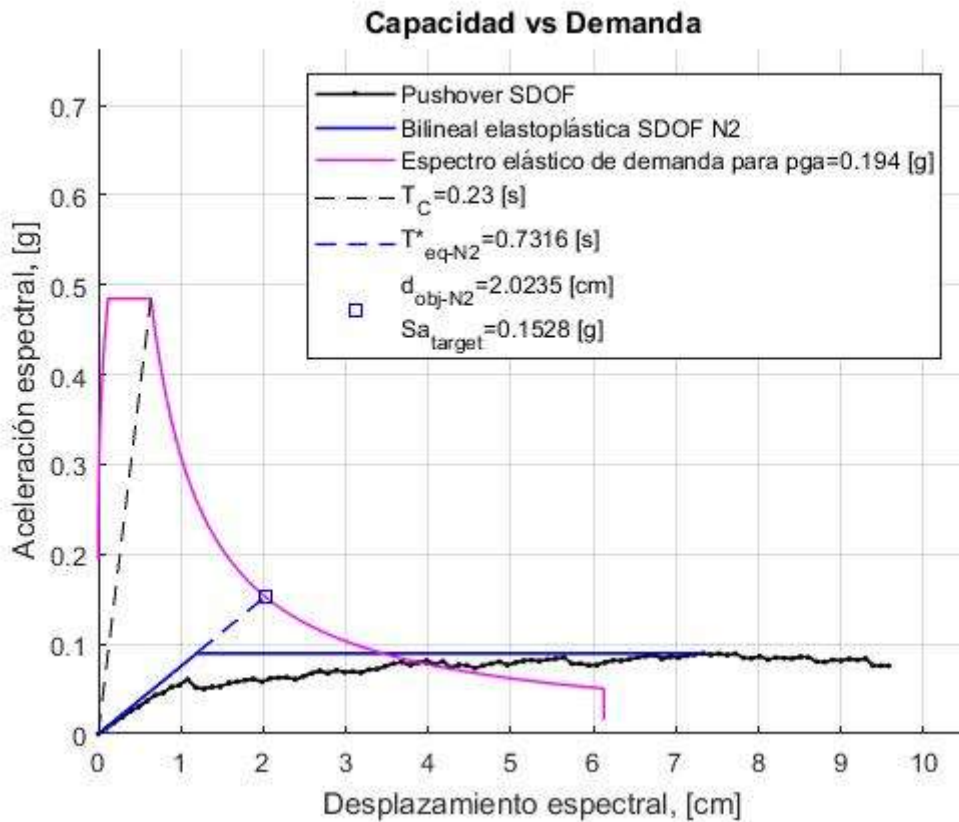


Figura 66: Curva de capacidad vs. demanda para un PGA=0,194g

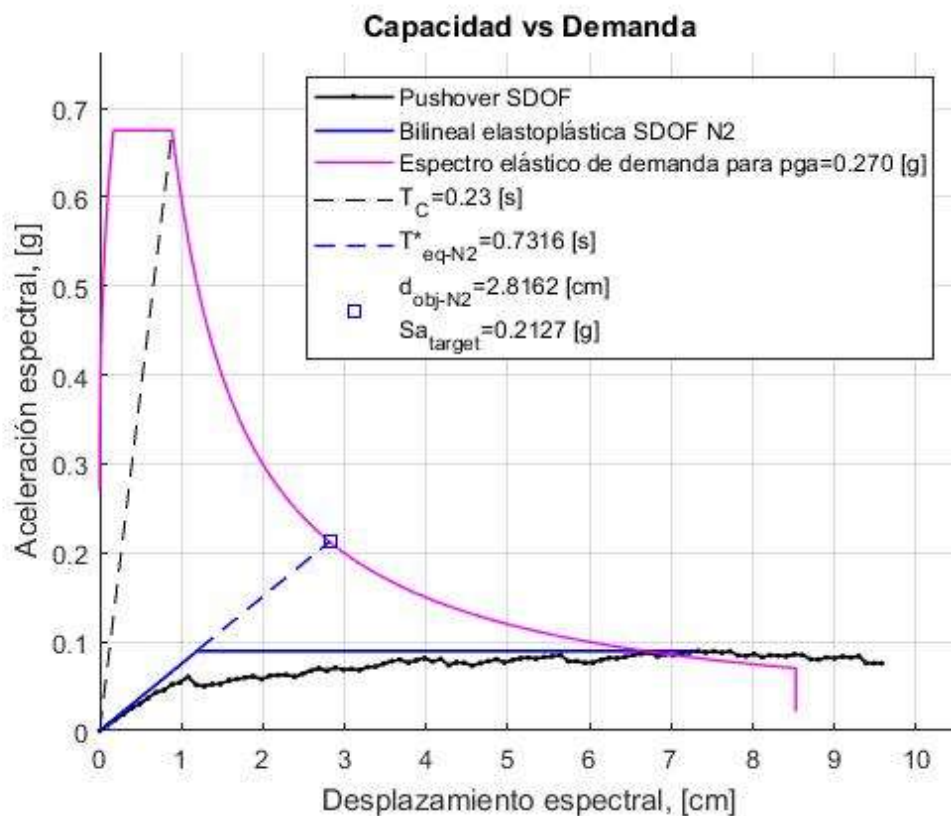


Figura 67: Curva de capacidad vs. demanda para un PGA=0,270g

Aun que no sea el fin de este trabajo, si fuera necesario, se podrían graficar las distintas curvas para tantos PGAs como se desee. En el siguiente gráfico se pueden ver los diferentes desplazamientos objetivos para PGAs desde 0,02g hasta 0,30g (Figura 68):

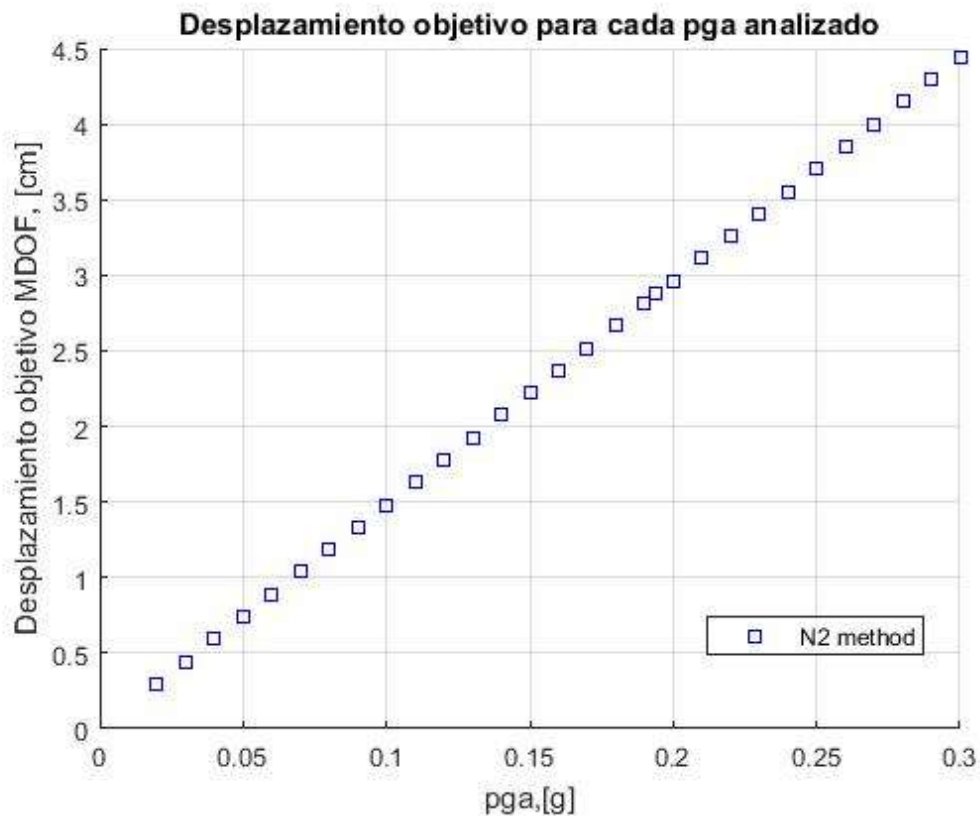


Figura 68: Desplazamiento objetivo para cada PGA analizado

Como se puede ver en esta figura, el gráfico sigue una función más o menos lineal, es decir, a medida que vamos aumentando el PGA, el desplazamiento objetivo del punto de desempeño aumenta proporcionalmente.

A partir de las dos acciones anteriores se pueden encontrar, como se ha mostrado, el desplazamiento objetivo deseado, que es el dato que nos servirá para, una vez creadas las curvas de fragilidad, averiguar qué porcentaje de cada estado de daño puede ocurrir según el PGA escogido (Figura 69). En nuestro caso, como hemos explicado anteriormente, los PGAs seleccionados han sido 0,04g (para tener en cuenta las normativas, tanto NCSE-02 como EC8) y 0,194g (PGA específico del trabajo de microzonación de Irizarry):

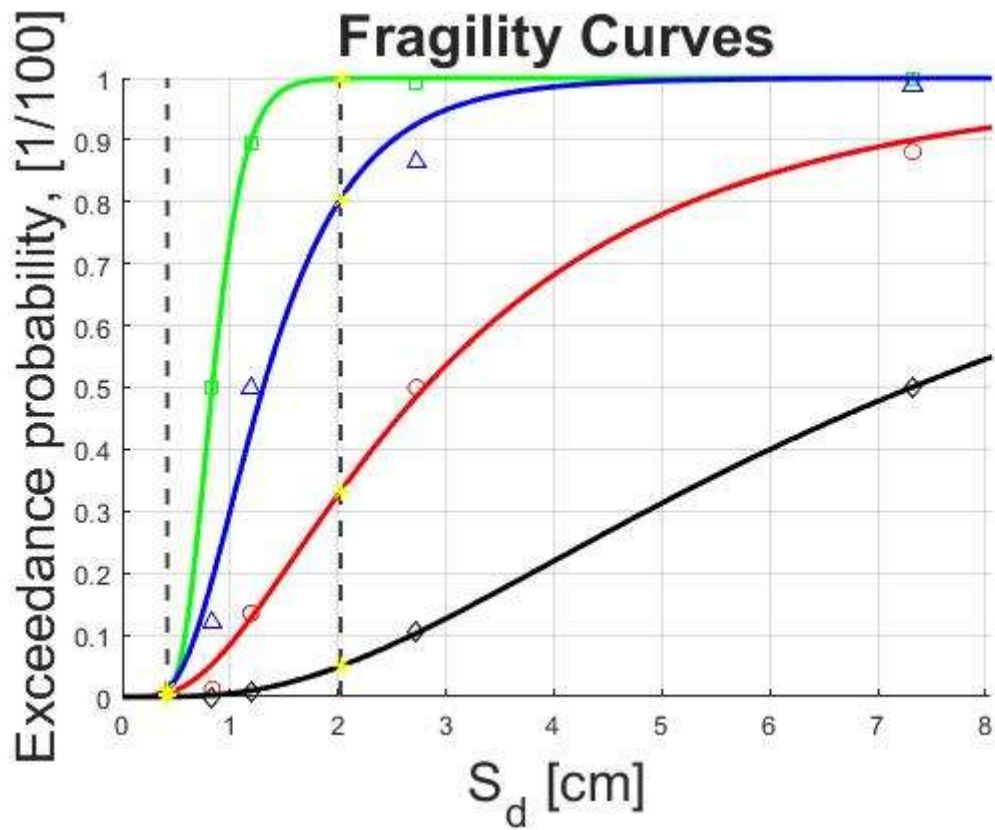


Figura 69: Curvas de fragilidad del edificio con los desplazamientos objetivo para $PGA=0,04$ y $PGA=0,194$

7.4.1.2. Análisis 2: dirección Y positiva

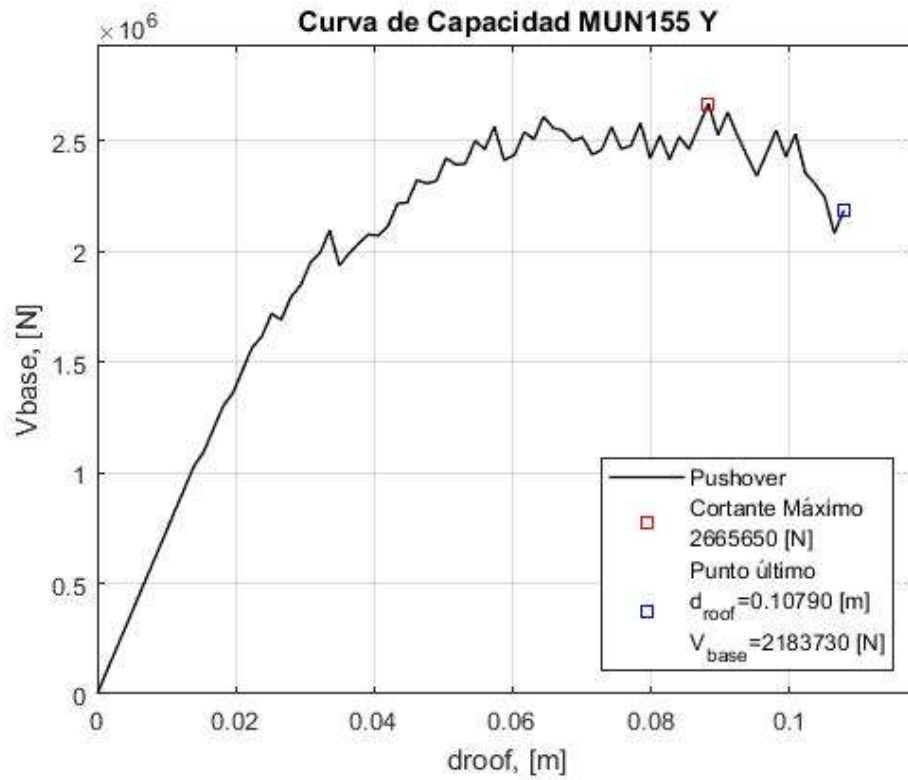


Figura 70: Curva de capacidad del edificio en la dirección positiva de las Y

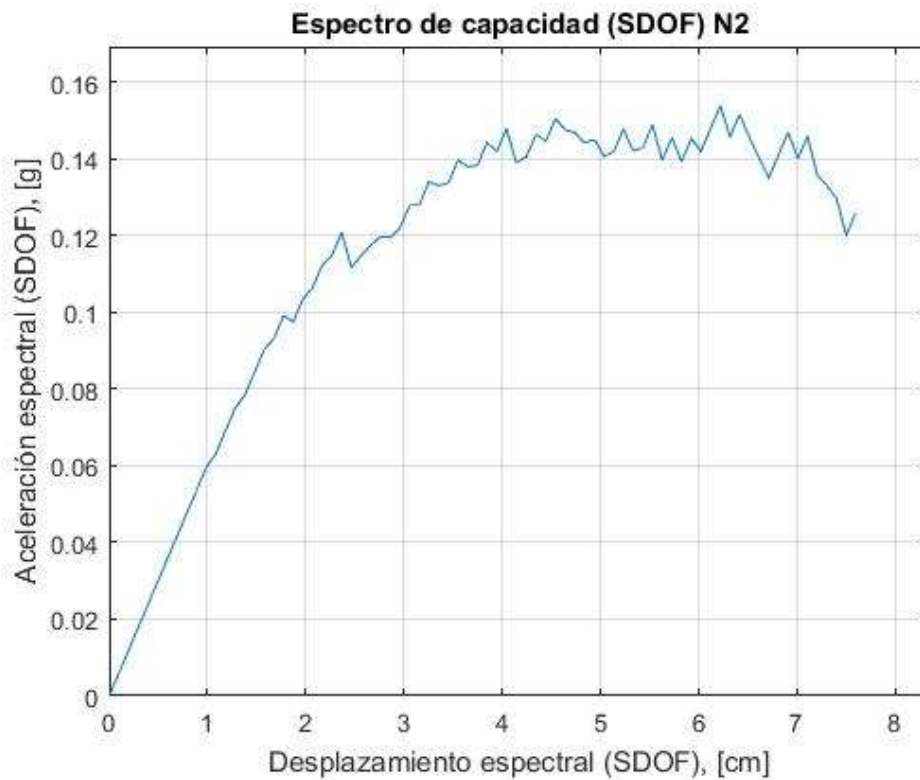


Figura 71: Espectro de capacidad del edificio en la dirección positiva de las Y

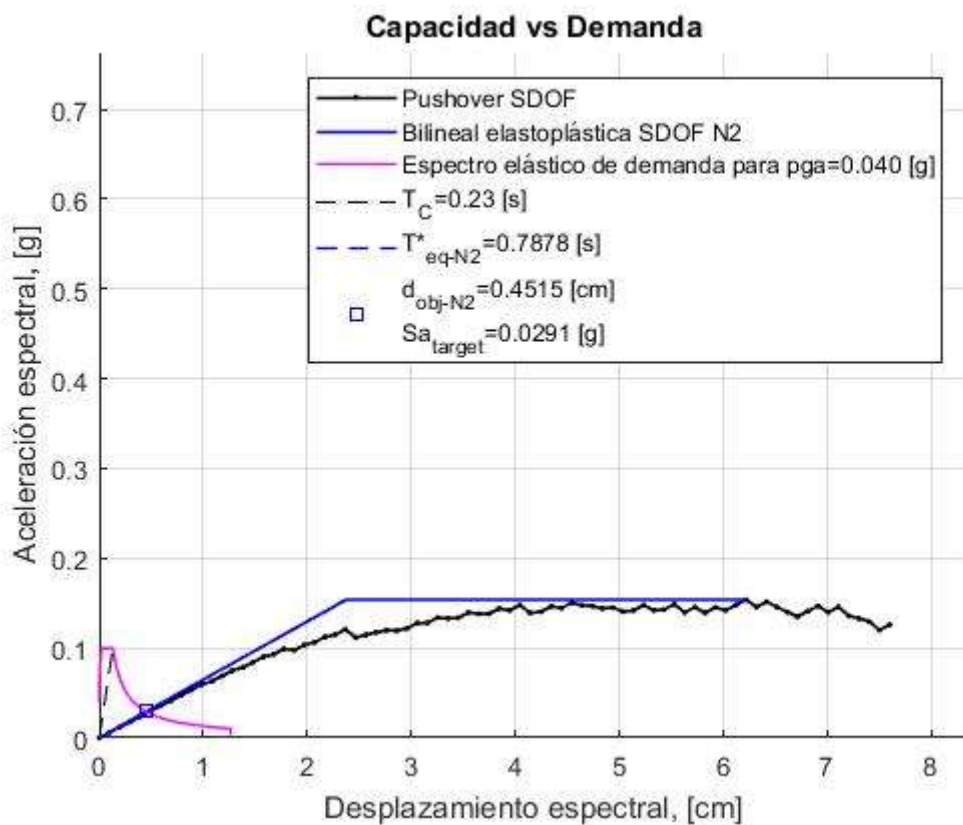


Figura 72: Curva de capacidad vs. demanda para un PGA=0,04g

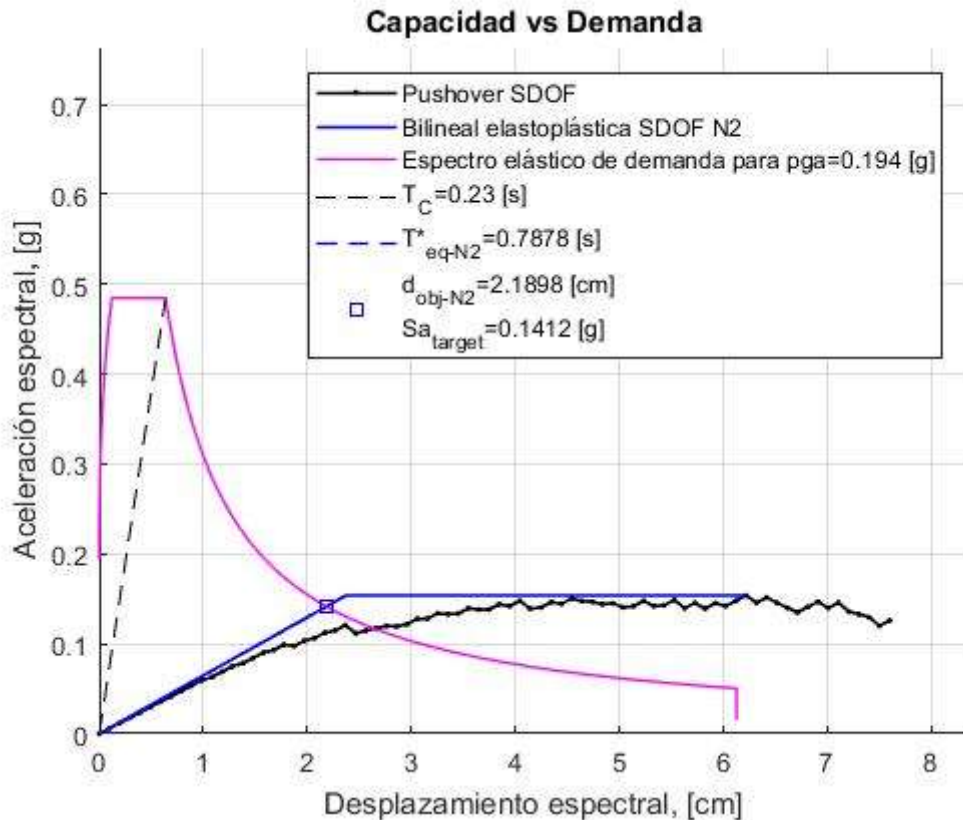


Figura 73: Curva de capacidad vs. demanda para un PGA=0,194g

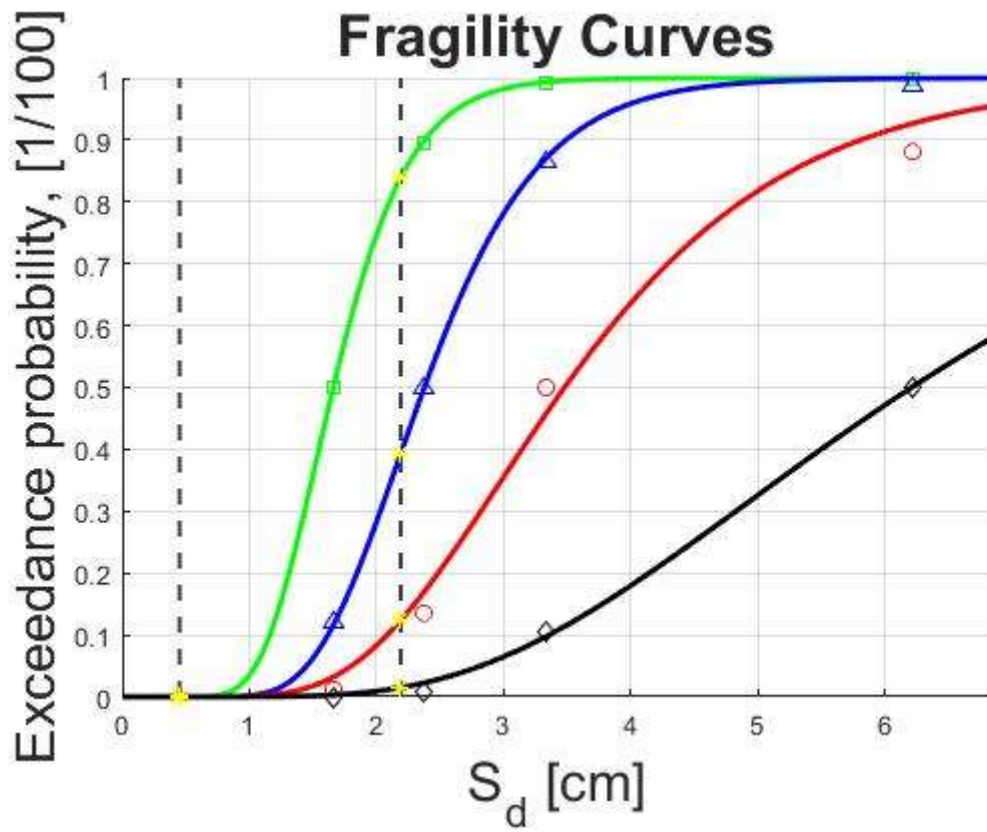


Figura 74: Curvas de fragilidad del edificio con los desplazamientos objetivo para PGA=0,04 y PGA=0,194

7.4.1.3. Análisis 3: dirección Y negativa

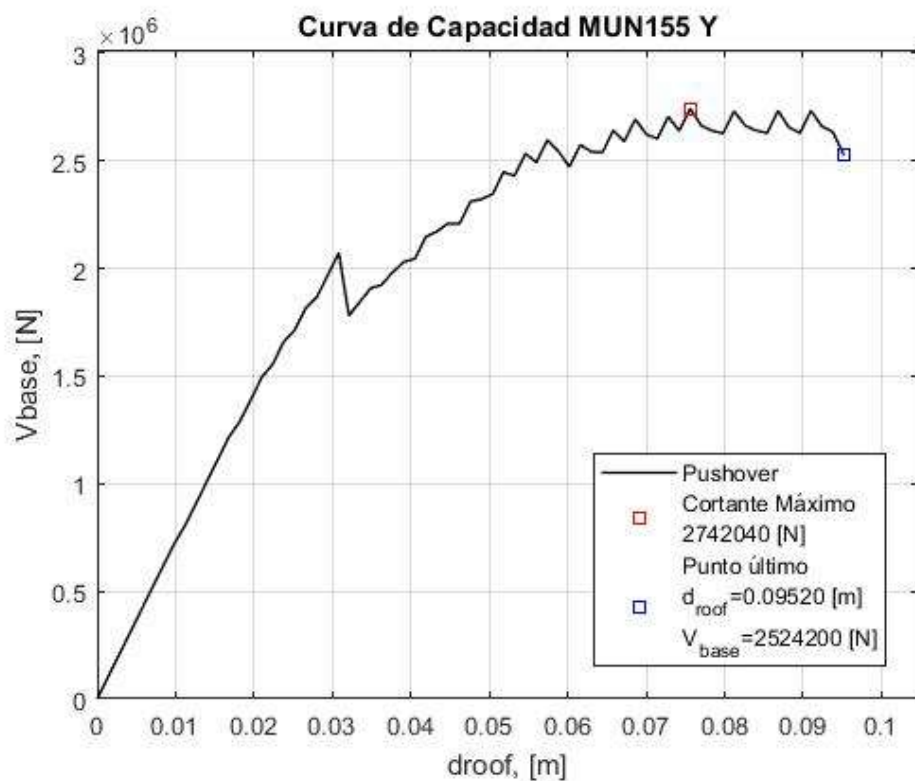


Figura 75: Curva de capacidad del edificio en la dirección negativa de las Y

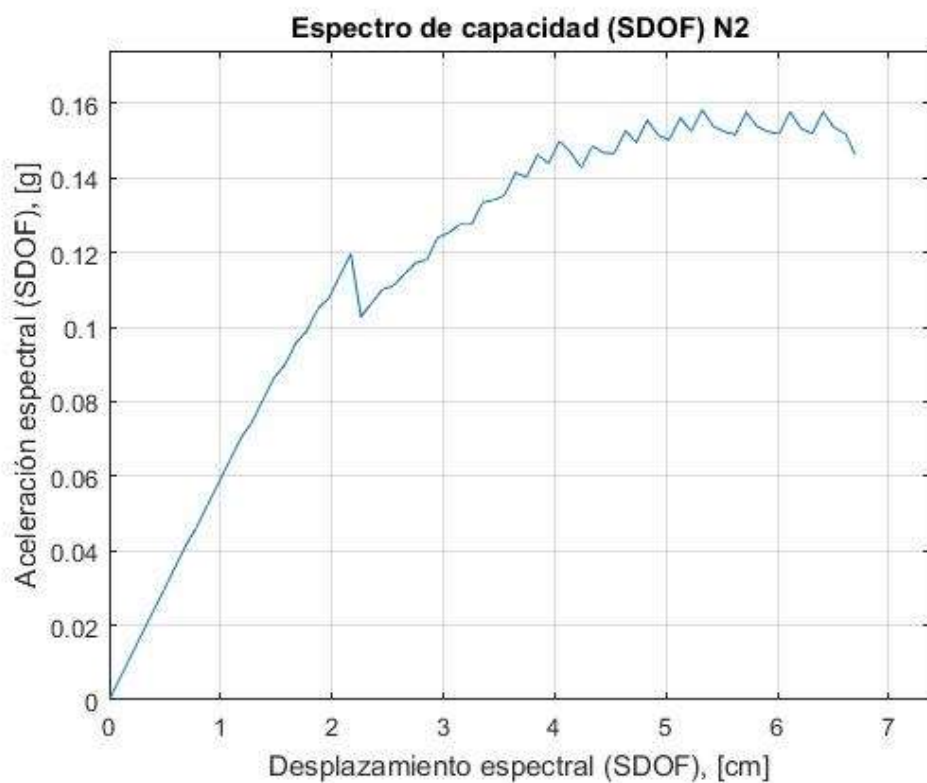


Figura 76: Espectro de capacidad del edificio en la dirección negativa de las Y

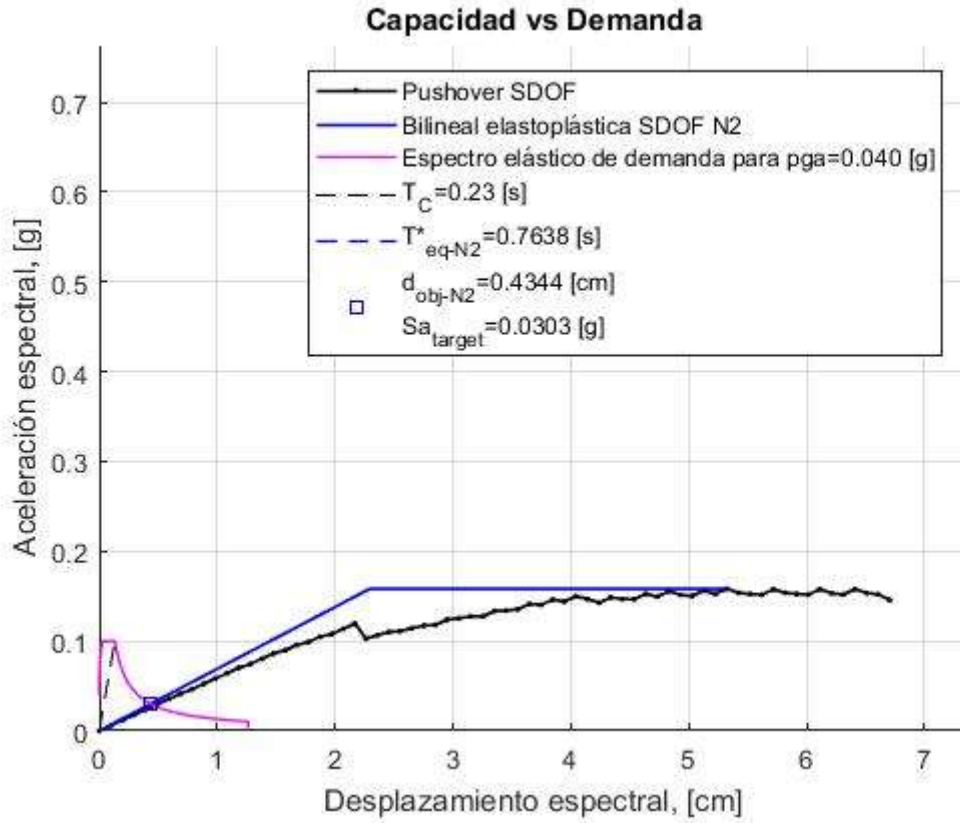


Figura 77: Curva de capacidad vs. demanda para un PGA=0,04g

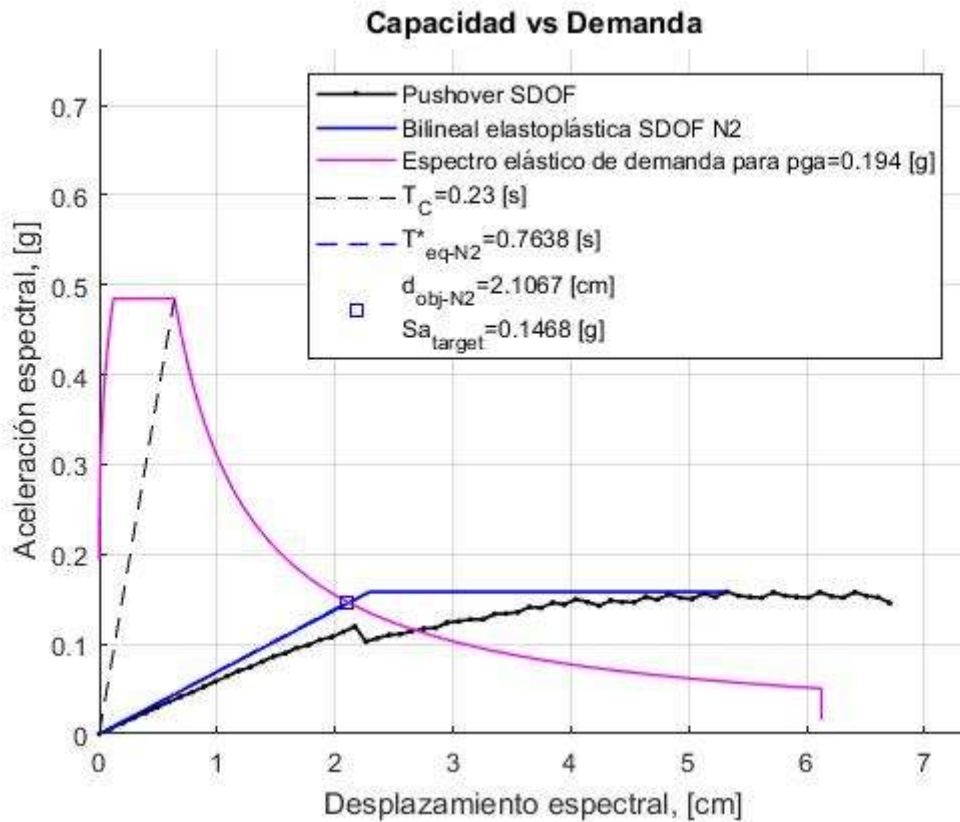


Figura 78: Curva de capacidad vs. demanda para un PGA=0,194g

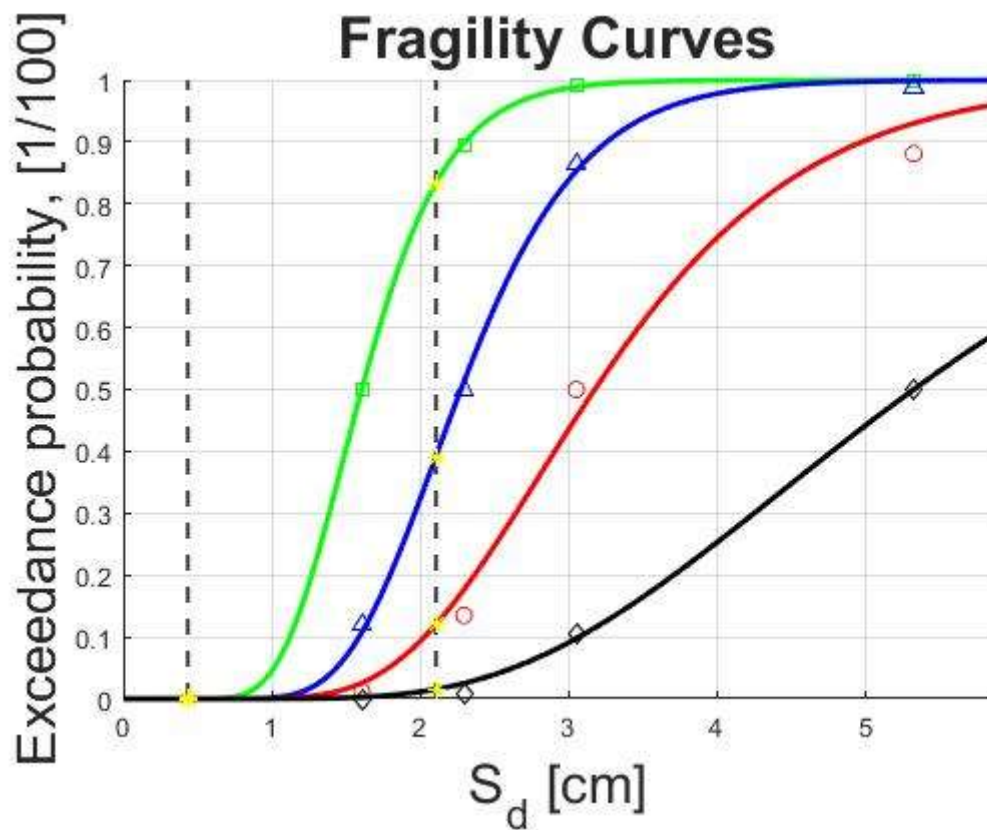


Figura 79: Curvas de fragilidad del edificio con los desplazamientos objetivo para $PGA=0,04$ y $PGA=0,194$

7.4.2. Segunda hipótesis

7.4.2.1. Análisis 4: dirección X positiva

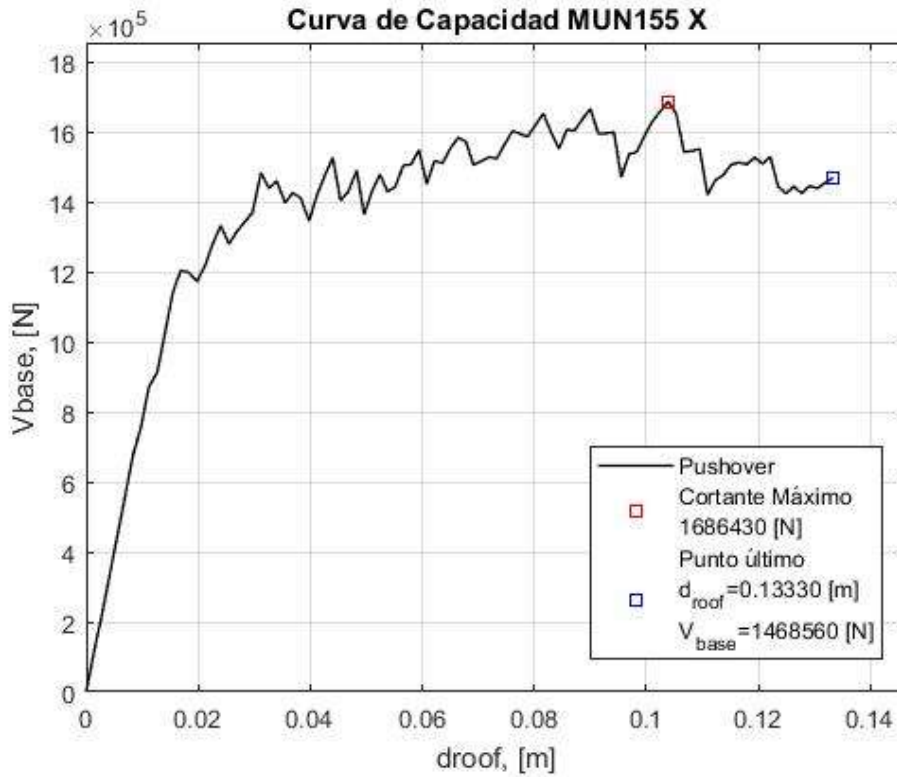


Figura 80: Curva de capacidad del edificio en la dirección positiva de las X

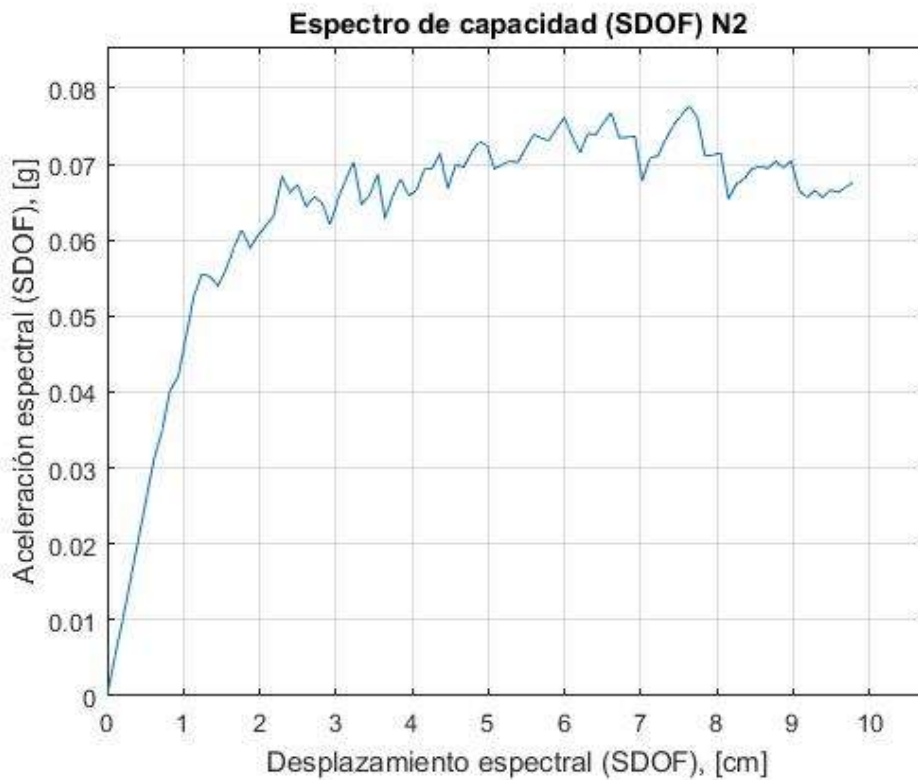


Figura 81: Espectro de capacidad del edificio en la dirección positiva de las X

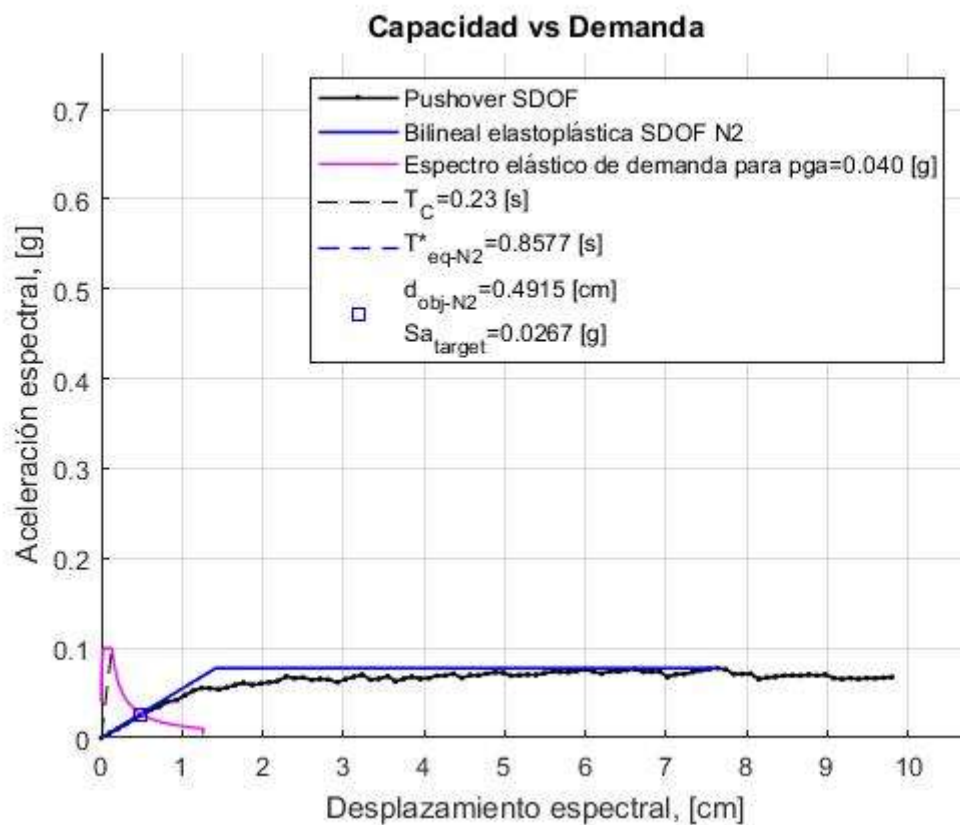


Figura 82: Curva de capacidad vs. demanda para un PGA=0,04g

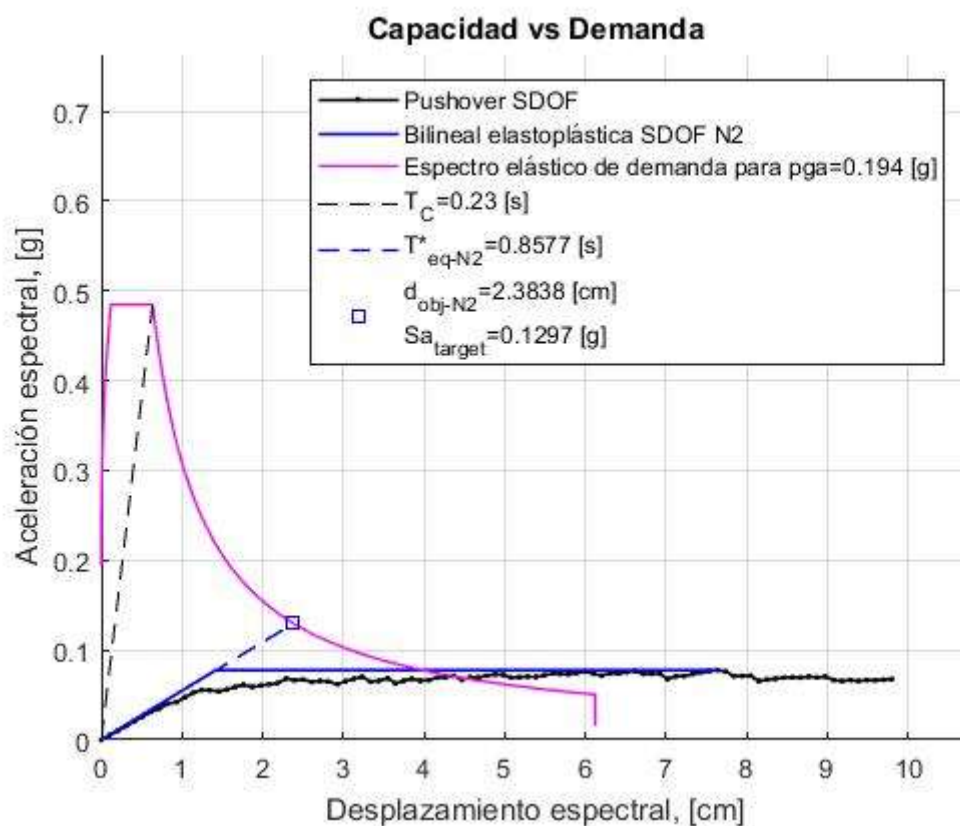


Figura 83: Curva de capacidad vs. demanda para un PGA=0,194g

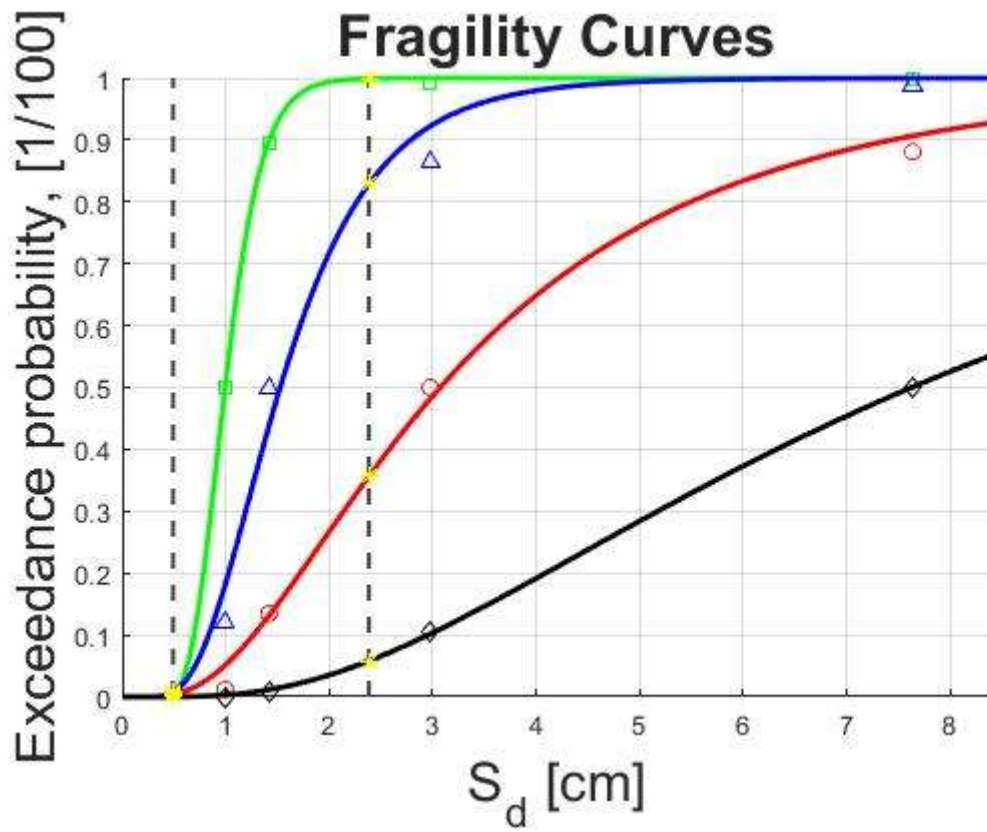


Figura 84: Curvas de fragilidad del edificio con los desplazamientos objetivo para PGA=0,04 y PGA=0,194

7.4.2.2. Análisis 5: dirección Y positiva

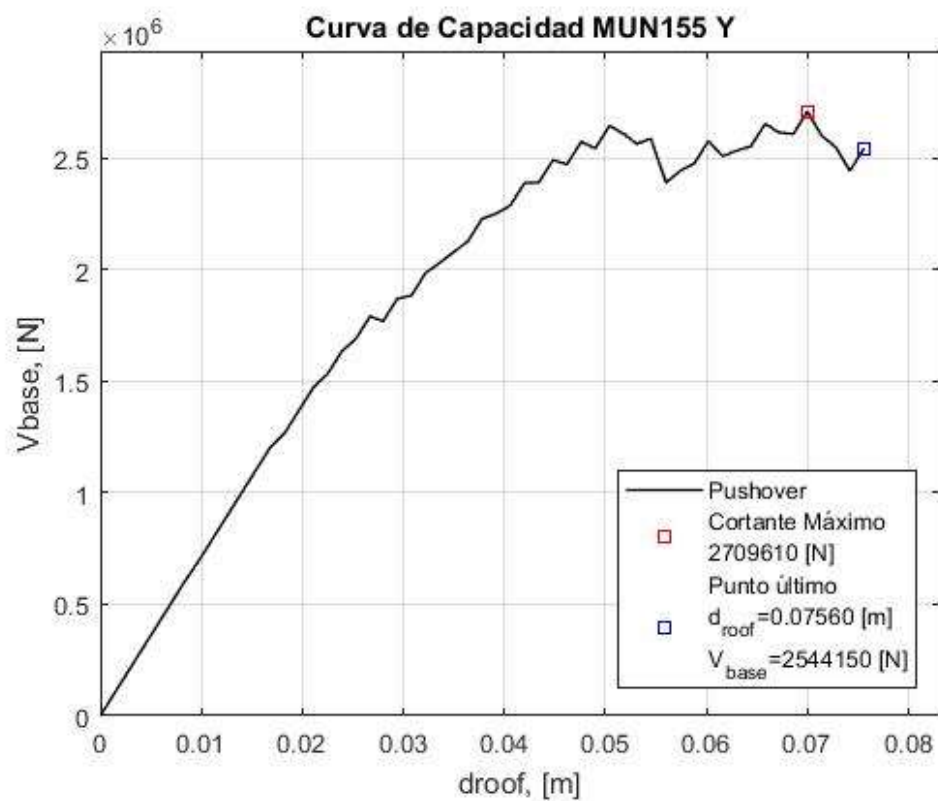


Figura 85: Curva de capacidad del edificio en la dirección positiva de las Y

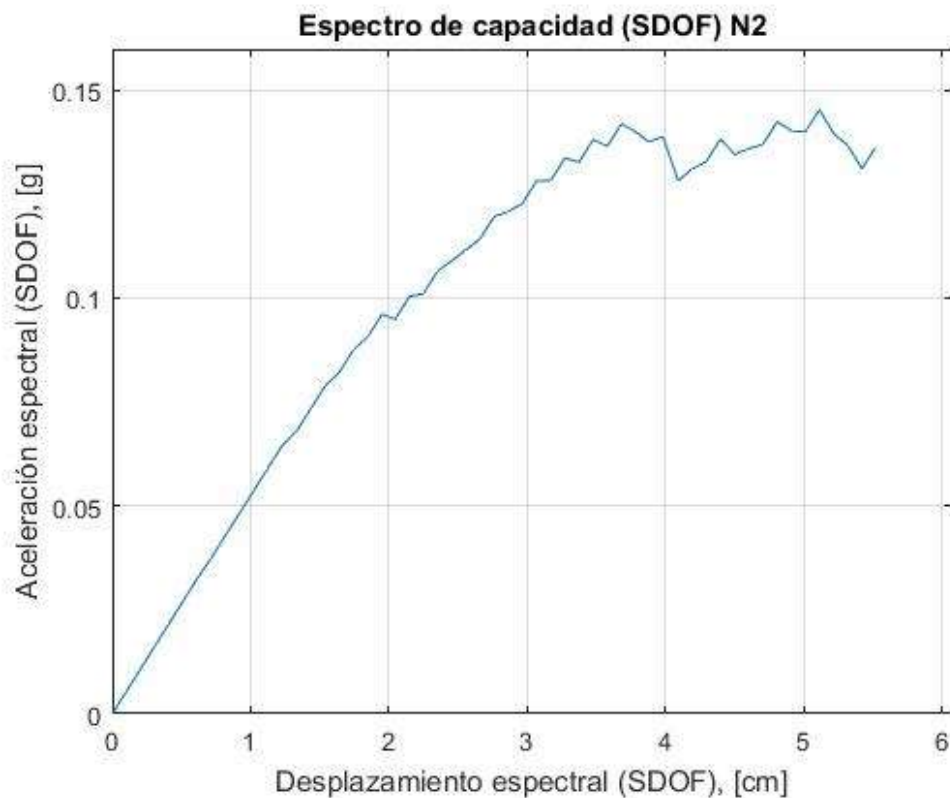


Figura 86: Espectro de capacidad del edificio para la dirección positiva de las Y

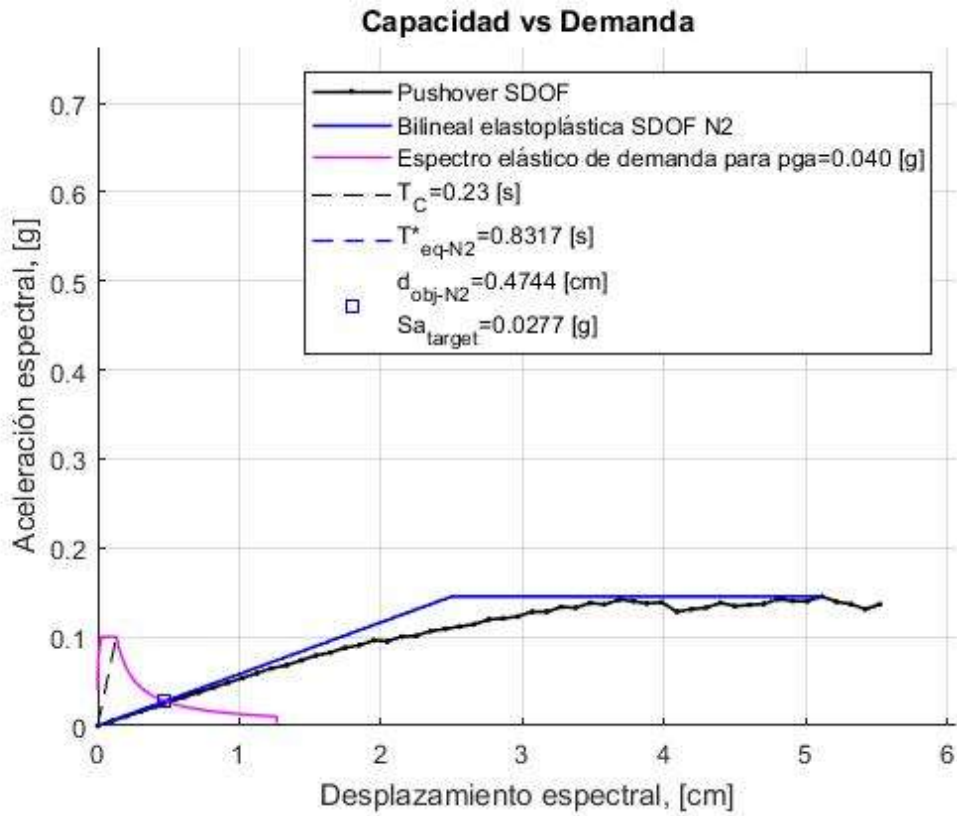


Figura 87: Curva de capacidad vs. demanda para un PGA=0,04g

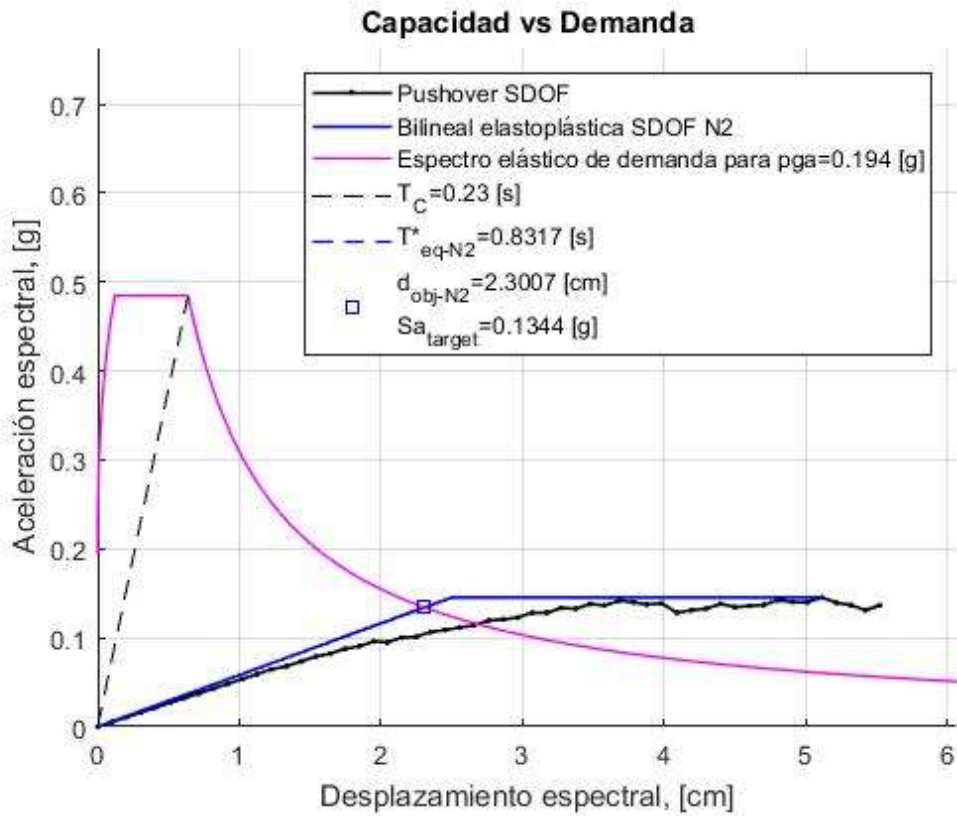


Figura 88: Curva de capacidad vs. demanda para un PGA=0,194g

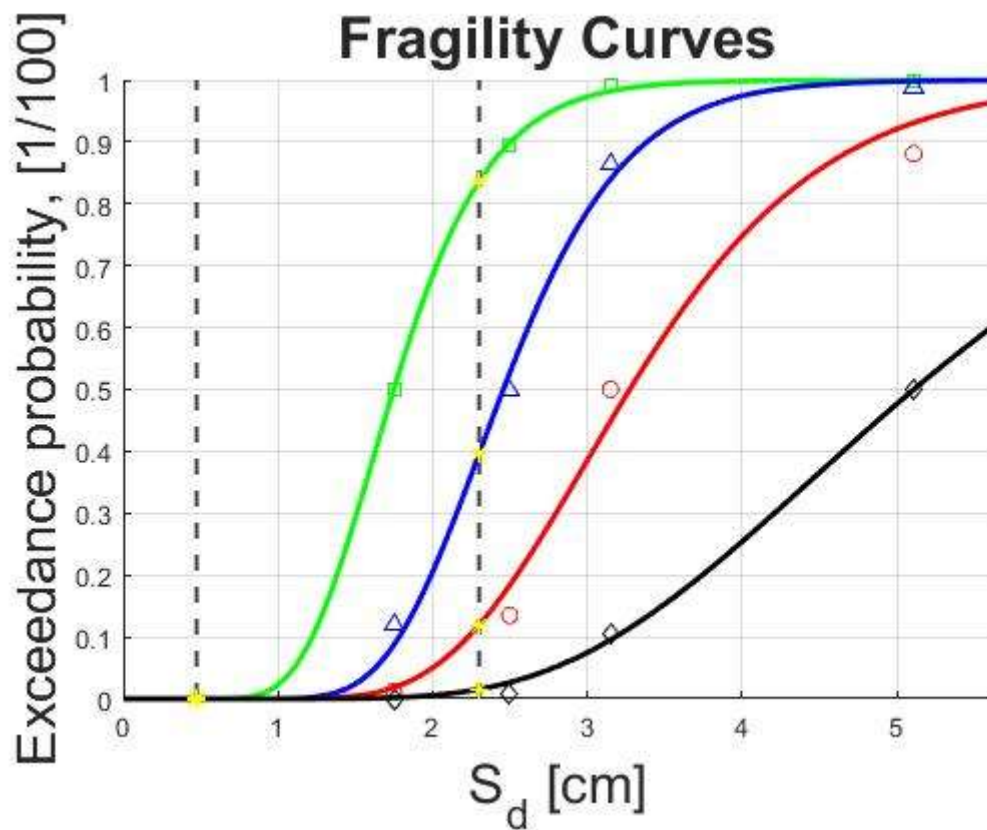


Figura 89: Curvas de fragilidad del edificio con los desplazamientos objetivo para PGA=0,04 y PGA=0,194

7.4.2.3. Análisis 6: dirección Y negativa

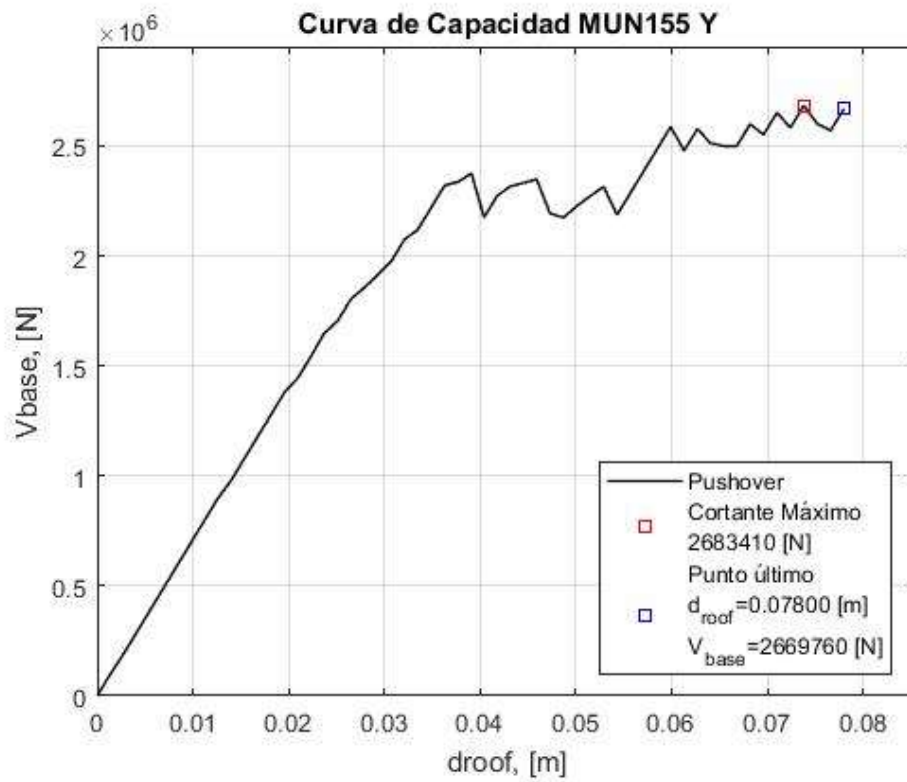


Figura 90: Curva de capacidad del edificio en la dirección negativa de las Y

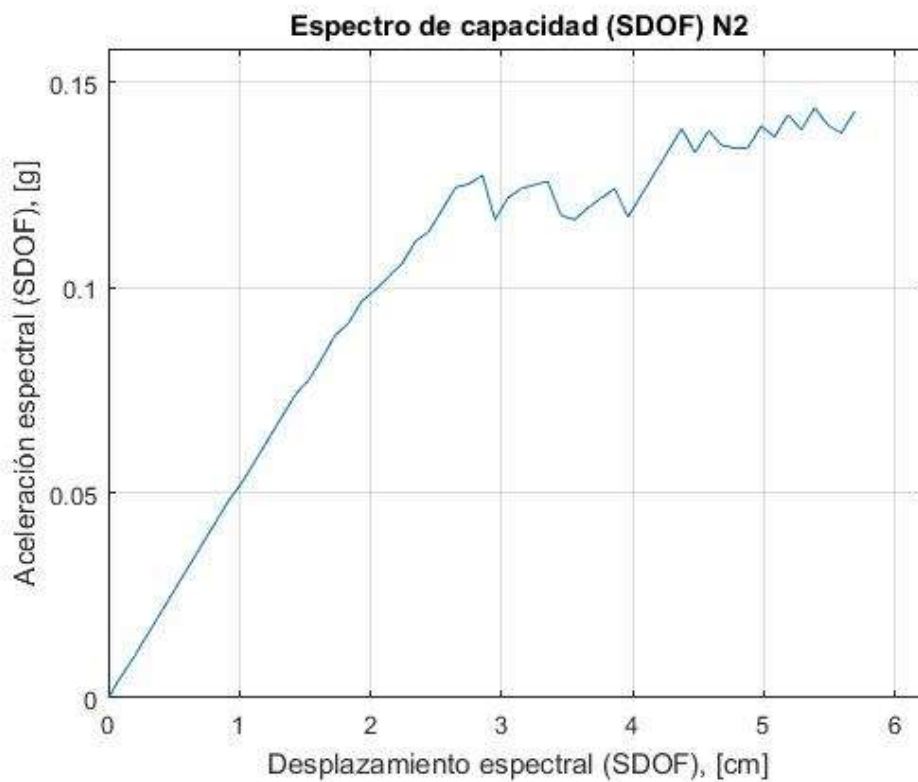


Figura 91: Espectro de capacidad del edificio en la dirección negativa de las Y

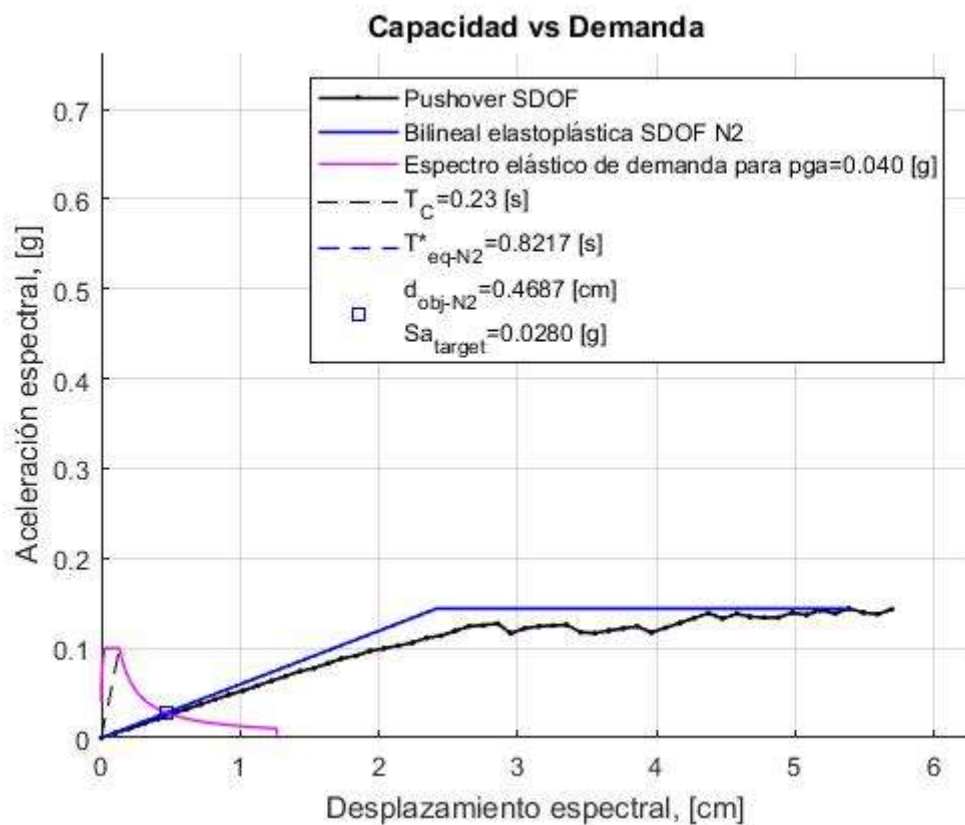


Figura 92: Curva de capacidad vs. demanda para un PGA=0,04g

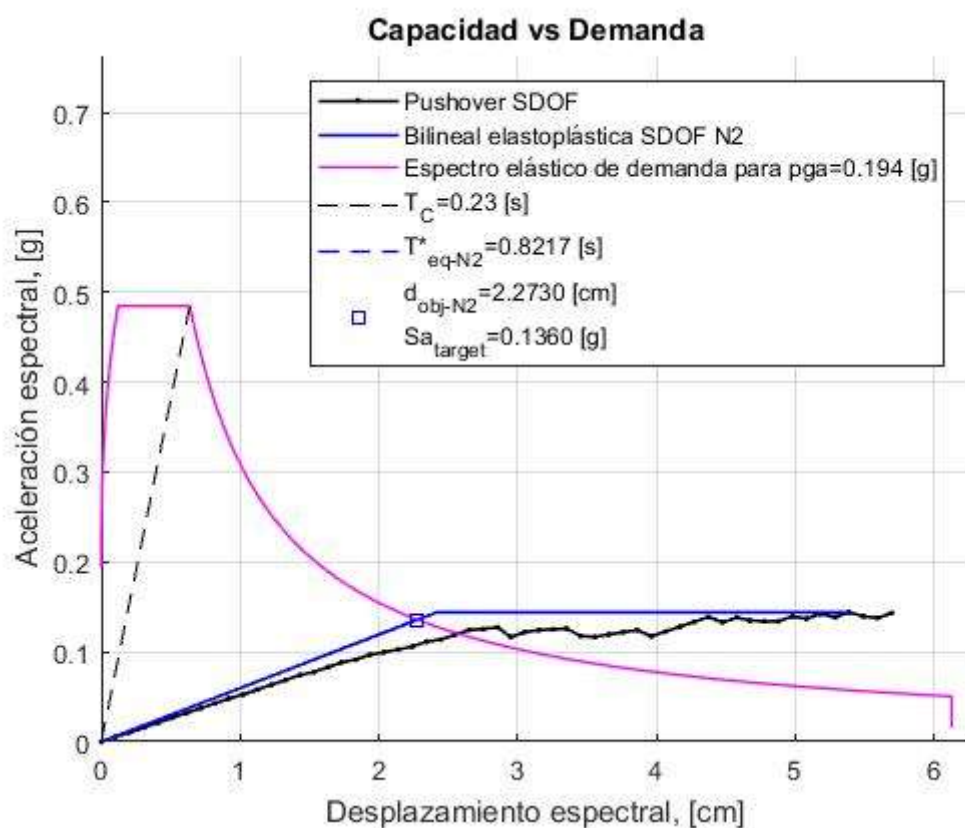


Figura 93: Curva de capacidad vs. demanda para un PGA=0,194g

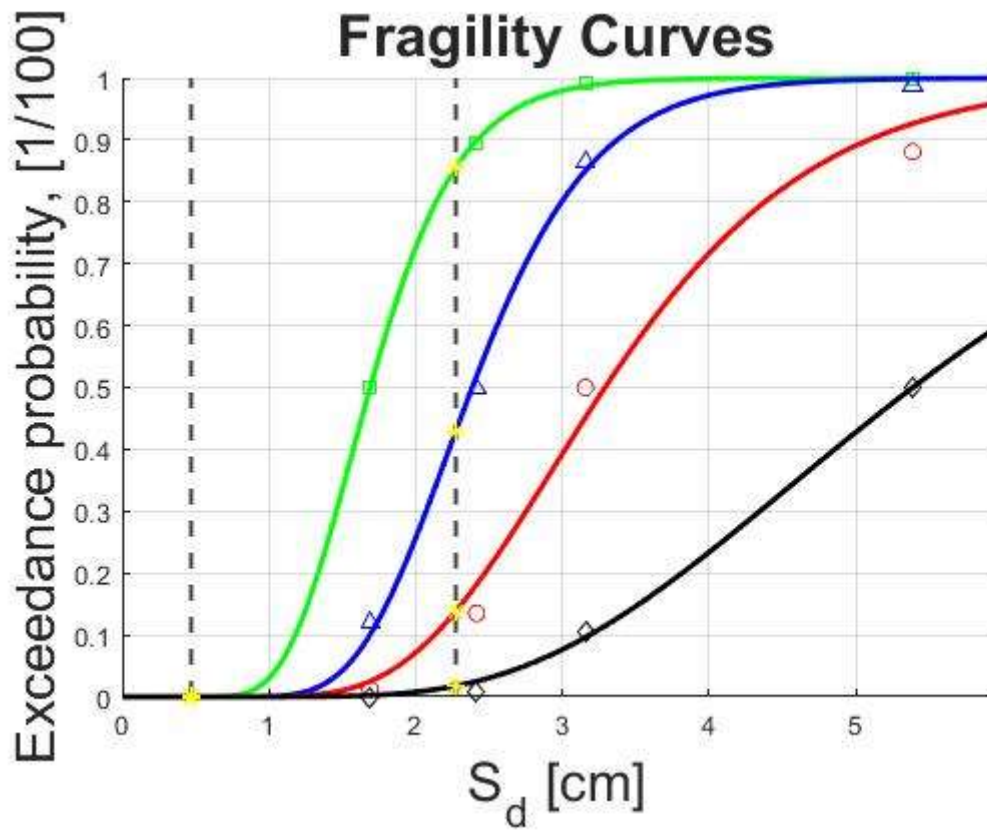


Figura 94: Curvas de fragilidad del edificio con los desplazamientos objetivo para PGA=0,04 y PGA=0,194

7.5. Estados de daño

Habiendo obtenido las diferentes curvas de fragilidad de los diferentes análisis e hipótesis, a continuación se compararan según los dos PGAs escogidos para este trabajo.

7.5.1. Primera hipótesis

7.5.1.1. Análisis 1: dirección X positiva

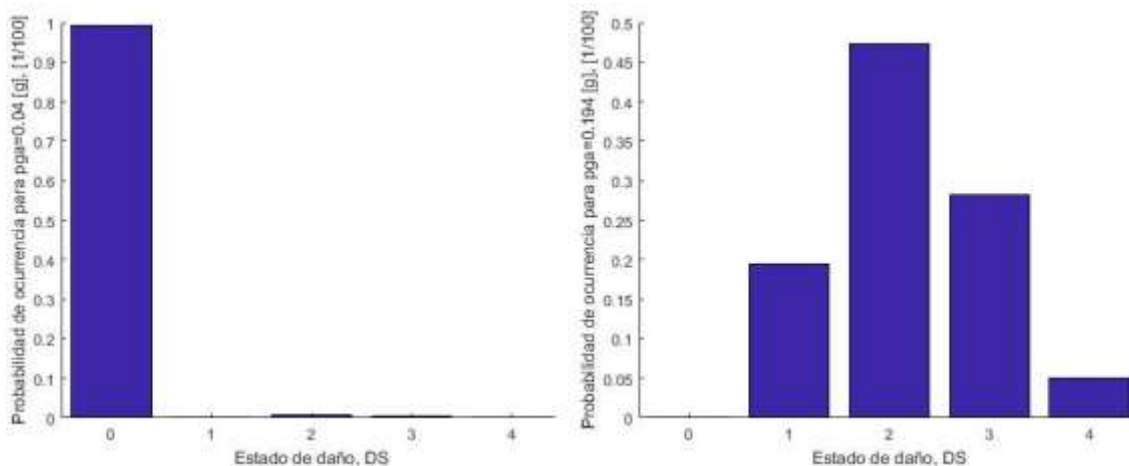


Figura 95: Probabilidad de ocurrencia de los estados de daño. (PGA=0,04g a la izquierda y PGA=0,194g a la derecha)

7.5.1.2. Análisis 2: dirección Y positiva

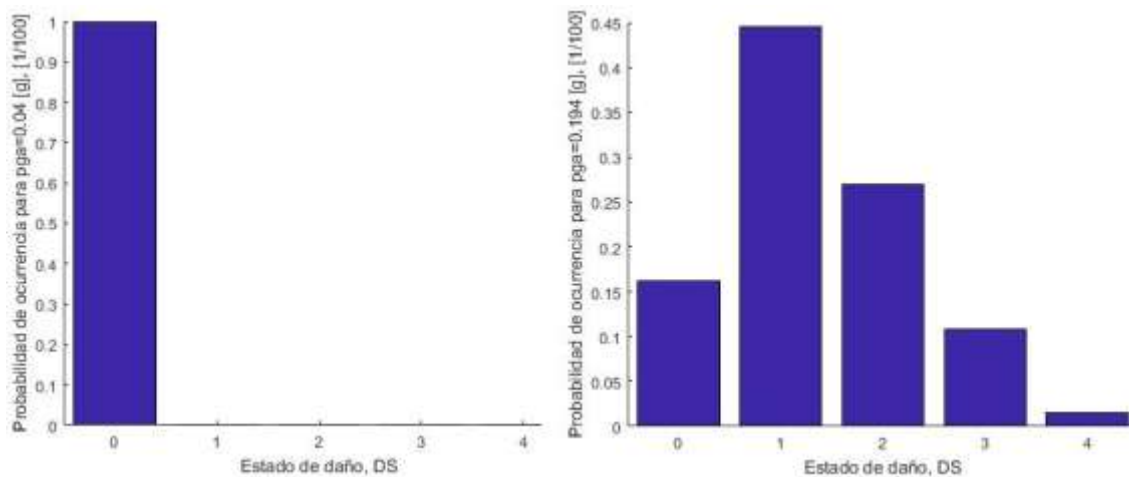


Figura 96: Probabilidad de ocurrencia de los estados de daño. (PGA=0,04g a la izquierda y PGA=0,194g a la derecha)

7.5.1.3. Análisis 3: dirección Y negativa

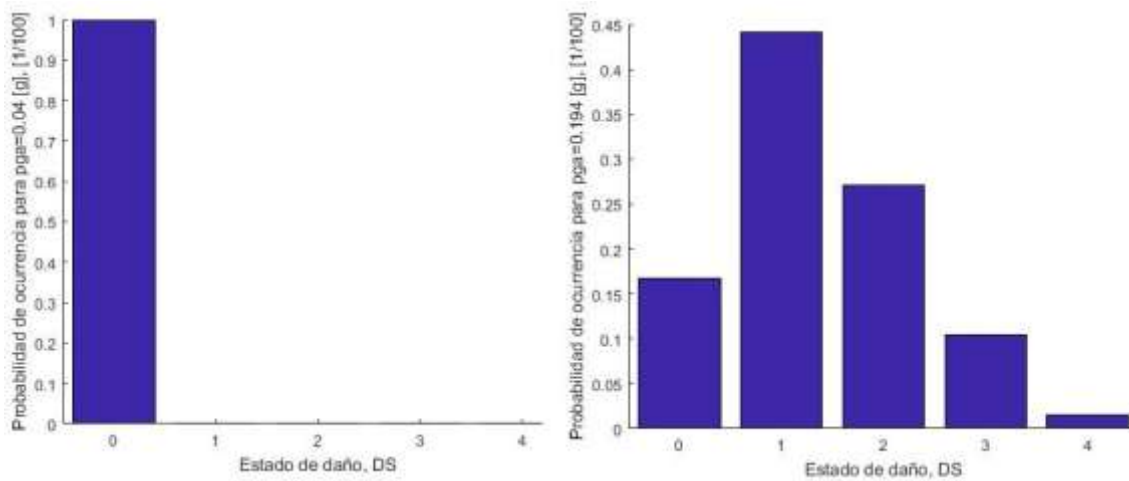


Figura 97: Probabilidad de ocurrencia de los estados de daño. (PGA=0,04g a la izquierda y PGA=0,194g a la derecha)

7.5.2. Segunda hipótesis

7.5.2.1. Análisis 4: dirección X positiva

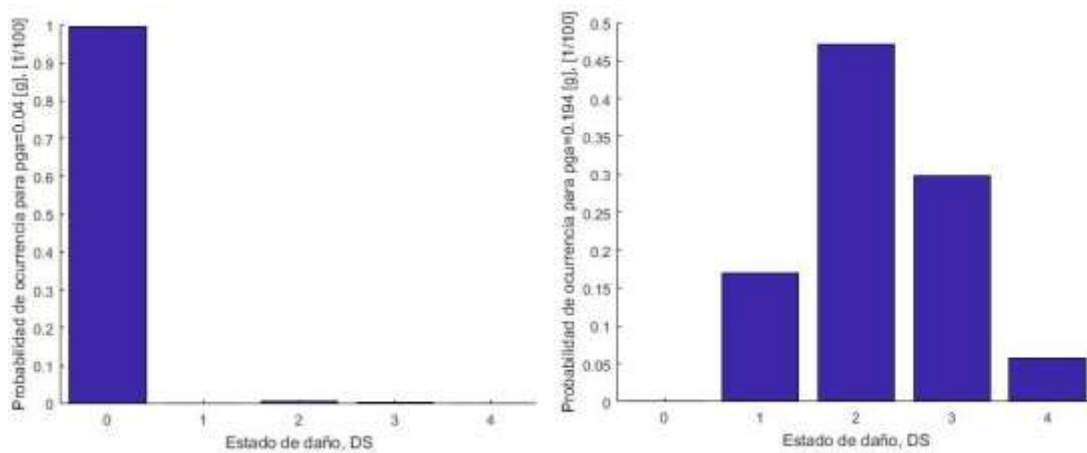


Figura 98: Probabilidad de ocurrencia de los estados de daño. (PGA=0,04g a la izquierda y PGA=0,194g a la derecha)

7.5.2.2. Análisis 5: dirección Y positiva

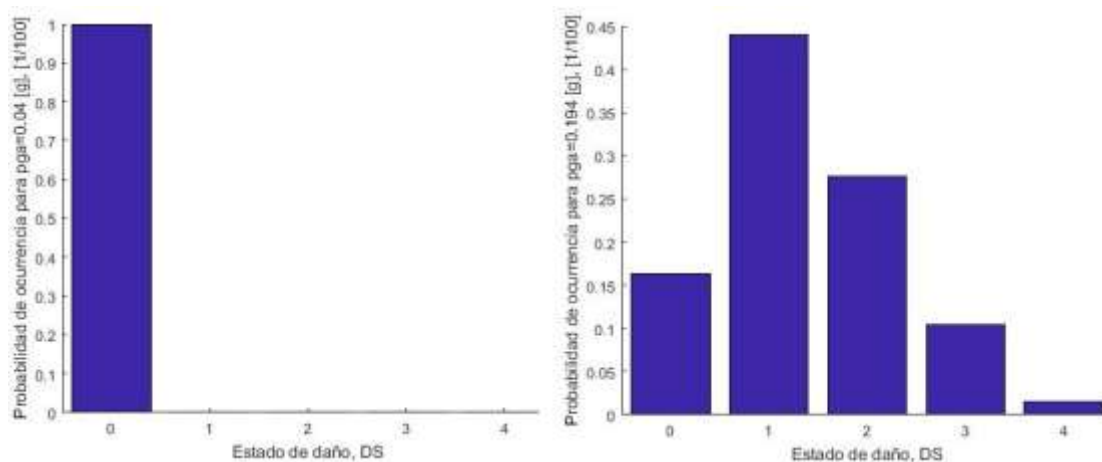


Figura 99: Probabilidad de ocurrencia de los estados de daño. (PGA=0,04g a la izquierda y PGA=0,194g a la derecha)

7.5.2.3. Análisis 6: dirección Y negativa

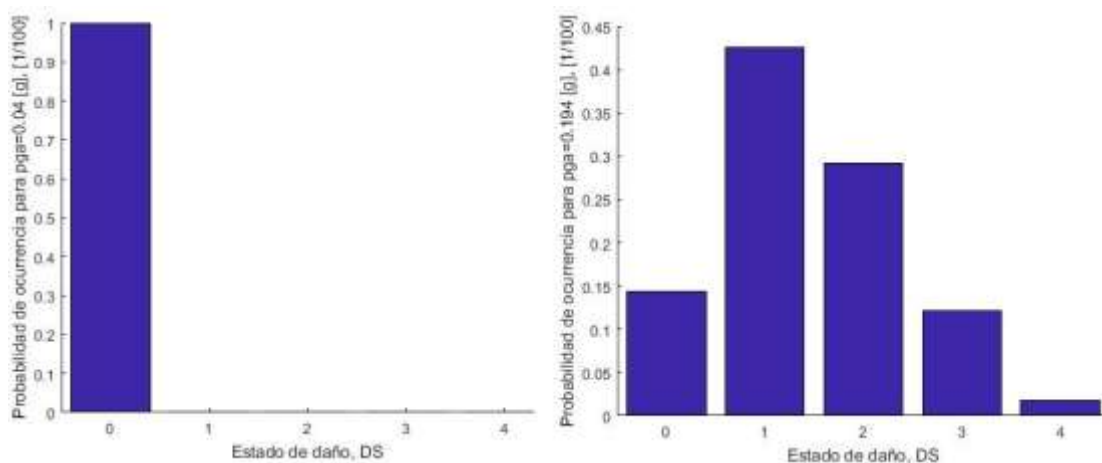


Figura 100: Probabilidad de ocurrencia de los estados de daño. (PGA=0,04g a la izquierda y PGA=0,194g a la derecha)

7.6. Comparativa de resultados

El objetivo de este apartado es la comparación de los resultados de los diferentes análisis llevados a cabo en el edificio seleccionado.

7.6.1. Análisis modal

La primera comparativa a tener en cuenta es la de los dos análisis modales. En la segunda hipótesis podemos ver como en el eje de las X el segundo periodo es muy alto en comparación con el resto de segundos o terceros periodos, pero esto no cambia el hecho que se buscaba probar, en concreto, que el primer modo mueve una masa mucho mayor y en un periodo más alto que el resto de modos. Además de esto, si se comparan el resto de modos, se puede ver una tendencia generalizada en la que los periodos de todos los modos de la primera hipótesis son más altos que los de la segunda hipótesis.

7.6.2. Análisis

Tras esta breve comparación de los análisis modales, lo siguiente es entrar a comparar el análisis per se. Para poder entender mejor estos resultados se ha decidido comparar los entre sí en dos tablas. La primera compara los desplazamientos espectrales objetivos del punto de desempeño con las diferentes direcciones de acción (Tabla 10) y la segunda compara los porcentajes de ocurrencia de los diferentes estados de daño para cada hipótesis y PGA sacados de las curvas de fragilidad (Tabla 11).

Tabla 10: Comparativa de los desplazamientos objetivo de los diferentes puntos de desempeño

PGA=0,04g			
Dirección	Sentido	Desplazamiento espectral [cm]	
		Hipótesis 1	Hipótesis 2
X	Positivo	0,4172	0,4915
X	Negativo	0,4172	0,4915
Y	Positivo	0,4515	0,4744
Y	Negativo	0,4344	0,4687
PGA=0,194g			
Dirección	Sentido	Desplazamiento espectral [cm]	
		Hipótesis 1	Hipótesis 2
X	Positivo	2,0235	2,3838
X	Negativo	2,0235	2,3838
Y	Positivo	2,1898	2,3007
Y	Negativo	2,1067	2,2730

Tabla 11: Comparativa de los porcentajes de ocurrencia de cada estado de daño según la hipótesis considerada

PGA=0,04g											
Dirección	Sentido	Porcentaje de ocurrencia									
		ED0		ED1		ED2		ED3		ED4	
		H1	H2	H1	H2	H1	H2	H1	H2	H1	H2
X	Positivo	99%	98%	0%	0%	0%	1%	1%	1%	0%	0%
X	Negativo	99%	98%	0%	0%	0%	1%	1%	1%	0%	0%
Y	Positivo	100%	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Y	Negativo	100%	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
PGA=0,194g											
Dirección	Sentido	Porcentaje de ocurrencia									
		ED0		ED1		ED2		ED3		ED4	
		H1	H2	H1	H2	H1	H2	H1	H2	H1	H2
X	Positivo	0%	0%	20%	17%	47%	47%	28%	30%	5%	6%
X	Negativo	0%	0%	20%	17%	47%	47%	28%	30%	5%	6%
Y	Positivo	16%	16%	45%	44%	27%	28%	11%	10%	1%	2%
Y	Negativo	17%	14%	44%	43%	27%	29%	10%	12%	2%	2%

Además de comparar los resultados usando las tablas, usaremos las dos imágenes siguientes (Figura 101 y Figura 102). En la primera se comparan las curvas de capacidad vs. demanda en la dirección X positiva de la primera hipótesis para ambos PGAs escogidos y en la segunda se comparan las mismas curvas pero esta vez con el mismo PGA de 0,194g pero distinta hipótesis.

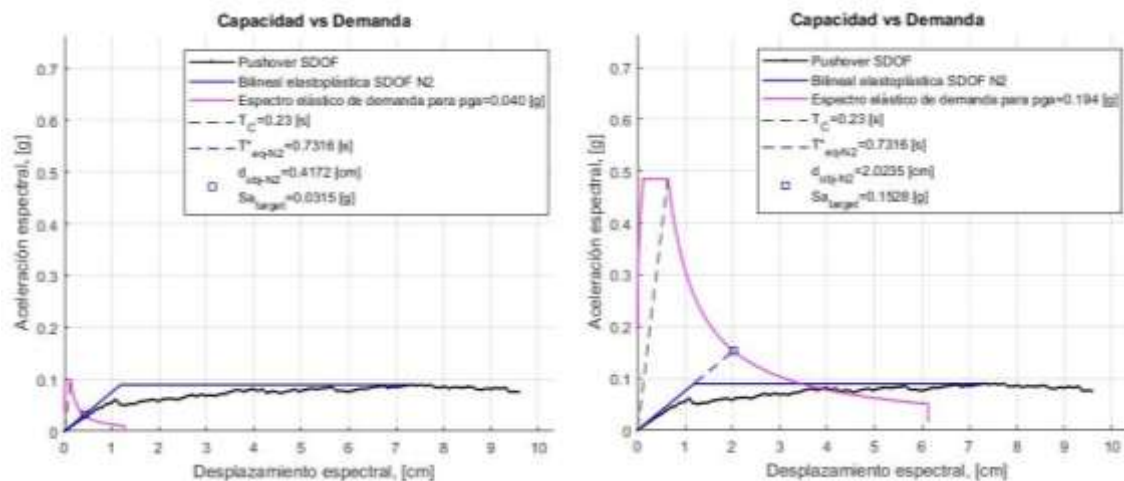


Figura 101: Comparación de las curvas de capacidad vs. demanda en la dirección X positiva para los PGA 0,04g (izquierda) y 0,194 (derecha)

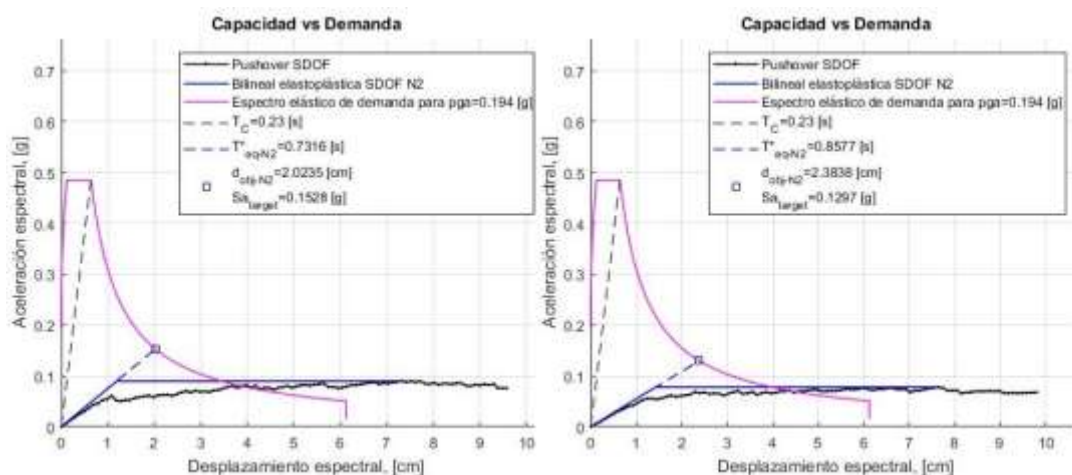


Figura 102: Comparación de las curvas de capacidad vs. demanda en la dirección X positiva para las hipótesis 1 (izquierda) y 2 (derecha)

Como podemos comprobar en las tablas anteriores, las mayores diferencias se encuentran entre los distintos PGA utilizados, siendo estas diferencias despreciables para la comparativa entre distintas hipótesis, H1 y H2. El uso del PGA establecido en las normativas, tanto NCSE-02 como EC8, nos llevaría a concluir que los daños causados por un terremoto prácticamente no pasarían del estado de daño 0. En cambio para el PGA propuesto por el estudio de Irizarry, los estados de daño que tienen mayor probabilidad se concentran en los estados de daño ED1, ED2 y ED3, con diferencias en sus porcentajes según la dirección de análisis, X o Y.

8. Conclusiones

Habiendo finalizado todas y cada una de las partes de este trabajo, se procede a analizar tanto los resultados de los análisis como otras informaciones del proyecto que se consideran interesantes o importantes. Teniendo en cuenta que se han usado dos hipótesis para el estudio del edificio y dentro de cada hipótesis, se han estudiado las cuatro direcciones (una de ellas no se ha calculado debido a que era simétrica), las conclusiones están basadas, en su gran mayoría, en la comparación de los diferentes resultados obtenidos entre sí.

Para empezar, es importante destacar el papel que juega la información histórica en este proyecto. El hecho de conocer el porqué de las dimensiones y distribuciones en planta de estos edificios nos ayuda a entender que los edificios no estaban pensados tanto para su seguridad sino para su utilidad. Las plantas bajas de más altura para ser usadas como almacenes o tiendas, las plantas principales, en las cuales vivía el propietario del edificio, con espacios más altos que el resto de plantas, etc. Se podría pensar que la búsqueda de espacios diáfanos es también ahora un objetivo de los constructores, pero nunca hasta el punto de anteponerlo a la seguridad de un edificio. Es muy probable que esto se deba a la poca información que se tenía acerca de la construcción sismo-resistente en la época, pero es un factor a tener en cuenta a la hora de asegurar que estos edificios deben ser analizados y revisados.

También es importante disponer de la información histórica de estos edificios para conocer la calidad y el estado de sus materiales. Este hecho se comenta en el apartado de motivaciones del trabajo, pero ha quedado probado que es un factor muy importante. A pesar de que en su conjunto la respuesta estructural de ambas hipótesis presentara cambios mínimos, la distribución de daños y ocurrencia de los mismos no fue igual. La influencia que tienen la disposición y calidad de los materiales en la prevención sísmica del edificio ha de ser tomada en consideración.

Otro punto a tener en cuenta en estas conclusiones es el edificio en sí. Es de vital importancia conocer los detalles de la estructura para poder modelarla adecuadamente y posteriormente analizarla sísmicamente, y no se pueden dar por hechos detalles que hoy en día serían obvios, puesto que este tipo de edificios tienen unas características muy especiales de la época en que se construyeron, diferentes a las actuales. Se ha llegado a esta conclusión, tal como se ha visto y comentado anteriormente, considerando que cualquier detalle puede significar un cambio importante en los resultados. Por esta razón, el modelo 3D usado en este proyecto ha sido preparado específicamente por el profesor Ávila para este edificio en concreto y con todos los detalles necesarios para poder realizar el análisis.

Una vez se entra a analizar las comparativas de resultados expuestas en el apartado anterior se puede llegar a las cuatro conclusiones más importantes del trabajo:

La primera y la más obvia pone en evidencia una falta de actualización de las normativas que regulan las construcciones sismo-resistentes. La NCSE-02 y por extensión el EC8 proponen el uso de un PGA de 0,04g para toda la costa catalana y gran parte de la zona pirenaica. Este valor contrasta con la tesis de Irizarry que, a partir de estas normativas y otros estudios que se han mencionado anteriormente, llega a la conclusión de que dentro de Barcelona hay hasta cuatro zonas diferentes en las cuales el PGA varía desde 0,1g en las zonas rocosas hasta 0,194g en la zona del edificio estudiado. Para este proyecto se ha usado el método propuesto por Irizarry para hacer los análisis debido a que es un estudio de microzonación que parte de las normativas mencionadas y va un paso más allá, usando además otros trabajos o tesis para mejorarlas. Por tanto, lo mismo se podría pensar para los valores de los PGA.

En las tablas comparativas de los resultados se puede ver como con el PGA propuesto por las normativas estatal y europea, el edificio prácticamente no sobrepasa en ningún momento el estado de daño 0. En cambio, con el PGA propuesto por Irizarry, el edificio muestra unos porcentajes de ocurrencia mayores para los estados de daño 1, 2 y 3. Este hecho confirma lo que se podía ver a simple vista sin hacer los cálculos: que las normativas española y europea deberían ser merecedoras de un reestudio o una actualización que pusiera de manifiesto la realidad de la zona.

En segundo lugar, se puede asegurar que dos edificios con una media de calidad de materiales igual o muy parecida no tienen por qué tener la misma resistencia ante un sismo de la misma magnitud. En este trabajo se ha comprobado mediante los análisis de las dos hipótesis, que la práctica constructiva de la época, donde se colocaban los materiales de mejor calidad en la parte baja del edificio, disminuyendo esta calidad a medida que se sube de nivel ha favorecido el comportamiento de este tipo de estructuras.

La última conclusión que se ha obtenido de este proyecto y de la comparación de los resultados de los análisis es que la geometría de la estructura también es un aspecto importante a tener en cuenta en la construcción sismo-resistente. Este tema queda fuera del alcance de este trabajo, ya que está centrado en la variabilidad de los materiales, pero observando los resultados de los análisis se puede comprobar cómo el edificio tiene mayor resistencia en la dirección "Y", tanto con el *pushover* positivo como negativo.

Finalmente, y a pesar de que escapa a los objetivos de este trabajo, es importante mencionar que comúnmente estos edificios solían ser construidos a manera de agregado con los edificios aledaños, compartiendo sus paredes medianeras. Lo anterior modifica de manera significativa el comportamiento de cada edificio que compone dichos agregados. No obstante, en la actualidad es una práctica común la demolición de edificios manteniendo solamente las fachadas, con lo cual dicha continuidad de los agregados se rompe, lo cual justifica el estudio de estas estructuras de manera individual (i.e. aislada).

9. Presupuesto

Para finalizar el proyecto, se ha procedido a analizar el coste de su realización mediante la elaboración de un presupuesto que se muestra en la tabla a continuación (Tabla 12).

Tabla 12: Presupuesto desglosado

Concepto	Precio/unidad	Unidades	Precio
Licencia <i>TreMuri</i>	790 €/licencia	1 licencia	790 €
Ingeniero Jr.	20 €/h	360 h	7.200 €
Créditos universitarios	39,53 €/ECTS	24 ECTS	948,72 €
TOTAL			8.938,72 €
IVA (21%)			1.877,13 €
TOTAL (+IVA 21%)			10.815,85 €

Ha sido posible utilizar el resto de softwares mediante licencias gratuitas para estudiantes proporcionadas por la *Universitat Politècnica de Catalunya* que se encuentran incluidas dentro del precio de los créditos ECTS.

Como se puede ver en la Tabla 12, el precio final de este proyecto asciende a **10.815,85 €**

Bibliografía

- Ayuntamiento de Barcelona. (7 de Junio de 2009). *anycerda*. Obtenido de <http://www.anycerda.org/web/>
- Cid, J. (1998). *Zonación sísmica de la ciudad de Barcelona basada en métodos de simulación numérica de efectos locales*. Universitat Politècnica de Catalunya.
- Comartin, C. D., Niewiarowski, R. W., & Rojahn, C. (1996). *Seismic evaluation and retrofit of concrete vuildings. Volume 1*. Redwood City, CA: Applied technology council.
- de Terán, F. (28 de Marzo de 2014). El caso del Plan Cerdá. *El País* .
- Fajfar, P., & Gasperisic, P. (1996). The N2 method for the seismic damage analysis of RC buildings. *Earthquake engineering and structural dynamics vol. 25* , 31-46.
- Galasco, A. (2018). *TreMuri*. Recuperado el 22 de Mayo de 2018, de www.tremuri.com
- Goula, X., & Godefroy, P. (1985). Évaluation de l'álea simique regional. Zonage à petite échelle. *Génie Parasismique* , 207-221.
- Irizarry Padilla, J. (2004). *An advanced approach to seismic risk assessment. Application to the cultural heritage and the urban system of Barcelona*. Barcelona.
- Martínez Castillo, M. A. (2009). Evaluación del uso de espectros de diseño al análisis de riesgo sísmico. Aplicación a Bacrelogna (España). Barcelona, España.
- Milutinovic, Z. V., & Trendafiloski, G. S. (2003). *Risk-UE (WP4: Vulnerability of current buildings)*.
- Ministerio de Fomento del Gobierno de España. (2018). www.fomento.gob.es. Recuperado el 24 de Abril de 2018, de https://www.fomento.gob.es/MFOM/LANG_CASTELLANO/ORGANOS_COLEGIADOS/MARCAD_OCE_EUROCODIGOS/EUROCOD/
- Múrria Nogués, M. (2017). *Evaluación de edificios de mampostería no reforzada con variabilidad de popiedades mecánicas de materiales de altura*. Barcelona: Escola d'Enginyeria de Barcelona Est (UPC).
- Navascués Palacio, P. (2000). ¡Abajo las murallas! *Descubrir el arte* , 116-118.

Ordaz, M., Aguilar, A., & Arboleda, J. (1999). *Program for computing seismic hazard, CRISIS 99-18*. UNAM, México.

Padrés Creixell, S., & Vela Parés, S. (1976). El modelo teórico del Plan Cerdá. 2c: *Contrucción de la ciudad*, 46-55.

Paricio Casademunt, A. (2001). *Secrets d'un sistema constructiu: L'eixample*. Barcelona: Edicions UPC.

Penna, A., Lagomarsino, S., Moreno, R., Bonett, R., Pujades, L., & Barbat, A. (2003). Evaluación de la vulnerabilidad sísmica de estructuras de mampostería no reforzada. Aplicación a un edificio de la zona del Eixample de Barcelona (España). *Revista internacional de ingeniería de estructuras*, 91-120.

Pujades, L., & Barbat, A. (2007). *Estimación de la Vulnerabilidad sísmica de las tipologías constructivas más representativas de los edificios de importancia especial en Cataluña*. Barcelona.

RAE. (2018). *Real Acadèmia Espanyola*. Recuperado el 28 de Marzo de 2018, de Real Acadèmia Espanyola de la Lengua: <http://dle.rae.es/?id=Zbv1taE>

Secanell, R. (1999). *Avaluació de la perillositat sísmica a Catalunya: anàlisi de sensibilitat per a diferents models d'ocurrència i paràmetres sísmics*. Universitat de Barcelona.

Listado de figuras

Figura 1: Parcelario agrícola del llano de Barcelona antes del Plan Cerdá (fuente: www.anycerda.org).....	11
Figura 2: Plano del proyecto de Ildefons Cerdà i Sunyer. (Tomada de Cerdà, 1859 Fuente: MUHBA).....	12
Figura 3: Plano del proyecto de Antoni Rovira i Trias. (Tomada de Rovira, 1859 Fuente: MUHBA).....	12
Figura 4: Evolución de la manzana tipo del Eixample y de su espacio construido aproximado. (Tomada de Dalmau Salvia, 1972).....	14
Figura 5: Año de construcción medio de los edificios por ciudad en Barcelona (Fuente: Lantada, 2007)	15
Figura 6: Edificio a analizar (Fuente propia, 2018).....	17
Figura 7: Plano de un edificio de las mismas características que el escogido (modificado de Gonzalez-Drigo et al., 2016)	18
Figura 8: Vista exterior de la pared medianera del edificio	19
Figura 9: Vista exterior del dintel de una apertura de la fachada delantera	20
Figura 10: Forjado tipo de un edificio del Eixample.....	21
Figura 11: Vista inferior del forjado tipo de un edificio del Eixample.....	21
Figura 12: Iglesia de Santiago tras el terremoto de Lorca en 2011 (Fuente: B.A.B. Arquitectos)	22
Figura 13: Simplificación de la estructura a un nodo por altura (modificada de J. Campbell et al., 2005).....	26
Figura 14: Modos de vibración de un edificio (modificada de Ministerio de Fomento, 2002)...	26
Figura 15: Ejemplo de justificación del uso del primer modo (Fuente: Gonzalez-Drigo, 2016) .	27
Figura 16: Ejemplo de curva de capacidad.....	27
Figura 17: Ejemplo de curva de capacidad cortada en el punto último	28
Figura 18: Ejemplo de espectro de capacidad ADRS.....	29
Figura 19: Fórmulas para el cálculo de la aceleración sísmica (Fuente: Ministerio de Fomento, 2002)	30
Figura 20: Formulas para el cálculo del espectro normalizado de respuesta elástica (Fuente: Ministerio de Fomento, 2002)	31
Figura 21: Mapa sísmico de la Norma Sismorresistente (Fuente: Ministerio de Fomento, 2002)	31
Figura 22: Espectro de respuesta elástico para Barcelona según la NCSE-02	33

Figura 23: Espectro de demanda para Barcelona según la NCSE-02	34
Figura 24: Espectro de demanda para E-01 según la NCSE-02	34
Figura 25: Fórmulas para el cálculo del espectro de respuesta elástico (Fuente: Irizarry, 2004)	35
Figura 26: Espectro de respuesta elástico para Barcelona según el EC-8.....	36
Figura 27: Espectro de demanda para Barcelona según el EC-8.....	37
Figura 28: Espectro de demanda para E-01 según el EC-8.....	37
Figura 29: Fórmulas para el cálculo del espectro de respuesta elástico según Irizarry (Modificada de Irizarry, 2004).....	38
Figura 30: Zonas de terreno según Irizarry (Fuente: Irizarry, 2004)	39
Figura 31: PGAs para cada zona de Barcelona según Irizarry (Fuente: Irizarry, 2004)	40
Figura 32: Espectro de respuesta elástica para Barcelona según Irizarry.....	40
Figura 33: Espectro de demanda para Barcelona según Irizarry	41
Figura 34: Espectro de demanda para E-01 según Irizarry	41
Figura 35: Demanda de cada una de las normativas para la zona escogida con $PGA=1g$	42
Figura 36: Demanda de cada una de las normativas para la zona escogida con $PGA=0,04g$	43
Figura 37: Demanda de cada una de las normativas para la zona escogida con $PGA=0,194g$...	43
Figura 38: Demanda de cada una de las normativas para la zona escogida.....	44
Figura 39: Ejemplo de transformación del espectro de capacidad a la curva bilineal (Modificada de Matjaž Dolšek, 2011).....	45
Figura 40: Ejemplo de gráfico capacidad vs. demanda en el que se pueden encontrar los factores comentados.....	46
Figura 41: Ejemplo de transformación de un espectro elástico a un inelástico (modificada de Matjaž Dolšek, 2011).....	46
Figura 42: Umbrales de daño	47
Figura 43: Ejemplo de un gráfico de las curvas de fragilidad.....	49
Figura 44: Columnas y dinteles (misma disposición que en plantas superiores) de la planta baja del edificio	50
Figura 45: Modelo de la planta baja del edificio	51
Figura 46: Columnas y dinteles de la planta tipo del edificio	51
Figura 47: Modelo de la planta tipo del edificio	52
Figura 48: Modelo completo del edificio	52
Figura 49: Histogramas y funciones de distribución de la simulación de las propiedades mecánicas para mampostería (Fuente: Ávila Haro et al, 2017).....	54
Figura 50: Histograma para el módulo de cortante	54

Figura 51: Histograma del esfuerzo de cortante.....	55
Figura 52: Histograma de la resistencia a compresión	55
Figura 53: Histograma del módulo de Young.....	56
Figura 54: Coordenadas del edificio seleccionado (modificado de Gonzalez-Drigo et al., 2016)	59
Figura 55: Movimiento del nivel 1 del edificio en el primer modo.....	59
Figura 56: Movimiento del nivel 2 del edificio en el primer modo.....	60
Figura 57: Movimiento del nivel 3 del edificio en el primer modo.....	60
Figura 58: Movimiento del nivel 4 del edificio en el primer modo.....	61
Figura 59: Movimiento del nivel 5 del edificio en el primer modo.....	61
Figura 60: Movimiento del nivel 6 del edificio en el primer modo.....	62
Figura 61: Movimiento del nivel 7 del edificio en el primer modo.....	62
Figura 62: Curva de capacidad del edificio en la dirección positiva de las X	63
Figura 63: Espectro de capacidad del edificio en la dirección positiva de las X.....	64
Figura 64: Curva de capacidad vs. demanda para un PGA=0,04g.....	64
Figura 65: Curva de capacidad vs. demanda para un PGA=0,120g.....	65
Figura 66: Curva de capacidad vs. demanda para un PGA=0,194g.....	65
Figura 67: Curva de capacidad vs. demanda para un PGA=0,270g.....	66
Figura 68: Desplazamiento objetivo para cada PGA analizado.....	67
Figura 69: Curvas de fragilidad del edificio con los desplazamientos objetivo para PGA=0,04 y PGA=0,194.....	68
Figura 70: Curva de capacidad del edificio en la dirección positiva de las Y.....	69
Figura 71: Espectro de capacidad del edificio en la dirección positiva de las Y.....	69
Figura 72: Curva de capacidad vs. demanda para un PGA=0,04g.....	70
Figura 73: Curva de capacidad vs. demanda para un PGA=0,194g.....	70
Figura 74: Curvas de fragilidad del edificio con los desplazamientos objetivo para PGA=0,04 y PGA=0,194.....	71
Figura 75: Curva de capacidad del edificio en la dirección negativa de las Y	72
Figura 76: Espectro de capacidad del edificio en la dirección negativa de las Y.....	72
Figura 77: Curva de capacidad vs. demanda para un PGA=0,04g.....	73
Figura 78: Curva de capacidad vs. demanda para un PGA=0,194g.....	73
Figura 79: Curvas de fragilidad del edificio con los desplazamientos objetivo para PGA=0,04 y PGA=0,194.....	74
Figura 80: Curva de capacidad del edificio en la dirección positiva de las X	75
Figura 81: Espectro de capacidad del edificio en la dirección positiva de las X.....	75
Figura 82: Curva de capacidad vs. demanda para un PGA=0,04g.....	76

Figura 83: Curva de capacidad vs. demanda para un $PGA=0,194g$	76
Figura 84: Curvas de fragilidad del edificio con los desplazamientos objetivo para $PGA=0,04$ y $PGA=0,194$	77
Figura 85: Curva de capacidad del edificio en la dirección positiva de las Y.....	78
Figura 86: Espectro de capacidad del edificio para la dirección positiva de las Y.....	78
Figura 87: Curva de capacidad vs. demanda para un $PGA=0,04g$	79
Figura 88: Curva de capacidad vs. demanda para un $PGA=0,194g$	79
Figura 89: Curvas de fragilidad del edificio con los desplazamientos objetivo para $PGA=0,04$ y $PGA=0,194$	80
Figura 90: Curva de capacidad del edificio en la dirección negativa de las Y.....	81
Figura 91: Espectro de capacidad del edificio en la dirección negativa de las Y.....	81
Figura 92: Curva de capacidad vs. demanda para un $PGA=0,04g$	82
Figura 93: Curva de capacidad vs. demanda para un $PGA=0,194g$	82
Figura 94: Curvas de fragilidad del edificio con los desplazamientos objetivo para $PGA=0,04$ y $PGA=0,194$	83
Figura 95: Probabilidad de ocurrencia de los estados de daño. ($PGA=0,04g$ a la izquierda y $PGA=0,194g$ a la derecha).....	84
Figura 96: Probabilidad de ocurrencia de los estados de daño. ($PGA=0,04g$ a la izquierda y $PGA=0,194g$ a la derecha).....	84
Figura 97: Probabilidad de ocurrencia de los estados de daño. ($PGA=0,04g$ a la izquierda y $PGA=0,194g$ a la derecha).....	85
Figura 98: Probabilidad de ocurrencia de los estados de daño. ($PGA=0,04g$ a la izquierda y $PGA=0,194g$ a la derecha).....	85
Figura 99: Probabilidad de ocurrencia de los estados de daño. ($PGA=0,04g$ a la izquierda y $PGA=0,194g$ a la derecha).....	86
Figura 100: Probabilidad de ocurrencia de los estados de daño. ($PGA=0,04g$ a la izquierda y $PGA=0,194g$ a la derecha).....	86
Figura 101: Comparación de las curvas de capacidad vs. demanda en la dirección X positiva para los $PGA 0,04g$ (izquierda) y $0,194$ (derecha).....	88
Figura 102: Comparación de las curvas de capacidad vs. demanda en la dirección X positiva para las hipótesis 1 (izquierda) y 2 (derecha).....	88

Listado de tablas

Tabla 1: Anchuras de las diferentes paredes del edificio.....	20
Tabla 2: Coeficientes del terreno para la NCSE-02, según tipo de terreno.....	32
Tabla 3: Valores del EC-8 para los diferentes tipos de suelo	36
Tabla 4: Valores necesarios para el cálculo del espectro de demanda según Irizarry (2004)	39
Tabla 5: Valores límite de las propiedades mecánicas para mampostería no reforzada	53
Tabla 6: Valores de las propiedades de los materiales en la primera hipótesis	56
Tabla 7: Valores de las propiedades de los materiales en la segunda hipótesis	57
Tabla 8: Análisis modal de justificación de los cálculos con el primer modo	57
Tabla 9: Análisis modal de justificación de los cálculos con el primer modo	58
Tabla 10: Comparativa de los desplazamientos objetivo de los diferentes puntos de desempeño.....	87
Tabla 11: Comparativa de los porcentajes de ocurrencia de cada estado de daño según la hipótesis considerada.....	87
Tabla 12: Presupuesto desglosado.....	92