





UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA



TESIS DOCTORAL

**ANÁLISIS ESTRUCTURAL PROBABILISTA ORIENTADO
A EVALUACIÓN DEL DAÑO SÍSMICO DE EDIFICIOS DE
MAMPOSTERÍA NO REFORZADA: APLICACIÓN A EDIFICIOS
AISLADOS Y AGREGADOS DEL DISTRITO DEL ENSANCHE DE
BARCELONA**

Tesis doctoral presentada para obtener el título de Doctor por parte de la Universitat Politècnica de Catalunya por:

Jorge Arturo Avila-Haro

Director:

José Ramón González Drigo

Codirectores:

Lluís Gonzaga Pujades Beneit

Horia Alejandro Barbat Barbat

Doctorado en Ingeniería Sísmica y Dinámica Estructural

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental

Sección de Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y
Puertos de Barcelona

Barcelona, 7 de Abril de 2021

Agradecimientos

Primeramente, quisiera expresar mi sincera gratitud a los profesores José Ramón González-Drigo, Lluís Pujades y Alex Barbat, quienes dirigieron esta tesis, por su apoyo incondicional, paciencia, conocimientos y consejos aportados, pero sobretodo por su profesionalidad e interés en asegurar la calidad de este trabajo. Hago una mención especial al profesor González-Drigo, con quien tengo la suerte de compartir despacho desde hace varios años, por siempre haber velado desinteresadamente por mí, por su cercanía y, sobretodo, por su amistad.

También quisiera agradecer a todos los profesores, técnicos y personal administrativo que formaron y forman parte de este programa de Doctorado, por su paciencia y buena voluntad durante estos años.

Agradezco también a todas aquellas personas que han estado a mi lado durante este tiempo, siempre apoyándome y haciéndolo más llevadero. Gracias por todo Yeudy, Rodrigo, Nuria, Marta, Marielle, Francisco, Edgar, Chiara, Andrea, y un largo etc.

Finalmente, nada de esto hubiera sido posible sin el apoyo incondicional, gran esfuerzo, consejo y compañía de mis padres, Beatriz y Jorge, y de mi hermana, Betty, a quienes les agradezco infinitamente.

Resumen

A pesar de que la mampostería es uno de los materiales de construcción más antiguos y usados, el número de estudios y datos experimentales existentes, así como la aplicabilidad de sus resultados (*i.e.* extrapolación), son substancialmente inferiores a aquellos disponibles para materiales mucho más recientes, tales como el hormigón o el acero. Además, actualmente en Europa, un gran número de edificaciones habitacionales pertenecen a tipologías de mampostería. Estas circunstancias justifican el estudio de las características y comportamiento de la mampostería para orientar estudios sobre vulnerabilidad sísmica.

En particular, el distrito del Ensanche de Barcelona, en España, presenta un parque urbano de viviendas funcionales compuesto en un 73% por estructuras de mampostería no reforzada, resueltas mediante sistemas de muros de carga, sin ninguna consideración de la acción sísmica y que, en su mayoría, sobrepasan 100 años de vida útil. Estos edificios, característicos de Barcelona, tienen elementos que los diferencian de otras edificaciones de la misma tipología constructiva que pueden encontrarse en otras regiones de Europa: 1) el número de plantas supera significativamente la media, pudiendo encontrar edificios con hasta 10 u 11 niveles; 2) Los edificios comparten paredes medianeras (*e.g.* laterales), generando con ello entramados de edificios conocidos como *agregados*; 3) Las propiedades y calidades de los distintos elementos constructivos están estrechamente ligados con los procesos de producción, aún no mecanizados, de la época; 4) El nivel de las técnicas constructivas y la cualificación de la mano de obra eran muy elevados.

En este trabajo se han realizado modelos numéricos 3D de configuraciones estructurales aisladas (*i.e.* edificio individual) y en agregado, de edificios existentes, con la finalidad de determinar y comparar el comportamiento entre las distintas configuraciones estructurales. Los edificios se han modelado incorporando la variabilidad de sus parámetros mecánicos y la demanda sísmica también se ha seleccionado teniendo en cuenta su incertidumbre.

El análisis estructural se ha realizado utilizando y comparando diferentes procedimientos de cálculo estático no-lineal y utilizando el análisis dinámico no lineal incremental como referencia. Se ha realizado una discusión comparando los resultados y el grado de confiabilidad de los diferentes procedimientos utilizados en relación con la tipología de edificios de mampostería no reforzada. Se concluye que los métodos simplificados (*i.e.* estáticos no-lineales) sobrestiman el daño correspondiente a valores bajos de *PGA*, mientras que lo subestiman para valores elevados de *PGA*. Utilizando diferentes criterios, e incluyendo la consideración probabilista de las propiedades mecánicas, así como de la demanda sísmica, se ha caracterizado el daño predecible para estas estructuras mediante funciones de fragilidad y matrices e índices de daño y también se aporta un estudio de la correlación entre los parámetros mecánicos y el daño observado, a partir del cual se observa que existe una alta correlación entre los resultados obtenidos y las variables aleatorias seleccionadas, siendo el módulo de Young, *E*, aquella que presenta los coeficientes de correlación más altos.

Las dificultades comunes en cualquier trabajo que involucra muestras de gran tamaño en relación con la cantidad de recursos y tiempos de computación, han sido resueltas mediante el diseño de muestras adecuadas y suficientemente representativas, así como el empleo de métodos y herramientas de cómputo actuales, como lo son el cómputo paralelo y distribuido.

Palabras clave: *mampostería no reforzada, análisis dinámico incremental, procedimientos estáticos no lineales, análisis probabilista*

Códigos UNESCO

3305 Tecnología de la Construcción; 330532 Ingeniería de Estructuras; 330506 Ingeniería Civil; 331304 Materiales de Construcción; 250705 Sismología y Prospección Sísmica.

Summary

Despite the fact that masonry is one of the oldest and most used building materials, the number of existing studies and experimental data, as well as the applicability of its results (ie extrapolation), are substantially lower than those available for much more recent materials, such as concrete or steel. Furthermore, currently in Europe, a large number of residential buildings belong to masonry typologies. These circumstances justify the study of the characteristics and behaviour of the masonry to guide studies on seismic vulnerability.

In particular, the *Eixample* district of Barcelona, in Spain, presents an urban park of functional housing made up 73% of unreinforced masonry structures, solved by means of load-bearing wall systems, without any consideration of seismic action and that, for the most part, exceed 100 years of useful life. These buildings, characteristics of Barcelona, have elements that differentiate them from other buildings of the same construction typology that can be found in other regions of Europe: 1) the number of floors significantly exceeds the average, being able to find buildings with up to 10 or 11 levels; 2) The buildings share dividing walls (*e.g.* lateral), thereby generating frameworks of buildings known as aggregates; 3) The properties and qualities of the different construction elements are closely linked to the production processes, not yet mechanized, of the time; 4) The level of construction techniques and the qualification of the workforce were very high.

In this work, numerical 3D models of isolated structural configurations (*i.e.* individual building) and in aggregate, of existing buildings have been made, in order to determine and compare the behaviour between the different structural configurations. The buildings have been modelled incorporating the variability of their mechanical parameters and the seismic demand has also been selected taking into account its uncertainty.

The structural analysis has been carried out using and comparing different non-linear static calculation procedures and using the incremental non-linear dynamic analysis as a reference. A discussion was carried out comparing the results and the degree of reliability of the different procedures used in relation to the typology of unreinforced masonry buildings. It can be concluded that the simplified methods (*i.e.* non-linear static) overestimate the damage corresponding to low values of *PGA* and underestimate the damage for higher values of *PGA*. Using different criteria, and including the probabilistic consideration of mechanical properties, as well as seismic demand, the foreseeable damage for these structures has been characterized by fragility functions and matrices and damage indices. A study of the correlation between the mechanical parameters and the observed damage is also provided, from which, a high correlation between the obtained results and the variables of interest, is observed, being the Young's modulus, *E*, the variable with the highest correlation coefficients.

The common difficulties, in any work that involves large samples in relation to the amount of resources and computing time, have been solved through the design of adequate and sufficiently representative samples and by using current computational methods and tools, such as parallel and distributed computing.

Keywords: unreinforced masonry, incremental dynamic analysis, nonlinear static procedures, probabilistic analysis

UNESCO Codes.

3305 Construction Technology; 330532 Structural Engineering; 330506 Civil Engineering; 331304 Building Materials; 250705 Seismology and Seismic Prospecting.

ÍNDICE

1	<u>INTRODUCCIÓN</u>	1
1.1	INTRODUCCIÓN	1
1.2	OBJETIVOS	1
1.2.1	OBJETIVO GENERAL	1
1.2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
1.3	METODOLOGÍA	3
1.3.1	ANÁLISIS ESTÁTICO NO LINEAL	3
1.3.2	ANÁLISIS DINÁMICO NO LINEAL	3
1.3.3	EL ENFOQUE PROBABILISTA	4
1.3.4	EL USO DE HERRAMIENTAS Y MÉTODOS INFORMÁTICOS ACTUALES	4
1.4	ALCANCE DE ESTE ESTUDIO	4
1.5	CONTENIDO DE LA MEMORIA	5
2	<u>ÁMBITO DEL ESTUDIO</u>	7
2.1	LA CIUDAD DE BARCELONA	7
2.1.1	ELEMENTOS DE HISTORIA	7
2.1.2	EL PLAN CERDÀ Y EL 'EIXAMPLE'	9
2.2	LA ACCIÓN SÍSMICA ESPERADA	16
2.2.1	INTRODUCCIÓN	16
2.2.2	PELIGROSIDAD SÍSMICA EN BARCELONA	17
2.2.3	LA NORMA SÍSMICA ESPAÑOLA (NCSE-02)	18
2.2.4	EL EUROCÓDIGO 8 (EC8)	21
2.2.5	ESPECTROS ESPECÍFICOS PARA LA CIUDAD	23
2.2.6	COMPARATIVA	25
2.3	LOS EDIFICIOS	27
2.3.1	GENERALIDADES	27
2.3.2	LA MAMPOSTERÍA DE OBRA DE FÁBRICA DE LADRILLO	28
2.3.3	EVOLUCIÓN Y CLASIFICACIÓN DE TIPOLOGÍAS CONSTRUCTIVAS	36
2.3.4	LOS EDIFICIOS EN ESTUDIO	37
2.3.5	EDIFICIOS AISLADOS	44
2.3.6	EDIFICIOS AGREGADOS	65
2.4	RESUMEN Y CONCLUSIÓN	66
3	<u>METODOLOGÍA</u>	68
3.1	INTRODUCCIÓN	68
3.2	MODELADO DE LOS EDIFICIOS	68
3.2.1	EL ANÁLISIS MODAL	69
3.2.2	EL ANÁLISIS ESTÁTICO NO LINEAL	71
3.3	LAS ACCIONES SÍSMICAS	83
3.3.1	ESPECTROS DE RESPUESTA	83
3.3.2	ACELEROGRAMAS Y ACELEROGRAMAS COMPATIBLES	85
3.4	AMORTIGUAMIENTO	86
3.5	LA RESPUESTA SÍSMICA	89
3.5.1	PUNTO DE CAPACIDAD POR DEMANDA	89

3.5.2	ANÁLISIS DINÁMICO INCREMENTAL	91
3.6	EL DAÑO ESPERADO	92
3.6.1	GRADOS O ESTADOS DE DAÑO	92
3.6.2	FRAGILIDAD	95
3.7	EL ENFOQUE PROBABILISTA	98
3.7.1	EN LOS EDIFICIOS	98
3.7.2	EN LA ACCIÓN	105
3.7.3	EN LOS RESULTADOS ESPERADOS	106
3.8	EL SOFTWARE 3MURI	106
3.9	RECURSOS COMPUTACIONALES ACTUALES	107
3.10	RESUMEN Y DISCUSIÓN	108
4	<u>APLICACIÓN A EDIFICIOS AISLADOS.....</u>	<u>111</u>
4.1	ANÁLISIS MODAL	111
4.2	ANÁLISIS DE CAPACIDAD	114
4.2.1	CURVA DE CAPACIDAD	114
4.2.2	PUNTO DE FLUENCIA Y PUNTO ÚLTIMO	115
4.2.3	OBTENCIÓN DEL SISTEMA EQUIVALENTE DE 1GDL	118
4.2.4	CURVA DE CAPACIDAD EN FORMATO ACELERACIÓN-DESPLAZAMIENTO (ADRS).....	118
4.2.5	REPRESENTACIÓN BILINEAL	119
4.3	FRAGILIDAD Y DAÑO ESPERADO	122
4.3.1	CURVAS DE FRAGILIDAD	122
4.3.2	ESTADOS DE DAÑO	123
4.3.3	PUNTO DE DESEMPEÑO.....	125
4.3.4	GRADO DE DAÑO MEDIO	131
4.4	ANÁLISIS DINÁMICO	133
5	<u>APLICACIÓN A EDIFICIOS AGREGADOS</u>	<u>139</u>
5.1	ANÁLISIS MODAL	139
5.2	ANÁLISIS DE CAPACIDAD	142
5.2.1	CURVA DE CAPACIDAD	142
5.2.2	PUNTO DE FLUENCIA Y PUNTO ÚLTIMO	143
5.2.3	OBTENCIÓN DEL SISTEMA EQUIVALENTE DE 1GDL	145
5.2.4	CURVA DE CAPACIDAD EN FORMATO ACELERACIÓN-DESPLAZAMIENTO (ADRS).....	146
5.2.5	REPRESENTACIÓN BILINEAL	146
5.3	FRAGILIDAD Y DAÑO ESPERADO	149
5.3.1	CURVAS DE FRAGILIDAD	149
5.3.2	ESTADOS DE DAÑO	150
5.3.3	PUNTO DE DESEMPEÑO.....	152
5.3.4	GRADO DE DAÑO MEDIO	157
5.4	ANÁLISIS DINÁMICO INCREMENTAL.....	160
5.4.1	LIMITACIONES EN LOS ANÁLISIS DINÁMICOS	160
5.4.2	RESULTADOS.....	161
6	<u>RESUMEN, DISCUSIÓN, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</u>	<u>165</u>
6.1	INTRODUCCIÓN	165
6.2	RESUMEN	165

6.2.1	SOBRE LAS ACCIONES SÍSMICAS	165
6.2.2	SOBRE LOS EDIFICIOS AISLADOS	166
6.2.3	SOBRE LOS EDIFICIOS AGREGADOS	166
6.2.4	EL DAÑO	166
6.3	DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	167
6.3.1	SOBRE LAS ACCIONES SÍSMICAS	167
6.3.2	SOBRE LOS EDIFICIOS AISLADOS	168
6.3.3	SOBRE LOS EDIFICIOS AGREGADOS	169
6.3.4	SOBRE OTROS ASPECTOS ADICIONALES.....	170
6.4	RECOMENDACIONES Y LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURAS	174
6.4.1	SOBRE LAS ACCIONES SÍSMICAS	174
6.4.2	SOBRE EL ESTUDIO DE EDIFICIOS AISLADOS.....	174
6.4.3	SOBRE EL ESTUDIO DE EDIFICIOS AGREGADOS.....	175
6.5	REFLEXIÓN FINAL	175
 ANEJOS		 183
 A. PRODUCCIÓN CIENTÍFICA GENERADA DURANTE LA TESIS		 183
B. RESULTADOS		194
C. CÓDIGOS MATLAB		364

LISTA DE FIGURAS

FIG. 2-1 DIVISIÓN TERRITORIAL DE LA CIUDAD DE BARCELONA EN DISTRITOS (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	7
FIG. 2-2 EVOLUCIÓN DE LAS MURALLAS QUE RODEABAN A LA CIUDAD DE BARCELONA HASTA EL AÑO 1854 (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	8
FIG. 2-3 PLANO BARCELONA Y SUS ALREDEDORES. PROYECTO PARA EL ENSANCHE DE LA CIUDAD Y SU PUERTO PROPUESTO POR IDELFONSO CERDÀ (FUENTE: ADAPTADO POR EL AUTOR A PARTIR DE LA LITOGRAFÍA DEL ARXIU HISTÒRIC DE LA CIUTAT DE BARCELONA (1860))	10
FIG. 2-4 PLANO BARCELONA Y SUS ALREDEDORES. PROYECTO PARA EL ENSANCHE DE LA CIUDAD Y SU PUERTO PROPUESTO POR ANTONI ROVIRA I TRIAS (FUENTE: ADAPTADO POR EL AUTOR A PARTIR DE LA LITOGRAFÍA DEL ARXIU HISTÒRIC DE LA CIUTAT DE BARCELONA (1860))	11
FIG. 2-5 TRAZADO URBANO TÍPICO DEL DISTRITO DE L'EIXAMPLE (BARCELONA) DE ACUERDO CON LO ESTABLECIDO POR EL PLAN CERDÀ (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	14
FIG. 2-6 A) LATERAL DE UNA MANZANA TÍPICA DEL DISTRITO DE L'EIXAMPLE B) EDIFICIO DE TIPO CENTRAL C) EDIFICIO DE ESQUINA O CHAFLÁN (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	15
FIG. 2-7 DISTRITOS Y TIPOS DE TERRENO DE LA CIUDAD DE BARCELONA, ESPAÑA (SECANELL <i>ET AL.</i> , 2004) (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	17
FIG. 2-8 EVENTOS SÍSMICOS HISTÓRICOS DE 1428 Y 1448 UTILIZADOS PARA LA DEFINICIÓN DEL ESCENARIO SÍSMICO DETERMINISTA DE LA CIUDAD DE BARCELONA, ESPAÑA (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	18
FIG. 2-9 MAPA DE PELIGROSIDAD SÍSMICA DEL TERRITORIO ESPAÑOL (FUENTE: NCSE-02 (2002))	19
FIG. 2-10 ESPECTRO DE RESPUESTA ELÁSTICA NORMALIZADO (5% AMORTIGUADO) SEGÚN NCSE-02 (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	20
FIG. 2-11 ESPECTRO DE RESPUESTA ELÁSTICA (5% AMORTIGUADO) PARA CADA TIPO DE TERRENO Y $ac = 0.04 g$, SEGÚN NCSE-02 (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	21
FIG. 2-12 ESPECTRO DE RESPUESTA ELÁSTICO TIPO 2 PARA TERRENOS TIPO A, B, C, D Y E SEGÚN EC8 (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	23
FIG. 2-13 ESPECTROS DE RESPUESTA ELÁSTICO DETERMINISTAS PARA TERRENOS TIPO R A III SEGÚN ICC (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	25
FIG. 2-14 ESPECTROS DE RESPUESTA ELÁSTICO PROBABILISTAS PARA TERRENOS TIPO R A III SEGÚN ICC (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	25
FIG. 2-15 COMPARATIVA DE LOS ESPECTROS NORMALIZADOS DE RESPUESTA ELÁSTICO ESPERADOS EN EL DISTRITO DE L'EIXAMPLE (BARCELONA) (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	26
FIG. 2-16 COMPARATIVA DE LOS ESPECTROS DE RESPUESTA ELÁSTICO ESPERADOS EN EL DISTRITO DE L'EIXAMPLE (BARCELONA) (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	27
FIG. 2-17 ELEMENTOS GEOMÉTRICOS DEL LADRILLO (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	29
FIG. 2-18 DISTINTOS EJEMPLOS DE APAREJOS (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	34
FIG. 2-19 ELEMENTOS BÁSICOS DE UN MURO (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	35
FIG. 2-20 CLASIFICACIÓN DEL PARQUE DE VIVIENDAS DEL DISTRITO DE L'EIXAMPLE DE BARCELONA DE ACUERDO A SU PERIODO DE CONSTRUCCIÓN: A) PREMODERNISMO, B) MODERNISMO, C) POSMODERNISMO, Y D) CONTEMPORÁNEO (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR BASADO EN LAS ILUSTRACIONES PROVISTAS EN PARICIO <i>ET AL.</i> (1999))	37
FIG. 2-21 PATIOS DE LUCES INTERNOS DISTRIBUIDOS EN PLANTA (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	39
FIG. 2-22 EJEMPLO DEL USO DE LA BÓVEDA CATALANA EN ESCALERAS (FUENTE: ELABORADO POR EL AUTOR)	40
FIG. 2-23 APERTURAS EN A) FACHADA FRONTAL, Y B) PATIO INTERNO (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	41
FIG. 2-24 SISTEMA DE FORJADO UNIDIRECCIONAL A BASE DE VIGUETAS METÁLICAS Y BOVEDILLAS CERÁMICAS (FUENTE: ELABORADO POR EL AUTOR)	42
FIG. 2-25 VISTA ISOMÉTRICA, FRONTAL E INFERIOR DE LOS FORJADOS UNIDIRECCIONALES DE VIGUETA METÁLICA Y BOVEDILLA CERÁMICA, ELEMENTOS QUE LOS COMPONEN Y DIMENSIONES COMUNES (FUENTE: ELABORADO POR EL AUTOR)	42
FIG. 2-26 A) ESPACIO DIÁFANO PARA USO COMERCIAL O DE RESTAURACIÓN EN PLANTA BAJA; B) USO DE JÁCENAS Y PILARES EN SUSTITUCIÓN DE MUROS DE CARGA; Y C) DETALLE DE DINTELES, PILARES Y JÁCENAS EMPLEADOS EN PLANTA BAJA (FUENTE: ELABORADO POR EL AUTOR)	43
FIG. 2-27 VISTA EN ALTURA DEL EDIFICIO ED-01. IZQUIERDA: EDIFICIO COMPLETO. DERECHA: DETALLE DE LA FACHADA FRONTAL (FUENTE: ELABORADO POR EL AUTOR)	45
FIG. 2-28 VISTA EN ALTURA DE CORTE EN DIRECCIÓN PERPENDICULAR A FACHADA PRINCIPAL DEL EDIFICIO ED-01. IZQUIERDA: ISOMÉTRICA. DERECHA: FRONTAL (FUENTE: ELABORADO POR EL AUTOR)	45
FIG. 2-29 VISTA EN ALTURA DE CORTE EN DIRECCIÓN PARALELA A FACHADA PRINCIPAL DEL EDIFICIO ED-01. IZQUIERDA: ISOMÉTRICA. DERECHA: FRONTAL (FUENTE: ELABORADO POR EL AUTOR)	46

FIG. 2-30 DISTRIBUCIÓN EN PLANTA TIPO DEL EDIFICIO ED-01. IZQUIERDA: ISOMÉTRICO. DERECHA: VISTA EN PLANTA Y DIRECCIÓN DE FORJADOS (FUENTE: ELABORADO POR EL AUTOR)	46
FIG. 2-31 DISTRIBUCIÓN EN PLANTA BAJA DEL EDIFICIO ED-01. IZQUIERDA: ISOMÉTRICO. DERECHA: VISTA EN PLANTA (FUENTE: ELABORADO POR EL AUTOR)	47
FIG. 2-32 VISTA ELEVADA DEL EDIFICIO ED-01 (FUENTE: ELABORADO POR EL AUTOR A PARTIR DE PLANOS DEL ARCHIVO HISTÓRICO DEL COLEGIO DE ARQUITECTOS DE CATALUÑA)	47
FIG. 2-33 VISTA EN PLANTA DE PLANTA BAJA DEL EDIFICIO ED-01 (FUENTE: ELABORADO POR EL AUTOR)	48
FIG. 2-34 VISTA EN PLANTA DE PLANTAS TIPO DEL EDIFICIO ED-01 (FUENTE: ELABORADO POR EL AUTOR).....	48
FIG. 2-35 MODELO TREMURI EDIFICIO ED-01 COMPLETO. A) VISTA ISOMÉTRICA FACHADA PRINCIPAL. B) VISTA ISOMÉTRICA FACHADA PRINCIPAL SIN MUROS. C) VISTA ISOMÉTRICA FACHADA TRASERA	49
FIG. 2-36 MODELO TREMURI EDIFICIO ED-01 PLANTA BAJA. A) VISTA ISOMÉTRICA FACHADA PRINCIPAL. B) VISTA ISOMÉTRICA FACHADA PRINCIPAL SIN MUROS. C) VISTA ISOMÉTRICA FACHADA TRASERA	50
FIG. 2-37 MODELO TREMURI EDIFICIO ED-01 PLANTA TIPO. A) VISTA ISOMÉTRICA FACHADA PRINCIPAL. B) VISTA ISOMÉTRICA FACHADA PRINCIPAL SIN MUROS. C) VISTA ISOMÉTRICA FACHADA TRASERA	50
FIG. 2-38 PLANTA BAJA DEL EDIFICIO ED-02. ARRIBA: ISOMÉTRICO FRONTAL SIN PERFILES METÁLICOS (JÁCENAS). ABAJO: ISOMÉTRICO LATERAL SIN PERFILES METÁLICOS (JÁCENAS) (FUENTE: ELABORADO POR EL AUTOR)	51
FIG. 2-39 PLANTA BAJA DEL EDIFICIO ED-02. NERVADO DE COLUMNAS PARA ARRIOSTRAMIENTO DE MUROS (FUENTE: ELABORADO POR EL AUTOR)	51
FIG. 2-40 PLANTA BAJA DEL EDIFICIO ED-02. NÚCLEO CENTRAL CON CUBO DE ESCALERA, CUBO DE ASCENSOR Y PATIO DE LUCES (FUENTE: ELABORADO POR EL AUTOR)	52
FIG. 2-41 VISTA ELEVADA DEL EDIFICIO ED-02 (FUENTE: ELABORADO POR EL AUTOR A PARTIR DE PLANOS DEL ARCHIVO HISTÓRICO DEL COLEGIO DE ARQUITECTOS DE CATALUÑA)	52
FIG. 2-42 VISTA EN PLANTA DE PLANTA BAJA DEL EDIFICIO ED-02 (FUENTE: ELABORADO POR EL AUTOR)	53
FIG. 2-43 VISTA EN PLANTA DE PLANTAS TIPO DEL EDIFICIO ED-02 (FUENTE: ELABORADO POR EL AUTOR).....	53
FIG. 2-44 MODELO TREMURI EDIFICIO ED-02 COMPLETO. A) VISTA ISOMÉTRICA FACHADA PRINCIPAL. B) VISTA ISOMÉTRICA FACHADA PRINCIPAL SIN MUROS. C) VISTA ISOMÉTRICA FACHADA TRASERA	54
FIG. 2-45 MODELO TREMURI EDIFICIO ED-02 PLANTA BAJA. A) VISTA ISOMÉTRICA FACHADA PRINCIPAL. B) VISTA ISOMÉTRICA FACHADA PRINCIPAL SIN MUROS. C) VISTA ISOMÉTRICA FACHADA TRASERA	55
FIG. 2-46 MODELO TREMURI EDIFICIO ED-02 PLANTA TIPO. A) VISTA ISOMÉTRICA FACHADA PRINCIPAL. B) VISTA ISOMÉTRICA FACHADA PRINCIPAL SIN MUROS. C) VISTA ISOMÉTRICA FACHADA TRASERA	55
FIG. 2-47 VISTA EN ALTURA DEL EDIFICIO ED-03. IZQUIERDA: EDIFICIO COMPLETO. DERECHA: CORTE EN DIRECCIÓN PERPENDICULAR A FACHADA FRONTAL (FUENTE: ELABORADO POR EL AUTOR)	56
FIG. 2-48 PLANTA BAJA DEL EDIFICIO ED-03. IZQUIERDA: VISTA ISOMÉTRICA. DERECHA: VISTA EN ALTURA (FUENTE: ELABORADO POR EL AUTOR)	56
FIG. 2-49 PLANTA TIPO DEL EDIFICIO ED-03. IZQUIERDA: VISTA ISOMÉTRICA. DERECHA: VISTA EN ALTURA (FUENTE: ELABORADO POR EL AUTOR)	56
FIG. 2-50 VISTA ELEVADA DEL EDIFICIO ED-03 (FUENTE: ELABORADO POR EL AUTOR A PARTIR DE PLANOS DEL ARCHIVO HISTÓRICO DEL COLEGIO DE ARQUITECTOS DE CATALUÑA)	57
FIG. 2-51 VISTA EN PLANTA DE PLANTA BAJA DEL EDIFICIO ED-03 (FUENTE: ELABORADO POR EL AUTOR)	57
FIG. 2-52 VISTA EN PLANTA DE PLANTAS TIPO DEL EDIFICIO ED-03 (FUENTE: ELABORADO POR EL AUTOR).....	57
FIG. 2-53 MODELO TREMURI EDIFICIO ED-03 COMPLETO. A) VISTA ISOMÉTRICA FACHADA PRINCIPAL. B) VISTA ISOMÉTRICA FACHADA PRINCIPAL SIN MUROS. C) VISTA ISOMÉTRICA FACHADA TRASERA	58
FIG. 2-54 MODELO TREMURI EDIFICIO ED-03 PLANTA BAJA. A) VISTA ISOMÉTRICA FACHADA PRINCIPAL. B) VISTA ISOMÉTRICA FACHADA PRINCIPAL SIN MUROS. C) VISTA ISOMÉTRICA FACHADA TRASERA	59
FIG. 2-55 MODELO TREMURI EDIFICIO ED-03 PLANTA TIPO. A) VISTA ISOMÉTRICA FACHADA PRINCIPAL. B) VISTA ISOMÉTRICA FACHADA PRINCIPAL SIN MUROS. C) VISTA ISOMÉTRICA FACHADA TRASERA	59
FIG. 2-56 VISTA EN PLANTA DE PLANTA BAJA DEL EDIFICIO ED-04 (FUENTE: ELABORADO POR EL AUTOR)	60
FIG. 2-57 VISTA EN PLANTA DE PLANTA TIPO DEL EDIFICIO ED-04 (FUENTE: ELABORADO POR EL AUTOR)	60
FIG. 2-58 VISTAS ISOMÉTRICAS DE PLANTA BAJA DEL EDIFICIO ED-04 (FUENTE: ELABORADO POR EL AUTOR)	61
FIG. 2-59 VISTAS ISOMÉTRICAS DE PLANTA TIPO DEL EDIFICIO ED-04 (FUENTE: ELABORADO POR EL AUTOR)	62
FIG. 2-60 VISTA ELEVADA DEL EDIFICIO ED-04 (FUENTE: ELABORADO POR EL AUTOR A PARTIR DE PLANOS DEL ARCHIVO HISTÓRICO DEL COLEGIO DE ARQUITECTOS DE CATALUÑA)	63
FIG. 2-61 VISTA EN PLANTA DE PLANTA BAJA DEL EDIFICIO ED-04 (FUENTE: ELABORADO POR EL AUTOR)	63
FIG. 2-62 VISTA EN PLANTA DE PLANTAS TIPO DEL EDIFICIO ED-04 (FUENTE: ELABORADO POR EL AUTOR).....	63
FIG. 2-63 MODELO TREMURI EDIFICIO ED-04 COMPLETO. A) VISTA ISOMÉTRICA FACHADA PRINCIPAL. B) VISTA ISOMÉTRICA FACHADA PRINCIPAL SIN MUROS. C) VISTA ISOMÉTRICA FACHADA TRASERA	64

FIG. 2-64 MODELO TREMURI EDIFICIO ED-04 PLANTA BAJA. A) VISTA ISOMÉTRICA FACHADA PRINCIPAL. B) VISTA ISOMÉTRICA FACHADA PRINCIPAL SIN MUROS. C) VISTA ISOMÉTRICA FACHADA TRASERA	65
FIG. 2-65 MODELO TREMURI EDIFICIO ED-04 PLANTA TIPO. A) VISTA ISOMÉTRICA FACHADA PRINCIPAL. B) VISTA ISOMÉTRICA FACHADA PRINCIPAL SIN MUROS. C) VISTA ISOMÉTRICA FACHADA TRASERA	65
FIG. 3-1 SISTEMA DE 1GDL (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	70
FIG. 3-2 MODO FUNDAMENTAL DE VIBRACIÓN DE UNA ESTRUCTURA A PARTIR DE SU DISCRETIZACIÓN EN UN SISTEMA DE MÚLTIPLES GRADOS DE LIBERTAD (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	71
FIG. 3-3 OBTENCIÓN DE LA CURVA DE CAPACIDAD DE UNA ESTRUCTURA SOMETIDA A UNA CARGA LATERAL MONOTÓNICAMENTE CRECIENTE (FUENTE: ELABORADO POR EL AUTOR)	75
FIG. 3-4 PRINCIPALES FORMAS DE PATRONES DE CARGA QUE PUEDEN SER APLICADOS A UN SISTEMA MDGL (FUENTE: PREPARADA POR EL AUTOR)	75
FIG. 3-5 TRANSFORMACIÓN DE LA CURVA DE CAPACIDAD (SISTEMA ORIGINAL DE MGD) A ESPECTRO DE CAPACIDAD (SISTEMA EQUIVALENTE DE 1GDL [INDICADO CON UN *]) (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	77
FIG. 3-6 RELACIONES PROPUESTAS EN EL ATC-40 PARA LA OBTENCIÓN DE ESPECTROS DE CAPACIDAD A PARTIR DE LA CURVA DE CAPACIDAD DEL SISTEMA DE MGD (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	78
FIG. 3-7 TRANSFORMACIÓN DE LA CURVA DE CAPACIDAD (SISTEMA ORIGINAL DE MGD) A UN SISTEMA EQUIVALENTE CON UNIDADES DE FUERZA-DEFORMACIÓN (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	79
FIG. 3-8 RELACIONES PROPUESTAS EN EL N2 PARA LA OBTENCIÓN DE ESPECTROS DE CAPACIDAD A PARTIR DE LA CURVA DE CAPACIDAD DEL SISTEMA DE MGD (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	80
FIG. 3-9 CRITERIO DE IGUALDAD DE ÁREAS PARA LA OBTENCIÓN DE LA REPRESENTACIÓN BILINEAL DE LA CAPACIDAD DE LA ESTRUCTURA (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	80
FIG. 3-10 AJUSTE BILINEAL DE LA CURVA DE CAPACIDAD SEGÚN ATC-40 EC8 (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	81
FIG. 3-11 AJUSTE BILINEAL DE LA CURVA DE CAPACIDAD SEGÚN N2 EC8 (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	81
FIG. 3-12 AJUSTE BILINEAL DE LA CURVA DE CAPACIDAD SEGÚN LA APROXIMACIÓN DEL 10% (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	82
FIG. 3-13 AJUSTE BILINEAL DE LA CURVA DE CAPACIDAD SEGÚN NTC-08 (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	83
FIG. 3-14 CONVERSIÓN DEL ESPECTRO ELÁSTICO DE RESPUESTA DE SU FORMATO T VS. SA, AL FORMATO ADRS (Sd vs. Sa) (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	84
FIG. 3-15 ESPECTRO DE DEMANDA PARA DUCTILIDAD CONSTANTE EN FORMATO ACELERACIÓN-DESPLAZAMIENTO (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	85
FIG. 3-16 SELECCIÓN DE REGISTROS DE ACELERACIÓN DEL TERRENO MEDIANTE EL MÉTODO DEL ESPECTRO CONDICIONAL (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	86
FIG. 3-17 COEFICIENTE DE AMORTIGUAMIENTO VS FRECUENCIA NATURAL (FUENTE: PREPARADA POR EL AUTOR)	88
FIG. 3-18 PUNTO DE DESEMPEÑO OBTENIDO A TRAVÉS DEL PROCEDIMIENTO ITERATIVO SEGÚN ATC-40 (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	90
FIG. 3-19 DETERMINACIÓN DEL DESPLAZAMIENTO ESPECTRAL OBJETIVO PARA EL SISTEMA EQUIVALENTE DE 1GDL Y RANGO DE PERIODOS MEDIANOS Y LARGOS (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	90
FIG. 3-20 DETERMINACIÓN DEL DESPLAZAMIENTO ESPECTRAL OBJETIVO PARA EL SISTEMA EQUIVALENTE DE 1GDL Y RANGO DE PERIODOS CORTOS (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	91
FIG. 3-21 CURVA DEL ÍNDICE DE DAÑO (ID vs. IM) (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	95
FIG. 3-22 CURVAS DE FRAGILIDAD (PROB. VS. IM) PARA ESTADOS DE DAÑO NO-NULO (i=1, 2, 3, 4) (FUENTE: PREPARADA POR EL AUTOR)	97
FIG. 3-23 CURVA DE DISTRIBUCIÓN NORMAL DE DOS COLAS CON PUNTUACIONES Z PARA DIFERENTES INTERVALOS DE CONFIANZA (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	99
FIG. 3-24 MATRIZ DE CONJUNTOS DE PROPIEDADES MECÁNICAS PARA LA POBLACIÓN ANALIZADA, QUE INCLUYE: (A) HISTOGRAMA Y FUNCIONES DE DENSIDAD DE PROBABILIDAD AJUSTADA Y CUMULATIVA PARA CADA VARIABLE DE INTERÉS; Y (B) REGRESIÓN LINEAL Y COEFICIENTE CORRELACIÓN PARA CADA COMBINATORIA DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS ANALIZADAS (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	102
FIG. 3-25 PROCESO DE OBTENCIÓN DEL NÚMERO DE UNIDADES REQUERIDAS PARA LA OBTENCIÓN DE UNA MUESTRA SUFICIENTEMENTE REPRESENTATIVA (N = 278) A PARTIR DE UNA POBLACIÓN INICIAL (N = 1000) (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	105
FIG. 3-26 TEST DE KOLMOGOROV-SMIRNOV PARA UNA MUESTRA. FUNCIONES DE DISTRIBUCIÓN ACUMULADA (CDF) EMPÍRICA Y ESTÁNDAR (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	105
FIG. 3-27 MODELO HISTERÉTICO NO LINEAL (FUENTE: ADAPTADA DE GAMBAROTTA & LAGOMARSINO (1997))	107
FIG. 4-1 CURVAS DE CAPACIDAD PARA LAS DIRECCIONES DE ANÁLISIS +X (IZQ.) Y +Y (DER.) DEL EDIFICIO ED-01 (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	115

FIG. 4-2 SELECCIÓN DEL PUNTO ÚLTIMO EN LAS CURVAS DE CAPACIDAD PARA LAS DIRECCIONES DE ANÁLISIS +X (IZQ.) Y +Y (DER.) DEL EDIFICIO ED-01 (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	115
FIG. 4-3 CURVAS DE CAPACIDAD DE LOS SISTEMAS EQUIVALENTES DE 1GDL PARA EL EDIFICIO ED-01 DE ACUERDO CON LO ESTABLECIDO EN EL PROCEDIMIENTO N2 PARA LAS DIRECCIONES DE ANÁLISIS +X (IZQ.) Y +Y (DER.) (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	118
FIG. 4-4 CURVAS DE CAPACIDAD EN FORMATO DESPLAZAMIENTO-ACELERACIÓN (ADRS) DEL EDIFICIO ED-01 DE ACUERDO CON LO ESTABLECIDO EN EL PROCEDIMIENTO N2 PARA LAS DIRECCIONES DE ANÁLISIS +X (IZQ.) Y +Y (DER.) (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	119
FIG. 4-5 REPRESENTACIÓN BILINEAL PROMEDIO Y NUBES DE VALORES DE LOS PUNTOS DE FLUENCIA Y ÚLTIMO DEL EDIFICIO ED-01 DE ACUERDO CON LO ESTABLECIDO EN EL PROCEDIMIENTO N2 PARA LAS DIRECCIONES DE ANÁLISIS +X (IZQ.) Y +Y (DER.) (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	119
FIG. 4-6 CURVAS DE FRAGILIDAD PARA LA DIRECCIÓN +X DEL EDIFICIO ED-01 (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	122
FIG. 4-7 CURVAS DE FRAGILIDAD PARA LA DIRECCIÓN +Y DEL EDIFICIO ED-01 (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	123
FIG. 4-8 PROBABILIDADES DE OCURRENCIA DE LOS DISTINTOS ESTADOS DE DAÑO PARA DIVERSOS DESPLAZAMIENTOS ESPECTRALES POSIBLES OBTENIDOS A PARTIR DE LAS CURVAS DE FRAGILIDAD EN LA DIRECCIÓN +X DEL EDIFICIO ED-01 (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	124
FIG. 4-9 PROBABILIDADES DE OCURRENCIA DE LOS DISTINTOS ESTADOS DE DAÑO PARA DIVERSOS DESPLAZAMIENTOS ESPECTRALES POSIBLES OBTENIDOS A PARTIR DE LAS CURVAS DE FRAGILIDAD EN LA DIRECCIÓN +Y DEL EDIFICIO ED-01 (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	124
FIG. 4-10 DESPLAZAMIENTOS ESPECTRALES, S_D , DE LOS PUNTOS DE DESEMPEÑO, P_p , OBTENIDOS PARA $PGA = 0.04$ G DEL EDIFICIO ED-01 EN LAS DIRECCIONES +X (IZQ.) Y +Y (DER.), DE ACUERDO CON LO ESTABLECIDO EN EL PROCEDIMIENTO N2 (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	125
FIG. 4-11 DESPLAZAMIENTOS ESPECTRALES, S_D , DE LOS PUNTOS DE DESEMPEÑO, P_p , OBTENIDOS PARA $PGA = 0.141$ G DEL EDIFICIO ED-01 EN LAS DIRECCIONES +X (IZQ.) Y +Y (DER.), DE ACUERDO CON LO ESTABLECIDO EN EL PROCEDIMIENTO N2 (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	126
FIG. 4-12 DESPLAZAMIENTOS ESPECTRALES, S_D , DE LOS PUNTOS DE DESEMPEÑO, P_p , OBTENIDOS PARA $PGA = 0.194$ G DEL EDIFICIO ED-01 EN LAS DIRECCIONES +X (IZQ.) Y +Y (DER.), DE ACUERDO CON LO ESTABLECIDO EN EL PROCEDIMIENTO N2 (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	126
FIG. 4-13 CURVA DEL GRADO DE DAÑO MEDIO (I.E. ÍNDICE DE DAÑO, DI) PARA EL EDIFICIO ED-01 EN LA DIRECCIÓN +X (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	131
FIG. 4-14 CURVA DEL GRADO DE DAÑO MEDIO (I.E. ÍNDICE DE DAÑO, DI) PARA EL EDIFICIO ED-01 EN LA DIRECCIÓN +Y (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	131
FIG. 4-15 DISTRIBUCIÓN DE LOS 370 ANÁLISIS DINÁMICOS LLEVADOS A CABO DE ACUERDO CON LOS REGISTROS SÍSMICOS (7), PGA (5), Y CONJUNTOS DE PROPIEDADES MECÁNICAS MATERIALES (278) DISPONIBLES (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	134
FIG. 4-16 EJEMPLO DE LA HISTORIA TEMPORAL OBTENIDO A PARTIR DE LOS ANÁLISIS DINÁMICOS PARA UNA DE LAS UNIDADES DE LA MUESTRA PARA EL EDIFICIO ED-01 (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	135
FIG. 4-17 DESPLAZAMIENTO EN EL TECHO VS PGA DE LOS DISTINTOS ANÁLISIS DINÁMICOS REALIZADOS EN EL EDIFICIO ED-01 EN LA DIRECCIÓN +X (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	135
FIG. 4-18 DESPLAZAMIENTO EN EL TECHO VS PGA DE LOS DISTINTOS ANÁLISIS DINÁMICOS REALIZADOS EN EL EDIFICIO ED-01 EN LA DIRECCIÓN +Y (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	136
FIG. 4-19 CURVA DE DAÑO ESPERADO PARA EL EDIFICIO ED-01 EN LA DIRECCIÓN +X Y UN $IM = PGA$ (IZQ) Ó $IM = S_D$ (DER.) (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	137
FIG. 5-1 CURVAS DE CAPACIDAD PARA LAS DIRECCIONES DE ANÁLISIS +X (IZQ.) Y +Y (DER.) DEL EDIFICIO AGREGADO AG-01 (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	143
FIG. 5-2 SELECCIÓN DEL PUNTO ÚLTIMO EN LAS CURVAS DE CAPACIDAD PARA LAS DIRECCIONES DE ANÁLISIS +X (IZQ.) Y +Y (DER.) DEL EDIFICIO AGREGADO AG-01 (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	143
FIG. 5-3 CURVAS DE CAPACIDAD DE LOS SISTEMAS EQUIVALENTES DE 1GDL PARA EL AGREGADO AG-01 DE ACUERDO CON LO ESTABLECIDO EN EL PROCEDIMIENTO N2 PARA LAS DIRECCIONES DE ANÁLISIS +X (IZQ.) Y +Y (DER.) (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	146
FIG. 5-4 CURVAS DE CAPACIDAD EN FORMATO DESPLAZAMIENTO-ACELERACIÓN (ADRS) DEL AGREGADO AG-01 DE ACUERDO CON LO ESTABLECIDO EN EL PROCEDIMIENTO N2 PARA LAS DIRECCIONES DE ANÁLISIS +X (IZQ.) Y +Y (DER.) (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	146
FIG. 5-5 REPRESENTACIÓN BILINEAL PROMEDIO Y NUBES DE VALORES DE LOS PUNTOS DE FLUENCIA Y ÚLTIMO DEL AGREGADO AG-01 DE ACUERDO CON LO ESTABLECIDO EN EL PROCEDIMIENTO N2 PARA LAS DIRECCIONES DE ANÁLISIS +X (IZQ.) Y +Y (DER.) (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	147
FIG. 5-6 CURVAS DE FRAGILIDAD PARA LA DIRECCIÓN +X DEL AGREGADO AG-01 (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR) ...	150

FIG. 5-7 CURVAS DE FRAGILIDAD PARA LA DIRECCIÓN +Y DEL AGREGADO AG-01 (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR) ...	150
FIG. 5-8 PROBABILIDADES DE OCURRENCIA DE LOS DISTINTOS ESTADOS DE DAÑO PARA DIVERSOS DESPLAZAMIENTOS ESPECTRALES POSIBLES OBTENIDOS A PARTIR DE LAS CURVAS DE FRAGILIDAD EN LA DIRECCIÓN +X DEL AGREGADO AG-01 (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	151
FIG. 5-9 PROBABILIDADES DE OCURRENCIA DE LOS DISTINTOS ESTADOS DE DAÑO PARA DIVERSOS DESPLAZAMIENTOS ESPECTRALES POSIBLES OBTENIDOS A PARTIR DE LAS CURVAS DE FRAGILIDAD EN LA DIRECCIÓN +Y DEL AGREGADO AG-01 (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	152
FIG. 5-10 DESPLAZAMIENTOS ESPECTRALES, S_D , DE LOS PUNTOS DE DESEMPEÑO, P_p , OBTENIDOS PARA $PGA = 0.04$ G DEL AGREGADO AG-01 EN LAS DIRECCIONES +X (IZQ.) Y +Y (DER.), DE ACUERDO CON LO ESTABLECIDO EN EL PROCEDIMIENTO N2 (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	153
FIG. 5-11 DESPLAZAMIENTOS ESPECTRALES, S_D , DE LOS PUNTOS DE DESEMPEÑO, P_p , OBTENIDOS PARA $PGA = 0.141$ G DEL AGREGADO AG-01 EN LAS DIRECCIONES +X (IZQ.) Y +Y (DER.), DE ACUERDO CON LO ESTABLECIDO EN EL PROCEDIMIENTO N2 (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	153
FIG. 5-12 DESPLAZAMIENTOS ESPECTRALES, S_D , DE LOS PUNTOS DE DESEMPEÑO, P_p , OBTENIDOS PARA $PGA = 0.194$ G DEL AGREGADO AG-01 EN LAS DIRECCIONES +X (IZQ.) Y +Y (DER.), DE ACUERDO CON LO ESTABLECIDO EN EL PROCEDIMIENTO N2 (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	153
FIG. 5-13 CURVA DEL GRADO DE DAÑO MEDIO (I.E. ÍNDICE DE DAÑO, DI) PARA EL AGREGADO AG-01 EN LA DIRECCIÓN +X (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	158
FIG. 5-14 CURVA DEL GRADO DE DAÑO MEDIO (I.E. ÍNDICE DE DAÑO, DI) PARA EL AGREGADO AG-01 EN LA DIRECCIÓN +Y (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	158
FIG. 5-15 DESPLAZAMIENTO EN EL TECHO VS PGA DE LOS DISTINTOS ANÁLISIS DINÁMICOS REALIZADOS EN EL AGREGADO AG-01 EN LA DIRECCIÓN +X (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	161
FIG. 5-16 DESPLAZAMIENTO EN EL TECHO VS PGA DE LOS DISTINTOS ANÁLISIS DINÁMICOS REALIZADOS EN EL AGREGADO AG-01 EN LA DIRECCIÓN +Y (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR).....	162
FIG. 5-17 CURVA DE DAÑO ESPERADO PARA EL AGREGADO AG-01 EN LA DIRECCIÓN +X Y UN $IM = PGA$ (IZQ) Ó $IM = S_D$ (DER.) (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	163

LISTA DE TABLAS

TABLA 2-1 DISTRIBUCIÓN POR DISTRITOS DEL NÚMERO DE HABITANTES Y EDIFICIOS DE LA CIUDAD DE BARCELONA (FUENTE: INSTITUT D'ESTADÍSTICA DE CATALUNYA (2011) (2019B)).....	12
TABLA 2-2 PLANTAS SOBRE RASANTE DE EDIFICIOS DESTINADOS A VIVIENDA DE LA CIUDAD DE BARCELONA, POR DISTRITO (FUENTE: INSTITUT D'ESTADÍSTICA DE CATALUNYA (2011))	12
TABLA 2-3 ESTADO DE CONSERVACIÓN DE EDIFICIOS DESTINADOS A VIVIENDA DE LA CIUDAD DE BARCELONA, POR DISTRITO (FUENTE: INSTITUT D'ESTADÍSTICA DE CATALUNYA (2011))	12
TABLA 2-4 AÑO DE CONSTRUCCIÓN DE EDIFICIOS DESTINADOS A VIVIENDA DE LA CIUDAD DE BARCELONA, POR DISTRITO (FUENTE: INSTITUT D'ESTADÍSTICA DE CATALUNYA (2011))	13
TABLA 2-5 COEFICIENTE DE AMPLIFICACIÓN DEL TERRENO DE ACUERDO A LA NORMATIVA SISMORRESISTENTE (FUENTE: NCSE-02 (2002))	19
TABLA 2-6 TIPOS DE TERRENO DEL TERRITORIO ESPAÑOL DE ACUERDO A LA NORMATIVA SISMORRESISTENTE (FUENTE: NCSE-02 (2002))	19
TABLA 2-7 TIPOS DE TERRENO DE ACUERDO CON EC8 (FUENTE: ELABORADO POR EL AUTOR).....	21
TABLA 2-8 VALORES DE LOS PARÁMETROS QUE DEFINEN LOS ESPECTROS DE RESPUESTA HORIZONTALES DE TIPO I Y II PARA CADA TIPO DE TERRENO SEGÚN EL EC8 (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	22
TABLA 2-9 CLASIFICACIÓN DE LA IMPORTANCIA DE LOS EDIFICIOS SEGÚN SU CLASE DE ACUERDO CON LO ESTABLECIDO EN EL EC8 (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	22
TABLA 2-10 TIPOS DE TERRENO EN LA CIUDAD DE BARCELONA DE ACUERDO CON LOS ESTUDIOS REALIZADOS POR CID (1998) (FUENTE: ELABORADO POR EL AUTOR)	23
TABLA 2-11 VALORES DE LOS PARÁMETROS QUE DEFINEN LOS ESPECTROS DE RESPUESTA HORIZONTALES DE LOS ESCENARIOS DETERMINISTA Y PROBABILISTA PARA CADA TIPO DE TERRENO SEGÚN EL ICC (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR) ...	24
TABLA 2-12 EQUIVALENCIA DE LOS DISTINTOS TIPOS DE TERRENO DE ACUERDO CON LA NCSE-02, EC8 Y ESTUDIOS DE CID (1998) (FUENTE: ELABORADO POR EL AUTOR)	26
TABLA 2-13 CENSO 2011 DE EDIFICIOS E INMUEBLES DE LA CIUDAD DE BARCELONA (FUENTE: INSTITUT D'ESTADÍSTICA DE CATALUNYA (2011))	27
TABLA 2-14 PLANTAS SOBRE RASANTE DE EDIFICIOS DESTINADOS A VIVIENDA DE LA CIUDAD DE BARCELONA (FUENTE: INSTITUT D'ESTADÍSTICA DE CATALUNYA (2011)).....	27
TABLA 2-15 ESTADO DE CONSERVACIÓN DE EDIFICIOS DESTINADOS A VIVIENDA DE LA CIUDAD DE BARCELONA (FUENTE: INSTITUT D'ESTADÍSTICA DE CATALUNYA (2011)).....	28
TABLA 2-16 AÑO DE CONSTRUCCIÓN DE EDIFICIOS DESTINADOS A VIVIENDA DE LA CIUDAD DE BARCELONA (FUENTE: INSTITUT D'ESTADÍSTICA DE CATALUNYA (2011))	28
TABLA 2-17 EJEMPLOS DE EQUIVALENCIAS EN EL DIMENSIONAMIENTO DE LADRILLOS SEGÚN LA ORDENANZA VIGENTE (FUENTE: ELABORADO POR EL AUTOR)	30
TABLA 2-18 ESPESORES TÍPICOS DE PAREDES SEGÚN SU TIPO Y LOCALIZACIÓN (FUENTE: ELABORADO POR EL AUTOR).....	38
TABLA 2-19 PROPIEDADES MECÁNICAS MATERIALES DE LOS LADRILLOS (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR).....	44
TABLA 3-1 DEFINICIÓN DE LOS ESTADOS DE DAÑO DE ACUERDO CON DIFERENTES CRITERIOS DE DEFINICIÓN (FUENTE: ADAPTADO DE KAPPOS & PAPANIKOLAOU (2016))	93
TABLA 3-2 VALORES PARA LOS FACTORES DE DAÑO GENERAL	95
TABLA 3-3 DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD BINOMIAL DE DIFERENTES ESTADOS DE DAÑO DE ACUERDO CON LO PROPUESTO EN EL DOCUMENTO RISK-UE (FUENTE: MILUTINOVIC & TRENDAFILOSKI (2003), GIOVINAZZI & LAGOMARSINO (2002))	97
TABLA 3-4 MEDIA Y DESVIACIÓN ESTÁNDAR DE LAS VARIABLES DE INTERÉS (TODAS LAS UNIDADES EN MEGAPASCALES, MPA (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	101
TABLA 4-1 RESULTADOS DEL ANÁLISIS MODAL PARA EL EDIFICIO AISLADO ED-01 (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)....	111
TABLA 4-2 RESULTADOS DEL ANÁLISIS MODAL PARA EL EDIFICIO AISLADO ED-01 (CONTINUACIÓN) (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	112
TABLA 4-3 COEFICIENTES DE CORRELACIÓN ENTRE LOS PERÍODOS FUNDAMENTALES DE VIBRACIÓN Y LAS VARIABLES ALEATORIAS DE INTERÉS PARA AMBAS DIRECCIONES DEL EDIFICIO ED-01 (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	113
TABLA 4-4 RESULTADOS DEL ANÁLISIS MODAL PARA LOS DISTINTOS EDIFICIOS AISLADOS (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	113
TABLA 4-5 RESULTADOS DEL ANÁLISIS MODAL PARA LOS DISTINTOS EDIFICIOS AISLADOS (CONTINUACIÓN) (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	113
TABLA 4-6 COEFICIENTES DE CORRELACIÓN ENTRE LOS PERIODOS FUNDAMENTALES PARA CADA DIRECCIÓN Y LAS VARIABLES ALEATORIAS DE INTERÉS DE LOS DIFERENTES EDIFICIOS AISLADOS (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	114

TABLA 4-7 ESTADÍSTICAS BÁSICAS DE LOS PUNTOS DE FLUENCIA, ÚLTIMO Y CORTANTE BASAL MÁXIMO DE LAS CURVAS DE CAPACIDAD EN AMBAS DIRECCIONES DEL EDIFICIO ED-01 (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	116
TABLA 4-8 COEFICIENTES DE CORRELACIÓN ENTRE LOS PUNTOS DE FLUENCIA, ÚLTIMO Y CORTANTE BASAL MÁXIMO Y LAS VARIABLES ALEATORIAS DE INTERÉS EN LA DIRECCIÓN +X DEL EDIFICIO ED-01 (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	116
TABLA 4-9 COEFICIENTES DE CORRELACIÓN ENTRE LOS PUNTOS DE FLUENCIA, ÚLTIMO Y CORTANTE BASAL MÁXIMO Y LAS VARIABLES ALEATORIAS DE INTERÉS EN LA DIRECCIÓN +Y DEL EDIFICIO ED-01 (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	116
TABLA 4-10 ESTADÍSTICAS BÁSICAS DEL DESPLAZAMIENTO EN EL TECHO DE LOS PUNTOS DE ÚLTIMOS, $D_{TECHO-ULT}$, DE LAS CURVAS DE CAPACIDAD DE LOS DIFERENTES EDIFICIOS AISLADOS [CM] (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR).....	117
TABLA 4-11 ESTADÍSTICAS BÁSICAS DEL CORTANTE BASAL DE LOS PUNTOS ÚLTIMOS, $V_{BASE-ULT}$, DE LAS CURVAS DE CAPACIDAD DE LOS DIFERENTES EDIFICIOS AISLADOS [KN] (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	117
TABLA 4-12 ESTADÍSTICAS BÁSICAS DEL CORTANTE BASAL MÁXIMO, $V_{BASE-MAX}$, DE LAS CURVAS DE CAPACIDAD DE LOS DIFERENTES EDIFICIOS AISLADOS [KN] (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR).....	117
TABLA 4-13 COEFICIENTES DE CORRELACIÓN ENTRE LOS PUNTOS DE FLUENCIA, ÚLTIMO Y CORTANTE BASAL MÁXIMO Y LAS VARIABLES ALEATORIAS DE INTERÉS PARA LA DIRECCIÓN +X DE LOS DIFERENTES EDIFICIOS AISLADOS (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	117
TABLA 4-14 COEFICIENTES DE CORRELACIÓN ENTRE LOS PUNTOS DE FLUENCIA, ÚLTIMO Y CORTANTE BASAL MÁXIMO Y LAS VARIABLES ALEATORIAS DE INTERÉS PARA LA DIRECCIÓN +Y DE LOS DIFERENTES EDIFICIOS AISLADOS (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	118
TABLA 4-15 ESTADÍSTICAS BÁSICAS DE LOS PUNTOS DE FLUENCIA Y ÚLTIMO DE LAS REPRESENTACIONES BILINEALES EN AMBAS DIRECCIONES DEL EDIFICIO ED-01, DE ACUERDO CON LO ESTABLECIDO EN EL PROCEDIMIENTO N2 (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	120
TABLA 4-16 COEFICIENTES DE CORRELACIÓN DE LAS REPRESENTACIONES BILINEALES, ENTRE LOS PUNTOS DE FLUENCIA Y ÚLTIMO, Y LAS VARIABLES ALEATORIAS DE INTERÉS, PARA LA DIRECCIÓN +X DEL EDIFICIO ED-01 (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	120
TABLA 4-17 COEFICIENTES DE CORRELACIÓN DE LAS REPRESENTACIONES BILINEALES, ENTRE LOS PUNTOS DE FLUENCIA Y ÚLTIMO, Y LAS VARIABLES ALEATORIAS DE INTERÉS, PARA LA DIRECCIÓN +Y DEL EDIFICIO ED-01 (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	120
TABLA 4-18 ESTADÍSTICAS BÁSICAS DEL PUNTO DE FLUENCIA, $S_{D-YIELD}$, DE LAS REPRESENTACIONES BILINEALES EN AMBAS DIRECCIONES DE LOS EDIFICIOS AISLADOS, DE ACUERDO CON LO ESTABLECIDO EN EL PROCEDIMIENTO N2 [CM] (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	121
TABLA 4-19 ESTADÍSTICAS BÁSICAS DEL PUNTO ÚLTIMO, S_{D-ULT} , DE LAS REPRESENTACIONES BILINEALES EN AMBAS DIRECCIONES DE LOS EDIFICIOS AISLADOS, DE ACUERDO CON LO ESTABLECIDO EN EL PROCEDIMIENTO N2 [CM] (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	121
TABLA 4-20 COEFICIENTES DE CORRELACIÓN DE LAS REPRESENTACIONES BILINEALES, ENTRE LOS PUNTOS DE FLUENCIA Y ÚLTIMO, Y LAS VARIABLES ALEATORIAS DE INTERÉS, PARA LA DIRECCIÓN +X DE LOS DIFERENTES EDIFICIOS AISLADOS (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	121
TABLA 4-21 COEFICIENTES DE CORRELACIÓN DE LAS REPRESENTACIONES BILINEALES, ENTRE LOS PUNTOS DE FLUENCIA Y ÚLTIMO, Y LAS VARIABLES ALEATORIAS DE INTERÉS, PARA LA DIRECCIÓN +Y DE LOS DIFERENTES EDIFICIOS AISLADOS (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	122
TABLA 4-22 ESTADÍSTICAS BÁSICAS DE LOS PUNTOS DE DESEMPEÑO PARA CADA PGA EN AMBAS DIRECCIONES DEL EDIFICIO ED-01 [CM] (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	126
TABLA 4-23 COEFICIENTES DE CORRELACIÓN DE LOS PUNTOS DE DESEMPEÑO Y LAS VARIABLES ALEATORIAS DE INTERÉS DEL EDIFICIO ED-01 (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	126
TABLA 4-24 ESTADÍSTICAS BÁSICAS DE LOS PUNTOS DE DESEMPEÑO, S_{D-PP} , PARA $PGA=0.04 G$, PARA TODOS LOS EDIFICIOS AISLADOS EN AMBAS DIRECCIONES PRINCIPALES (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	127
TABLA 4-25 ESTADÍSTICAS BÁSICAS DE LOS PUNTOS DE DESEMPEÑO, S_{D-PP} , PARA $PGA=0.141 G$, PARA TODOS LOS EDIFICIOS AISLADOS EN AMBAS DIRECCIONES PRINCIPALES (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	127
TABLA 4-26 ESTADÍSTICAS BÁSICAS DE LOS PUNTOS DE DESEMPEÑO, S_{D-PP} , PARA $PGA=0.194 G$, PARA TODOS LOS EDIFICIOS AISLADOS EN AMBAS DIRECCIONES PRINCIPALES (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	127
TABLA 4-27 COEFICIENTES DE CORRELACIÓN DE LOS PUNTOS DE DESEMPEÑO Y LAS VARIABLES ALEATORIAS DE INTERÉS PARA TODOS LOS EDIFICIOS (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	127
TABLA 4-28 ESTADÍSTICAS BÁSICAS DE LAS PROBABILIDADES DE PERTENENCIA A LOS DISTINTOS ESTADOS DE DAÑO DE LOS PUNTOS DE DESEMPEÑO OBTENIDOS PARA CADA PGA EN LA DIRECCIÓN +X DEL EDIFICIO ED-01 [%] (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	128
TABLA 4-29 ESTADÍSTICAS BÁSICAS DE LAS PROBABILIDADES DE PERTENENCIA A LOS DISTINTOS ESTADOS DE DAÑO DE LOS PUNTOS DE DESEMPEÑO OBTENIDOS PARA CADA PGA EN LA DIRECCIÓN +Y DEL EDIFICIO ED-01 [%] (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	128

TABLA 4-30 ESTADÍSTICAS BÁSICAS DE LAS PROBABILIDADES DE PERTENENCIA A LOS DISTINTOS ESTADOS DE DAÑO DE LOS PUNTOS DE DESEMPEÑO OBTENIDOS PARA CADA <i>PGA</i> EN LA DIRECCIÓN +X DEL EDIFICIO ED-02 [%] (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	129
TABLA 4-31 ESTADÍSTICAS BÁSICAS DE LAS PROBABILIDADES DE PERTENENCIA A LOS DISTINTOS ESTADOS DE DAÑO DE LOS PUNTOS DE DESEMPEÑO OBTENIDOS PARA CADA <i>PGA</i> EN LA DIRECCIÓN +Y DEL EDIFICIO ED-02 [%] (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	129
TABLA 4-32 ESTADÍSTICAS BÁSICAS DE LAS PROBABILIDADES DE PERTENENCIA A LOS DISTINTOS ESTADOS DE DAÑO DE LOS PUNTOS DE DESEMPEÑO OBTENIDOS PARA CADA <i>PGA</i> EN LA DIRECCIÓN +X DEL EDIFICIO ED-03 [%] (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	129
TABLA 4-33 ESTADÍSTICAS BÁSICAS DE LAS PROBABILIDADES DE PERTENENCIA A LOS DISTINTOS ESTADOS DE DAÑO DE LOS PUNTOS DE DESEMPEÑO OBTENIDOS PARA CADA <i>PGA</i> EN LA DIRECCIÓN +Y DEL EDIFICIO ED-03 [%] (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	130
TABLA 4-34 ESTADÍSTICAS BÁSICAS DE LAS PROBABILIDADES DE PERTENENCIA A LOS DISTINTOS ESTADOS DE DAÑO DE LOS PUNTOS DE DESEMPEÑO OBTENIDOS PARA CADA <i>PGA</i> EN LA DIRECCIÓN +X DEL EDIFICIO ED-04 [%] (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	130
TABLA 4-35 ESTADÍSTICAS BÁSICAS DE LAS PROBABILIDADES DE PERTENENCIA A LOS DISTINTOS ESTADOS DE DAÑO DE LOS PUNTOS DE DESEMPEÑO OBTENIDOS PARA CADA <i>PGA</i> EN LA DIRECCIÓN +Y DEL EDIFICIO ED-04 [%] (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	130
TABLA 4-36 ESTADÍSTICAS BÁSICAS DE LAS PROBABILIDADES DEL ÍNDICE DE DAÑO, <i>DI</i> , DE LOS PUNTOS DE DESEMPEÑO OBTENIDOS PARA CADA <i>PGA</i> EN AMBAS DIRECCIONES DEL EDIFICIO ED-01 [%] (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	132
TABLA 4-37 COEFICIENTES DE CORRELACIÓN DE LAS PROBABILIDADES DEL ÍNDICE DE DAÑO, <i>DI</i> , DE LOS PUNTOS DE DESEMPEÑO Y LAS VARIABLES ALEATORIAS DE INTERÉS PARA EL EDIFICIO ED-01 (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	132
TABLA 4-38 ESTADÍSTICAS BÁSICAS DE LAS PROBABILIDADES DEL ÍNDICE DE DAÑO, <i>DI</i> , DE LOS PUNTOS DE DESEMPEÑO OBTENIDOS PARA CADA <i>PGA</i> EN AMBAS DIRECCIONES DEL EDIFICIO ED-02 [%] (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	132
TABLA 4-39 ESTADÍSTICAS BÁSICAS DE LAS PROBABILIDADES DEL ÍNDICE DE DAÑO, <i>DI</i> , DE LOS PUNTOS DE DESEMPEÑO OBTENIDOS PARA CADA <i>PGA</i> EN AMBAS DIRECCIONES DEL EDIFICIO ED-03 [%] (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	132
TABLA 4-40 ESTADÍSTICAS BÁSICAS DE LAS PROBABILIDADES DEL ÍNDICE DE DAÑO, <i>DI</i> , DE LOS PUNTOS DE DESEMPEÑO OBTENIDOS PARA CADA <i>PGA</i> EN AMBAS DIRECCIONES DEL EDIFICIO ED-04 [%] (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	133
TABLA 4-41 COEFICIENTES DE CORRELACIÓN DE LAS PROBABILIDADES DEL ÍNDICE DE DAÑO, <i>DI</i> , DE LOS PUNTOS DE DESEMPEÑO Y LAS VARIABLES ALEATORIAS DE INTERÉS PARA TODOS LOS EDIFICIOS Y <i>PGA</i> = 0.04 g (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	133
TABLA 4-42 COEFICIENTES DE CORRELACIÓN DE LAS PROBABILIDADES DEL ÍNDICE DE DAÑO, <i>DI</i> , DE LOS PUNTOS DE DESEMPEÑO Y LAS VARIABLES ALEATORIAS DE INTERÉS PARA TODOS LOS EDIFICIOS Y <i>PGA</i> = 0.141 g (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	133
TABLA 4-43 COEFICIENTES DE CORRELACIÓN DE LAS PROBABILIDADES DEL ÍNDICE DE DAÑO, <i>DI</i> , DE LOS PUNTOS DE DESEMPEÑO Y LAS VARIABLES ALEATORIAS DE INTERÉS PARA TODOS LOS EDIFICIOS Y <i>PGA</i> = 0.194 g (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	133
TABLA 4-44 ESTADÍSTICAS BÁSICAS DE LOS DESPLAZAMIENTOS EN EL TECHO, OBTENIDOS PARA LOS CONJUNTOS DE PUNTOS ASOCIADOS A CADA VALOR DE <i>PGA</i> DEL EDIFICIO ED-01 PARA CADA DIRECCIÓN DE ANÁLISIS [CM] (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	136
TABLA 4-45 PORCENTAJE DE OCURRENCIA DE DAÑO ASOCIADO A VALORES DE <i>PGA</i> DE 0.04 g, 0.141 g Y 0.194 g PARA EL EDIFICIO ED-01 (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	137
TABLA 4-46 ESTADÍSTICAS BÁSICAS DE LOS DESPLAZAMIENTOS EN EL TECHO, OBTENIDOS PARA LOS CONJUNTOS DE PUNTOS ASOCIADOS A CADA VALOR DE <i>PGA</i> DEL EDIFICIO ED-02 EN AMBAS DIRECCIONES PRINCIPALES [CM] (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	137
TABLA 4-47 ESTADÍSTICAS BÁSICAS DE LOS DESPLAZAMIENTOS EN EL TECHO, OBTENIDOS PARA LOS CONJUNTOS DE PUNTOS ASOCIADOS A CADA VALOR DE <i>PGA</i> DEL EDIFICIO ED-03 EN AMBAS DIRECCIONES PRINCIPALES [CM] (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	138
TABLA 4-48 ESTADÍSTICAS BÁSICAS DE LOS DESPLAZAMIENTOS EN EL TECHO, OBTENIDOS PARA LOS CONJUNTOS DE PUNTOS ASOCIADOS A CADA VALOR DE <i>PGA</i> DEL EDIFICIO ED-04 EN AMBAS DIRECCIONES PRINCIPALES [%] (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	138

TABLA 4-49 PORCENTAJE DE DAÑO ASOCIADO A VALORES DE PGA DE 0.04 G, 0.141 G Y 0.194 G PARA TODOS LOS EDIFICIOS EN DIRECCIÓN +X [%] (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	138
TABLA 5-1 RESULTADOS DEL ANÁLISIS MODAL PARA EL EDIFICIO AGREGADO AG-01 (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	139
TABLA 5-2 RESULTADOS DEL ANÁLISIS MODAL PARA EL EDIFICIO AGREGADO AG-01 (CONTINUACIÓN) (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	140
TABLA 5-3 COEFICIENTES DE CORRELACIÓN ENTRE LOS PERÍODOS FUNDAMENTALES DE VIBRACIÓN Y LAS VARIABLES ALEATORIAS DE INTERÉS PARA AMBAS DIRECCIONES DEL EDIFICIO AGREGADO AG-01 (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	141
TABLA 5-4 RESULTADOS DEL ANÁLISIS MODAL PARA LOS DISTINTOS EDIFICIOS AGREGADOS (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	141
TABLA 5-5 RESULTADOS DEL ANÁLISIS MODAL PARA LOS DISTINTOS EDIFICIOS AGREGADOS (CONTINUACIÓN) (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	141
TABLA 5-6 COEFICIENTES DE CORRELACIÓN ENTRE LOS PERIODOS FUNDAMENTALES PARA CADA DIRECCIÓN Y LAS VARIABLES ALEATORIAS DE INTERÉS DE LOS DIFERENTES EDIFICIOS AGREGADOS (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	142
TABLA 5-7 ESTADÍSTICAS BÁSICAS DE LOS PUNTOS DE FLUENCIA, ÚLTIMO Y CORTANTE BASAL MÁXIMO DE LAS CURVAS DE CAPACIDAD EN AMBAS DIRECCIONES DEL EDIFICIO AGREGADO AG-01 (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	143
TABLA 5-8 COEFICIENTES DE CORRELACIÓN ENTRE LOS PUNTOS DE FLUENCIA, ÚLTIMO Y CORTANTE BASAL MÁXIMO Y LAS VARIABLES ALEATORIAS DE INTERÉS EN LA DIRECCIÓN +X DEL EDIFICIO AGREGADO AG-01 (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	144
TABLA 5-9 COEFICIENTES DE CORRELACIÓN ENTRE LOS PUNTOS DE FLUENCIA, ÚLTIMO Y CORTANTE BASAL MÁXIMO Y LAS VARIABLES ALEATORIAS DE INTERÉS EN LA DIRECCIÓN +Y DEL EDIFICIO AGREGADO AG-01 (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	144
TABLA 5-10 ESTADÍSTICAS BÁSICAS DEL DESPLAZAMIENTO EN EL TECHO DE LOS PUNTOS DE ÚLTIMOS, $D_{TECHO-ULT}$, DE LAS CURVAS DE CAPACIDAD DE LOS DIFERENTES EDIFICIOS AGREGADOS [CM] (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	144
TABLA 5-11 ESTADÍSTICAS BÁSICAS DEL CORTANTE BASAL DE LOS PUNTOS ÚLTIMOS, $V_{BASE-ULT}$, DE LAS CURVAS DE CAPACIDAD DE LOS DIFERENTES EDIFICIOS AGREGADOS [kN] (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	144
TABLA 5-12 ESTADÍSTICAS BÁSICAS DEL CORTANTE BASAL MÁXIMO, $V_{BASE-MAX}$, DE LAS CURVAS DE CAPACIDAD DE LOS DIFERENTES EDIFICIOS AGREGADOS [kN] (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	145
TABLA 5-13 COEFICIENTES DE CORRELACIÓN ENTRE LOS PUNTOS DE FLUENCIA, ÚLTIMO Y CORTANTE BASAL MÁXIMO Y LAS VARIABLES ALEATORIAS DE INTERÉS PARA LA DIRECCIÓN +X DE LOS DIFERENTES EDIFICIOS AGREGADOS (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	145
TABLA 5-14 COEFICIENTES DE CORRELACIÓN ENTRE LOS PUNTOS DE FLUENCIA, ÚLTIMO Y CORTANTE BASAL MÁXIMO Y LAS VARIABLES ALEATORIAS DE INTERÉS PARA LA DIRECCIÓN +Y DE LOS DIFERENTES EDIFICIOS AGREGADOS (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	145
TABLA 5-15 ESTADÍSTICAS BÁSICAS DE LOS PUNTOS DE FLUENCIA Y ÚLTIMO DE LAS REPRESENTACIONES BILINEALES EN AMBAS DIRECCIONES DEL AGREGADO AG-01, DE ACUERDO CON LO ESTABLECIDO EN EL PROCEDIMIENTO N2 (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	147
TABLA 5-16 COEFICIENTES DE CORRELACIÓN DE LAS REPRESENTACIONES BILINEALES, ENTRE LOS PUNTOS DE FLUENCIA Y ÚLTIMO, Y LAS VARIABLES ALEATORIAS DE INTERÉS, PARA LA DIRECCIÓN +X DEL AGREGADO AG-01 (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	148
TABLA 5-17 COEFICIENTES DE CORRELACIÓN DE LAS REPRESENTACIONES BILINEALES, ENTRE LOS PUNTOS DE FLUENCIA Y ÚLTIMO, Y LAS VARIABLES ALEATORIAS DE INTERÉS, PARA LA DIRECCIÓN +Y DEL AGREGADO AG-01 (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	148
TABLA 5-18 ESTADÍSTICAS BÁSICAS DEL PUNTO DE FLUENCIA, $S_{D-YIELD}$, DE LAS REPRESENTACIONES BILINEALES EN AMBAS DIRECCIONES DE LOS EDIFICIOS AGREGADOS, DE ACUERDO CON LO ESTABLECIDO EN EL PROCEDIMIENTO N2 [CM] (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	148
TABLA 5-19 ESTADÍSTICAS BÁSICAS DEL PUNTO ÚLTIMO, S_{D-ULT} , DE LAS REPRESENTACIONES BILINEALES EN AMBAS DIRECCIONES DE LOS EDIFICIOS AGREGADOS, DE ACUERDO CON LO ESTABLECIDO EN EL PROCEDIMIENTO N2 [CM] (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	148
TABLA 5-20 COEFICIENTES DE CORRELACIÓN DE LAS REPRESENTACIONES BILINEALES, ENTRE LOS PUNTOS DE FLUENCIA Y ÚLTIMO, Y LAS VARIABLES ALEATORIAS DE INTERÉS, PARA LA DIRECCIÓN +X DE LOS DIFERENTES EDIFICIOS AGREGADOS (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	149
TABLA 5-21 COEFICIENTES DE CORRELACIÓN DE LAS REPRESENTACIONES BILINEALES, ENTRE LOS PUNTOS DE FLUENCIA Y ÚLTIMO, Y LAS VARIABLES ALEATORIAS DE INTERÉS, PARA LA DIRECCIÓN +Y DE LOS DIFERENTES EDIFICIOS AGREGADOS (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	149
TABLA 5-22 ESTADÍSTICAS BÁSICAS DE LOS PUNTOS DE DESEMPEÑO PARA CADA PGA EN AMBAS DIRECCIONES DEL AGREGADO AG-01 [CM] (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	154

TABLA 5-23 COEFICIENTES DE CORRELACIÓN DE LOS PUNTOS DE DESEMPEÑO Y LAS VARIABLES ALEATORIAS DE INTERÉS DEL AGREGADO AG-01 (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	154
TABLA 5-24 ESTADÍSTICAS BÁSICAS DE LOS PUNTOS DE DESEMPEÑO, S_{D-PP} , PARA $PGA=0.04 G$, PARA TODOS LOS EDIFICIOS AGREGADOS EN AMBAS DIRECCIONES PRINCIPALES (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	154
TABLA 5-25 ESTADÍSTICAS BÁSICAS DE LOS PUNTOS DE DESEMPEÑO, S_{D-PP} , PARA $PGA=0.141 G$, PARA TODOS LOS EDIFICIOS AGREGADOS EN AMBAS DIRECCIONES PRINCIPALES (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	154
TABLA 5-26 ESTADÍSTICAS BÁSICAS DE LOS PUNTOS DE DESEMPEÑO, S_{D-PP} , PARA $PGA=0.194 G$, PARA TODOS LOS EDIFICIOS AGREGADOS EN AMBAS DIRECCIONES PRINCIPALES (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	154
TABLA 5-27 COEFICIENTES DE CORRELACIÓN DE LOS PUNTOS DE DESEMPEÑO Y LAS VARIABLES ALEATORIAS DE INTERÉS PARA TODOS LOS EDIFICIOS AGREGADOS (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	155
TABLA 5-28 ESTADÍSTICAS BÁSICAS DE LAS PROBABILIDADES DE PERTENENCIA A LOS DISTINTOS ESTADOS DE DAÑO DE LOS PUNTOS DE DESEMPEÑO OBTENIDOS PARA CADA PGA EN LA DIRECCIÓN +X DEL AGREGADO AG-01 [%] (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	155
TABLA 5-29 ESTADÍSTICAS BÁSICAS DE LAS PROBABILIDADES DE PERTENENCIA A LOS DISTINTOS ESTADOS DE DAÑO DE LOS PUNTOS DE DESEMPEÑO OBTENIDOS PARA CADA PGA EN LA DIRECCIÓN +Y DEL AGREGADO AG-01 [%] (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	155
TABLA 5-30 ESTADÍSTICAS BÁSICAS DE LAS PROBABILIDADES DE PERTENENCIA A LOS DISTINTOS ESTADOS DE DAÑO DE LOS PUNTOS DE DESEMPEÑO OBTENIDOS PARA CADA PGA EN LA DIRECCIÓN +X DEL AGREGADO AG-02 [%] (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	156
TABLA 5-31 ESTADÍSTICAS BÁSICAS DE LAS PROBABILIDADES DE PERTENENCIA A LOS DISTINTOS ESTADOS DE DAÑO DE LOS PUNTOS DE DESEMPEÑO OBTENIDOS PARA CADA PGA EN LA DIRECCIÓN +Y DEL AGREGADO AG-02 [%] (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	156
TABLA 5-32 ESTADÍSTICAS BÁSICAS DE LAS PROBABILIDADES DE PERTENENCIA A LOS DISTINTOS ESTADOS DE DAÑO DE LOS PUNTOS DE DESEMPEÑO OBTENIDOS PARA CADA PGA EN LA DIRECCIÓN +X DEL AGREGADO AG-03 [%] (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	157
TABLA 5-33 ESTADÍSTICAS BÁSICAS DE LAS PROBABILIDADES DE PERTENENCIA A LOS DISTINTOS ESTADOS DE DAÑO DE LOS PUNTOS DE DESEMPEÑO OBTENIDOS PARA CADA PGA EN LA DIRECCIÓN +Y DEL AGREGADO AG-03 [%] (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	157
TABLA 5-34 ESTADÍSTICAS BÁSICAS DE LAS PROBABILIDADES DEL ÍNDICE DE DAÑO, DI , DE LOS PUNTOS DE DESEMPEÑO OBTENIDOS PARA CADA PGA EN AMBAS DIRECCIONES DEL AGREGADO AG-01 [%] (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	158
TABLA 5-35 COEFICIENTES DE CORRELACIÓN DE LAS PROBABILIDADES DEL ÍNDICE DE DAÑO, DI , DE LOS PUNTOS DE DESEMPEÑO Y LAS VARIABLES ALEATORIAS DE INTERÉS PARA EL AGREGADO AG-01 (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	159
TABLA 5-36 ESTADÍSTICAS BÁSICAS DE LAS PROBABILIDADES DEL ÍNDICE DE DAÑO, DI , DE LOS PUNTOS DE DESEMPEÑO OBTENIDOS PARA CADA PGA EN AMBAS DIRECCIONES DEL AGREGADO AG-02 [%] (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	159
TABLA 5-37 ESTADÍSTICAS BÁSICAS DE LAS PROBABILIDADES DEL ÍNDICE DE DAÑO, DI , DE LOS PUNTOS DE DESEMPEÑO OBTENIDOS PARA CADA PGA EN AMBAS DIRECCIONES AGREGADO AG-03 [%] (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	159
TABLA 5-38 COEFICIENTES DE CORRELACIÓN DE LAS PROBABILIDADES DEL ÍNDICE DE DAÑO, DI , DE LOS PUNTOS DE DESEMPEÑO Y LAS VARIABLES ALEATORIAS DE INTERÉS PARA TODOS LOS EDIFICIOS Y $PGA = 0.04 G$ (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	159
TABLA 5-39 COEFICIENTES DE CORRELACIÓN DE LAS PROBABILIDADES DEL ÍNDICE DE DAÑO, DI , DE LOS PUNTOS DE DESEMPEÑO Y LAS VARIABLES ALEATORIAS DE INTERÉS PARA TODOS LOS EDIFICIOS Y $PGA = 0.141 G$ (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	160
TABLA 5-40 COEFICIENTES DE CORRELACIÓN DE LAS PROBABILIDADES DEL ÍNDICE DE DAÑO, DI , DE LOS PUNTOS DE DESEMPEÑO Y LAS VARIABLES ALEATORIAS DE INTERÉS PARA TODOS LOS EDIFICIOS Y $PGA = 0.194 G$ (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	160
TABLA 5-41 ESTADÍSTICAS BÁSICAS DE LOS DESPLAZAMIENTOS EN EL TECHO, OBTENIDOS PARA LOS CONJUNTOS DE PUNTOS ASOCIADOS A CADA VALOR DE PGA DEL AGREGADO AG-01 PARA CADA DIRECCIÓN DE ANÁLISIS [CM] (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	162
TABLA 5-42 PORCENTAJE DE DAÑO ASOCIADO A VALORES DE PGA DE $0.04 G$, $0.141 G$ Y $0.194 G$ PARA EL AGREGADO AG-01 [%] (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	163
TABLA 5-43 ESTADÍSTICAS BÁSICAS DE LOS DESPLAZAMIENTOS EN EL TECHO, OBTENIDOS PARA LOS CONJUNTOS DE PUNTOS ASOCIADOS A CADA VALOR DE PGA DEL AGREGADO AG-02 EN AMBAS DIRECCIONES PRINCIPALES [CM] (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	163

TABLA 5-44 PORCENTAJE DE DAÑO ASOCIADO A VALORES DE PGA DE <i>0.04 G</i> , <i>0.141 G</i> Y <i>0.194 G</i> PARA EL AGREGADO AG-02 [%] (FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR)	164
--	-----



CAPÍTULO 1

Introducción

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción

El parque urbano funcional de viviendas de una gran cantidad de ciudades europeas está compuesto por un número nada despreciable de estructuras de mampostería no reforzada que sobrepasan los 100 años de vida útil y que, en su mayoría, fueron concebidas sin consideración alguna de la amenaza sísmica. Por tanto, el estudio de este tipo de estructuras; y su consiguiente evaluación, es altamente relevante con el fin de poder entender su respuesta estructural y vulnerabilidad sísmica ante las sollicitaciones a las que puedan verse sometidas.

A pesar de la gran cantidad de similitudes que comparten este tipo de estructuras por todo Europa, muchos aspectos tales como el año de construcción, los métodos constructivos empleados, la calidad de la mano de obra, los procesos de fabricación de los distintos elementos que las componen, la calidad de sus materiales, el tipo de uso que se da a cada una, o el número de niveles con los que cuentan, determinan su singularidad y carácter único en distintas regiones y/o países.

En concreto, el parque de viviendas de la ciudad de Barcelona, en España, está compuesto por un gran número de estructuras pertenecientes a esta tipología, cuyas particularidades hacen de la ciudad un caso de estudio único.

1.2 Objetivos

A continuación, se describen el objetivo general y los objetivos específicos de esta tesis. La consecución de éstos últimos se considera básica e imprescindible para poder alcanzar el cumplimiento del objetivo general de manera adecuada.

1.2.1 Objetivo general

El objetivo principal de esta tesis es estimar y comparar la vulnerabilidad y daño sísmico de diversas configuraciones estructurales, aisladas y agregadas, de una tipología característica como lo es la mampostería no reforzada con sistema resistente a base de muros de carga, la cual se puede encontrar tanto en España como en un número importante de otras ciudades europeas.

Los edificios de interés para este trabajo presentan además algunas particularidades tales como:

- Alturas considerables, con entre siete y hasta 10 u 11 niveles, siendo algo poco común para tipologías similares y escasamente documentado en normativas y referencias contemporáneas al período constructivo de interés.
- El uso compartido de paredes medianeras con edificios aledaños, lo cual deriva en la formación de agregados de edificios que, en bastantes ocasiones, comprenden la totalidad de la manzana¹.
- La nula consideración de cargas dinámicas horizontales (*i.e.* sísmicas) en el diseño.
- Una vida útil de 100 o más años en la mayoría de los casos y, pese a ello, representar un porcentaje significativo del parque urbano funcional de la ciudad.
- La extensa variabilidad en las propiedades mecánicas de los componentes (*i.e.* ladrillos) de estas estructuras debido a los procesos de fabricación pre-industrial de la época.

La evaluación de las estructuras se realiza con un enfoque probabilista, tomando en cuenta distintas fuentes de incertidumbre y variabilidad. Para ello, se define un conjunto de variables aleatorias de interés que están relacionadas tanto con los edificios en sí como con la demanda a la que se ven sometidos.

¹ Término proveniente de la palabra ‘mansana’, popularizada por Ildelfonso Cerdà a mediados del siglo XIX y utilizada para definir una isla urbana o un grupo de bloques de pisos y casas rodeados por cuatro calles.

En particular y, al ser una de las fuentes de incertidumbre epistémica de mayor interés para las estructuras estudiadas en este trabajo, se hace hincapié en un conjunto de determinadas propiedades mecánicas materiales. Lo anterior queda justificado gracias a los procesos artesanales (*i.e.* pre-industriales) de fabricación de la época, responsables de la extensa variabilidad presente en las características y calidad de las unidades constructivas (*i.e.* ladrillos cerámicos macizos de arcilla).

Por otro lado, la variabilidad de las sollicitaciones a las que estas estructuras se ven sometidas se toma en cuenta mediante el uso de distintos registros de aceleración del terreno filtrados y escalados incrementalmente para diferentes valores de aceleración máxima del terreno.

La evaluación estructural se realiza mediante procedimientos no-lineales, estáticos y dinámicos, los cuales incorporan el uso y ayuda de métodos y herramientas de cómputo actuales y avanzadas que facilitan y agilizan la obtención de los resultados correspondientes para cada uno de ellos.

1.2.2 Objetivos específicos

Identificar las características principales de los edificios pertenecientes a la tipología de interés para este estudio con la finalidad de evaluar las distintas configuraciones estructurales existentes, tanto aisladas como agregadas.

Establecer las principales fuentes de incertidumbre y variabilidad asociadas con las propiedades mecánicas de los materiales y la demanda sísmica, respectivamente, a fin de determinar las variables aleatorias a considerar para el estudio probabilista de los edificios de interés.

Diseñar las distintas muestras a utilizar en los diferentes tipos de análisis probabilistas, asegurando su suficiencia y representatividad, así como la adecuada selección y verificación de márgenes de error, y niveles e intervalos de confianza.

Definir las distintas configuraciones estructurales por analizar, aisladas o agregadas, según sus características, representatividad e importancia, tomando en cuenta también las limitaciones existentes en la modelación tridimensional de estas.

Estimar la capacidad resistente de los distintos edificios o agregados de edificios mediante el uso de análisis estáticos y dinámicos no-lineales, teniendo en cuenta variantes de acuerdo con la representación bilineal elegida o el patrón de cargas aplicado; y el uso de diversos acelerogramas escalados para varios valores de aceleración máxima del terreno, respectivamente.

Identificar y establecer relaciones existentes entre los resultados obtenidos con ambas aproximaciones con el objetivo de justificar y validar su utilización.

Caracterizar el daño presentado por las distintas configuraciones estructurales analizadas mediante funciones y curvas de fragilidad, así como índices de daño.

Correlacionar los resultados obtenidos con las distintas variables aleatorias elegidas para los distintos tipos de análisis llevados a cabo.

Proponer recomendaciones de líneas futuras de investigación en las cuales se podrían incluir y tomar en cuenta fuentes adicionales de incertidumbre, tales como cargas permanentes y variables, el uso de distintos amortiguamientos viscosos, la longitud de apoyo de los distintos forjados y dinteles, la dimensión de las distintas secciones, cambios en la geometría y distribución de algunos elementos estructurales y el tamaño de muestras entre otras.

1.3 Metodología

A fin de evaluar la vulnerabilidad sísmica de edificios existentes y, basados en el nivel de conocimiento de los parámetros de interés (*e.g.* características geométricas, propiedades mecánicas materiales y detalles estructurales), diversos métodos se han desarrollado e incorporado en distintos procedimientos y metodologías a lo largo del tiempo.

1.3.1 Análisis estático no lineal

A diferencia de sus predecesores, en los que la clasificación del comportamiento estructural se obtenía de la observación, el análisis y la valoración del daño de edificios afectados por un terremoto, los métodos estáticos definen la acción sísmica mediante un espectro de respuesta elástico o inelástico, y el desempeño del edificio es descrito en términos de la curva de capacidad calculada a partir de un análisis estático no lineal incremental.

Los procedimientos estáticos no lineales involucran técnicas simples que pueden ser implementadas con relativa facilidad para estimar el desempeño de una estructura. Diversos códigos técnicos y normas constructivas o de diseño y rehabilitación incorporan estos procedimientos.

En la actualidad, existen distintos procedimientos estáticos no lineales, algunos de los cuales han sido desarrollados recientemente, mientras que otros con una mayor antigüedad han sufrido adaptaciones y/o mejoras a lo largo del tiempo. A pesar de algunas diferencias conceptuales, la mayoría de estos métodos comparten bases y objetivos comunes.

Los procedimientos estáticos no lineales utilizados para la elaboración de este trabajo se han elegido cuidadosamente tomando en cuenta tanto la tipología y los materiales de los edificios a analizar, como la vigencia y adaptabilidad de dichos métodos con respecto al tipo y formato de la información obtenida a partir del programa de cálculo estructural empleado, Tremuri (Galasco *et al.*, 2002).

Los resultados de cada uno de los procedimientos estáticos no lineales empleados para cada configuración estructural de este trabajo han sido contrastados con los resultados obtenidos en sus correspondientes análisis dinámicos incrementales, considerando a estos últimos como referencia.

1.3.2 Análisis dinámico no lineal

El rápido desarrollo de los métodos y procesadores de cómputo ha permitido que el empleo de metodologías avanzadas como el análisis dinámico incremental, sean relativamente accesibles para la evaluación del comportamiento de estructuras sujetas a acciones sísmicas. Este método, desarrollado por Vamvatsikos & Cornell (2002), mide el daño estructural correspondiente a incrementos sucesivos de la intensidad de la acción sísmica, lo cual se obtiene mediante el escalado de los registros de aceleración del terreno a lo largo de un rango de valores de aceleración máxima del terreno previamente seleccionado.

La medición de una variable de control (*e.g.* el desplazamiento máximo del techo) para cada valor incremental de aceleración del terreno utilizado, permite representar la evolución del comportamiento estructural de la estructura analizada por medio de una serie de curvas de respuesta para cada registro.

En este estudio, un total de siete registros de aceleración son seleccionados cuidadosamente a fin de describir de manera suficiente la variabilidad asociada a la demanda sísmica presente en la zona de estudio. Así mismo, los registros seleccionados han sido escalados para un total de 10 valores distintos de aceleración.

1.3.3 El enfoque probabilista

Dos de las fuentes más relevantes de variabilidad e incertidumbre epistémica a considerar dentro de los aspectos particulares para la caracterización, modelado y subsecuente estudio y evaluación de las estructuras de interés de este trabajo son, respectivamente:

1. Una demanda aplicada que sea plausible (*i.e.* representativa y realista).
2. Las propiedades mecánicas de los materiales.

Lo anterior se aborda mediante un enfoque probabilista, en el cual las distintas fuentes de variabilidad e incertidumbre son representadas e introducidas en el modelo a través del uso de variables aleatorias con la finalidad de poder analizar su interacción y efectos en la respuesta final de la estructura. El número, tipo o grado de influencia de estas incertidumbres puede variar de manera significativa para cada estructura dependiendo de diferentes aspectos tales como su ubicación, construcción, métodos de fabricación de la época, materiales constructivos utilizados, ordenanzas y normativas vigentes en el momento de su construcción, entre otros.

A manera de cubrir de manera óptima la variabilidad e incertidumbre de las variables seleccionadas, la distribución y rango de posibles valores se han seleccionado cuidadosamente de acuerdo con la información obtenida de diversas fuentes. En base a esta selección se han generado poblaciones compuestas de un número suficiente de unidades, capaces de representar adecuadamente lo anterior.

Con la finalidad de poder llevar a cabo afirmaciones e inferencias con una precisión conocida y adecuada acerca de las distintas poblaciones que componen este trabajo, cuya naturaleza y tamaño hacen poco realista, poco práctica y básicamente imposible la evaluación de la totalidad de las unidades que las componen, se realiza el diseño y estudio de diversas muestras o subgrupos de cada una de dichas poblaciones.

Los resultados y la calidad asociada a este estudio dependen de manera importante de las distintas muestras seleccionadas, por lo que se toma especial cuidado en su diseño para que sean adecuadas y suficientemente representativas, evitando, así, resultados incompletos o incorrectos, además de reducir de manera importante la carga de trabajo y recursos utilizadas para este propósito.

1.3.4 El uso de herramientas y métodos informáticos actuales

Un número importante de las tareas llevadas a cabo en este trabajo fueron realizadas mediante el uso de diversas herramientas y métodos informáticos avanzados. Entre las tareas desarrolladas se incluyen: el estudio estadístico, la selección de muestras, la preparación de los diversos modelos 3D a ser analizados, el post-procesamiento de resultados, así como la propia puesta en marcha de los análisis a llevar a cabo.

La computación paralela y distribuida permite llevar a cabo diversos cálculos simultáneos mediante la partición de algunos procesos en otros más pequeños. Lo anterior permite un ahorro considerable de tiempo, así como un mejor aprovechamiento de los recursos empleados, permitiendo a su vez escalar dichas operaciones.

1.4 Alcance de este estudio

Este trabajo de investigación pone en conjunción, mediante un acercamiento probabilista, el uso de diversas metodologías para la evaluación de la respuesta estructural y vulnerabilidad sísmica de estructuras de mampostería no reforzada sometidas a diversas acciones sísmicas. La vigencia y aplicabilidad de estas metodologías se ha tenido en cuenta de acuerdo con los casos de estudio considerados en este trabajo.

El análisis de la vulnerabilidad sísmica de las diversas configuraciones estructurales consideradas se realiza a partir de los cálculos obtenidos por medio de diversos análisis elásticos no lineales, así como por medio de análisis dinámicos incrementales. Los resultados obtenidos para los modelos de agregados de edificios se contrastan posteriormente con los resultados correspondientes a los modelos aislados (*i.e.* individuales) que los conforman.

La acción sísmica queda definida mediante la cuidadosa selección de un grupo de acelerogramas reales, obtenidos de acuerdo con las directrices del método del espectro condicional (Jayaram *et al.*, 2011), así como de diversos estudios de microzonación realizados en sitio de interés de este trabajo.

Los edificios aislados utilizados para este estudio se han modelado en 3D a partir de diversos planos obtenidos en fondos de archivos de la ciudad y del Ayuntamiento de la Ciudad. Las propiedades, dimensiones y características de los diversos elementos que constituyen estas estructuras se definen en función de la información contenida en dichos archivos, así como de la proveniente de diversas fuentes bibliográficas de la época, visitas in situ, así como de la recomendación y juicio de expertos en la materia.

Por otro lado, las configuraciones de edificios agregados se componen de dos o más edificios aislados a manera de representar las distintas combinatorias que podrían encontrarse en una manzana típica de la zona de estudio, tomando en cuenta aspectos como la proporción o simetría en planta, entre otros. Debido a limitaciones asociadas al programa de cálculo estructural, Tremuri, el tamaño de los modelos de edificios agregados (*i.e.* número de edificios individuales que los componen) queda limitado a un máximo de cuatro por conjunto agregado.

Se presenta y analiza la correlación y grado de influencia que tienen las diversas variables aleatorias sobre los resultados obtenidos. Así mismo, se lleva a cabo una comparativa entre los resultados calculados a partir de los diversos métodos utilizados, a fin de determinar la bondad de estos.

1.5 Contenido de la memoria

El contenido de la memoria se estructura de la siguiente manera: el *Capítulo 1*, tal como se ha expuesto, presenta las motivaciones principales para este trabajo, presentando de manera sintetizada el propósito principal del mismo en su objetivo general, que queda detallado mediante los subsiguientes objetivos específicos, la metodología utilizada, así como los alcances esperados una vez finalizada la investigación; el *Capítulo 2* detalla aspectos relacionados con la zona de estudio, propiamente la Ciudad de Barcelona, los edificios de interés para este trabajo y sus principales características, así como la acción sísmica esperada para dicha localización según lo expuesto por diferentes estudios de microzonación y normativas aplicables a la misma.

La metodología empleada para el modelado de las estructuras, la selección y tratamiento de las acciones sísmicas, la obtención del desempeño y daños esperados, así como los pormenores relacionados con el enfoque probabilista adoptado para este trabajo, y los recursos computacionales empleados, se presentan en el *Capítulo 3*.

Los *Capítulos 4* y *5* muestran las distintas configuraciones estructurales para edificios aislados y agregados, respectivamente, así como los resultados obtenidos para cada una de ellas después de llevar a cabo los diferentes análisis detallados en apartados anteriores.

Las diferentes conclusiones y recomendaciones que arrojan los resultados obtenidos se exponen en el *Capítulo 6*, en donde además se presentan algunas recomendaciones y líneas de investigación futuras.

El trabajo cuenta además con un total de tres anejos, los cuales contienen la producción científica derivada de la tesis (*Anejo 1*), los resultados obtenidos para los edificios aislados y agregados en su

completitud (*Anejo B*), y finalmente, algunos de los distintos códigos de MATLAB empleados para el pre y post-procesamiento de diversos apartados que componen la tesis (*Anejo C*).



CAPÍTULO 2

Ámbito de estudio



2 ÁMBITO DEL ESTUDIO

2.1 La ciudad de Barcelona

Con más de dos mil años de historia, la ciudad de Barcelona tiene, en 2019, 1.636.762 habitantes distribuidos en 101,35 km² (Institut d'Estadística de Catalunya, 2019a). La ciudad se encuentra ubicada en un llano flanqueado por los ríos Llobregat y Besós, la sierra de Collserola y el mar.

Desde sus inicios, Barcelona ha sido un epicentro económico y político, por lo que su transformación está íntimamente relacionada con su propia historia. En cuanto a su desarrollo urbano, existe una gran diversidad de contrastes, existiendo barrios, edificios o elementos urbanos de la ciudad que evidencian claramente las etapas que ha experimentado desde sus orígenes como una ciudad amurallada.

Desde finales del siglo XIX, la ciudad establecería su división territorial en 10 distritos, lo cual sería ratificado posteriormente en 1984 (Fig. 2-1). Así mismo, en 2006 se delimitarían y denominarían los 73 barrios que la componen actualmente.

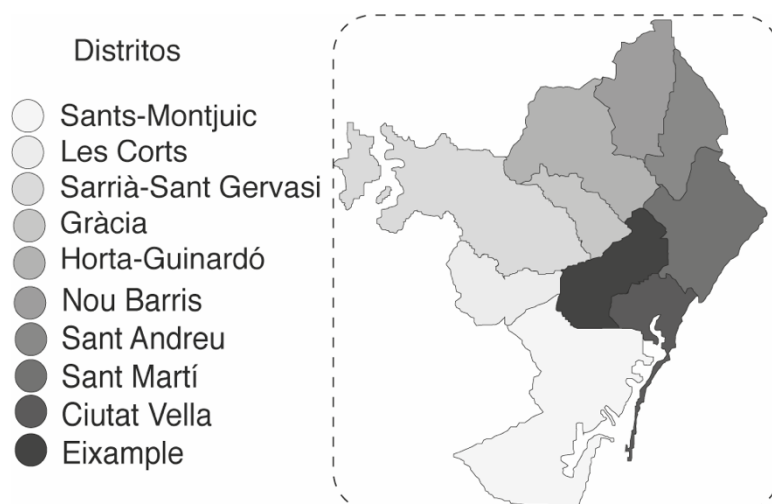


Fig. 2-1 División territorial de la ciudad de Barcelona en Distritos (fuente: preparado por el autor)

En la actualidad, Barcelona puede considerarse una ciudad global con gran presencia e importancia económica, comercial, turística, tecnológica, cultural y arquitectónica, con exponentes de esta última como Antonio Gaudí, Lluís Domènech i Montaner, Ricard Bofill, Josep Puig i Cadafalch o Carme Pinós, por mencionar algunos.

2.1.1 Elementos de historia

Los romanos llegaron al territorio catalán hacia el año 218 a.C. con la finalidad de establecer distintas bases militares para mantener el control del Mediterráneo. Como consecuencia de ello, la colonia Iulia Augusta Faventia Paterna Barcino, actual Barcelona, fue fundada por el emperador Augusto hacia el año 10 a.C. En ella los romanos van a aplicar su modelo urbanístico: un sistema de ciudad amurallada dividida por calles cuadradas y con dos calles principales.

A pesar de ser una colonia pequeña que tenía sólo unas 10 hectáreas de superficie se encontraba muy bien situada, al costado del mar y con un puerto, lo que propicia una dinámica comercial importante y de control del territorio desde su origen (Calpena, 2015).

En el año 415 d.C., y a consecuencia de la decadencia del imperio romano, la ciudad se establecería durante algunos meses como sede de la corte del rey Ataúlfo, pasando, así, a manos de los visigodos durante cerca de tres siglos. Posteriormente, la ciudad se encontraría bajo la dominación musulmana desde el año 715 d.C. hasta que la dinastía carolingia se hizo con su dominio en el año 801 d.C. y creó el Condado de Barcelona.

Durante el reinado carolingio, los musulmanes intentaron recuperar la ciudad en numerosas ocasiones. Como consecuencia de ello, los reyes francos abandonaron la ciudad a su suerte, provocando su independencia.

El siglo XII marca una expansión importante del Condado de Barcelona al unificarse con otros condados próximos. En el año 1137 d.C. se configura la Corona de Aragón a raíz de la unión del Conde Ramón Berenguer IV con Petronila de Aragón. Con la creación de nuevos núcleos poblacionales las murallas tuvieron que ser ampliadas y fortificadas (Venteo, 2012).

La Corona de Aragón goza de un importante esplendor durante el siglo XIII, el cual se ve interrumpido en los siglos XIV y XV a raíz de la crisis demográfica ocasionada por la peste y el incremento de la piratería, y la aparición de nuevas rutas comerciales, respectivamente.

A raíz de la unión de Fernando II de Aragón e Isabel de Castilla, se unifican ambos reinos y se impone la Monarquía española durante los siglos XV a XVIII.

Más adelante, y a consecuencia del posicionamiento de algunos simpatizantes de Cataluña a favor de Carlos VI, durante la Guerra de Sucesión (1701-1714), la ciudad de Barcelona pierde varios de los privilegios y fueros con los que contaba, sufriendo también la clausura de algunas de sus instituciones a manos del vencedor de esta contienda, Felipe V. Las murallas se ven reforzadas y se habilitan los emplazamientos militares de la Ciudadela y Montjuic a manera de mantener el control de la población (Agustí, 2014).

A pesar de lo anterior, la ciudad prospera favorablemente durante los siglos venideros como consecuencia de la apertura comercial con América y el repunte del sector textil a nivel industrial.

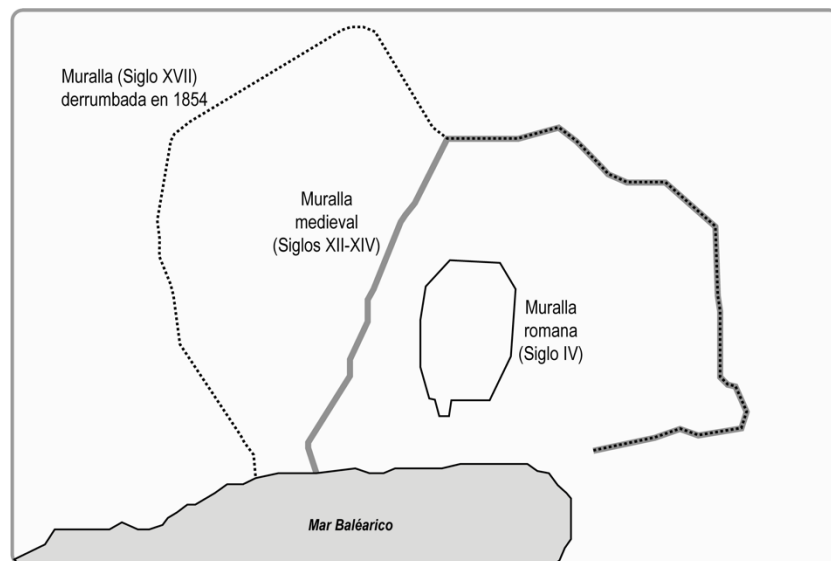


Fig. 2-2 Evolución de las murallas que rodeaban a la ciudad de Barcelona hasta el año 1854 (fuente: preparado por el autor)

2.1.1.1 *Barcelona en el siglo XIX*

El auge industrializador del siglo XIX reforzó el crecimiento de ciudades portuarias y núcleos urbanos de tipo comercial como Barcelona. Este impulso económico impactaría favorablemente en el desarrollo de infraestructura ferroviaria, carretera y urbana.

La consolidación de la industria en barrios barceloneses como Raval, Sant Pere, Poble Nou o Sant Martí Provençals atrajo nueva mano de obra, lo cual se vio reflejado en un fuerte incremento poblacional. De 1832 a 1897 el número de habitantes de Barcelona, junto con la población de municipios agregados, pasó de 116.917 a 516.238 habitantes (Busquets, 2004).

La densidad poblacional de la ciudad, hacia la mitad del siglo XIX, era una de las más altas de Europa con 850 habitantes por hectárea. Al ser declarada una ciudad militar, sus Ordenanzas municipales prohibían construir en el espacio situado alrededor de las murallas, provocando una importante concentración dentro de las mismas que generaría condiciones de vida desfavorables para sus habitantes (Grupo 2C, 2009).

Lo anterior, aunado a las pobres condiciones sanitarias e higiénicas de la ciudad, desencadenaría una fuerte presión social con el objetivo de demoler las murallas que estaban asfixiando a la población. Las murallas, que en la época romana y medieval se erigieron para su defensa, resultaban ahora obsoletas.

El derribo de las murallas medievales y la construcción del *Ensanche* (*Eixample*, por su traducción al catalán) marcarán el cambio de una ciudad antigua a una urbe moderna (Sobrequís i Callicó, 2008).

2.1.2 El plan Cerdà y el ‘Eixample’

2.1.2.1 *Concepción e historia*

El proceso de planificación del ensanche de la ciudad tomó 20 años y estuvo inmerso en una serie de discrepancias de tipo político entre el Ayuntamiento de Barcelona y el Gobierno Central en Madrid.

En 1838 se inicia un primer análisis del ensanche, apareciendo una serie de iniciativas que proponían que el mismo abarcara la zona comprendida entre los baluartes de Tallers y la Junquera. Dicho proyecto fue aprobado por la autoridad militar, sufriendo algunos cambios en 1839 y 1844 (Gimeno, 1994).

Sin embargo, la opinión pública seguía demandando la demolición de las murallas y un ensanche en el vasto llano que rodeaba a la entonces ciudad amurallada (Fig. 2-2). Derivado de las distintas presiones sociales acerca del tema, el Gobierno decide crear la Comisión Topográfica y de Ensanche de Barcelona en mayo de 1846.

De 1846 a 1853 se le presentarán al Gobierno dos proyectos. El primero de ellos a cargo del Ayuntamiento y los propietarios de la zona de Paseo de Gracia, a manos del arquitecto Juan Cortés del Rivera; y el segundo, por parte de los arquitectos del municipio.

En mayo de 1853 el Ayuntamiento constituye la Comisión Permanente del Ensanche, con lo cual se encarga el levantamiento del plano topográfico de la Ciudad y sus alrededores, derivando en la solicitud por parte del Ayuntamiento al Gobierno de un ensanche ilimitado (Agustí, 2008).

El 12 de agosto de 1854 el Ministerio de Guerra autoriza el derribo de las murallas de la ciudad y la venta de los terrenos donde se encontraban éstas, pero sin quitarle la condición de plaza fuerte a la ciudad,

quedando formalmente abierto el proceso para la construcción del Ensanche, el cual sería finalmente aprobado el 31 de mayo de 1860 (Busquets, 2004).

Derivado de las distintas visiones entre el Ayuntamiento de Barcelona y el Gobierno Central, el proceso de construcción del Ensanche sería complejo. En noviembre de 1854 el Gobierno Central designa al Ingeniero Civil Ildefonso Cerdà como ingeniero de la Hacienda Pública. Posteriormente, se integra una Comisión a cargo del estudio de un plan de edificación conjunto para el Ensanche, la cual estará conformada por personajes como Antoni Rovira i Trias o Miquel Garriga i Roca, quienes más adelante jugarán un papel fundamental en el desarrollo del Ensanche.

Cerdà es comisionado con la elaboración del plano topográfico de las cercanías de la Ciudad. En noviembre de 1855, Cerdà presenta el plano general junto con su propuesta de anteproyecto de ensanche, yendo más allá de la encomienda.

No es sino hasta diciembre de 1858, que el Ministerio de Guerra determina que Barcelona deje de considerarse como ciudad estratégica, con lo cual la competencia urbanística se traslada al Ministerio de Fomento, permitiéndose que la ciudad crezca libremente en el llano y que conserve las zonas militares de la Ciudadela y Montjuic (Gimeno, 1994). A pesar de ello, el 12 de febrero de 1859 el Ayuntamiento integra un Comisión Consultiva con la intención de convocar a un concurso abierto para la concepción del ensanche sin presión ni traba alguna.

El 15 de febrero de 1859, el Ministerio de Fomento encarga oficialmente a Cerdà los estudios y reforma del ensanche. A su vez, el 15 de abril, el Ayuntamiento lanza las bases del concurso para los proyectos del ensanche con fecha límite del 31 de julio del mismo año, haciendo caso omiso a las recomendaciones de la Comisión, provocando el malestar de esta y su consecuente renuncia (Permanyer, 2011).

En tanto, el 7 de junio se aprueba, mediante Orden Real, el Plan Cerdà con algunas modificaciones (Fig. 2-3), instruyéndole también a presentar un plan económico y de ordenanzas constructivas capaces de garantizar la debida ejecución del proyecto.

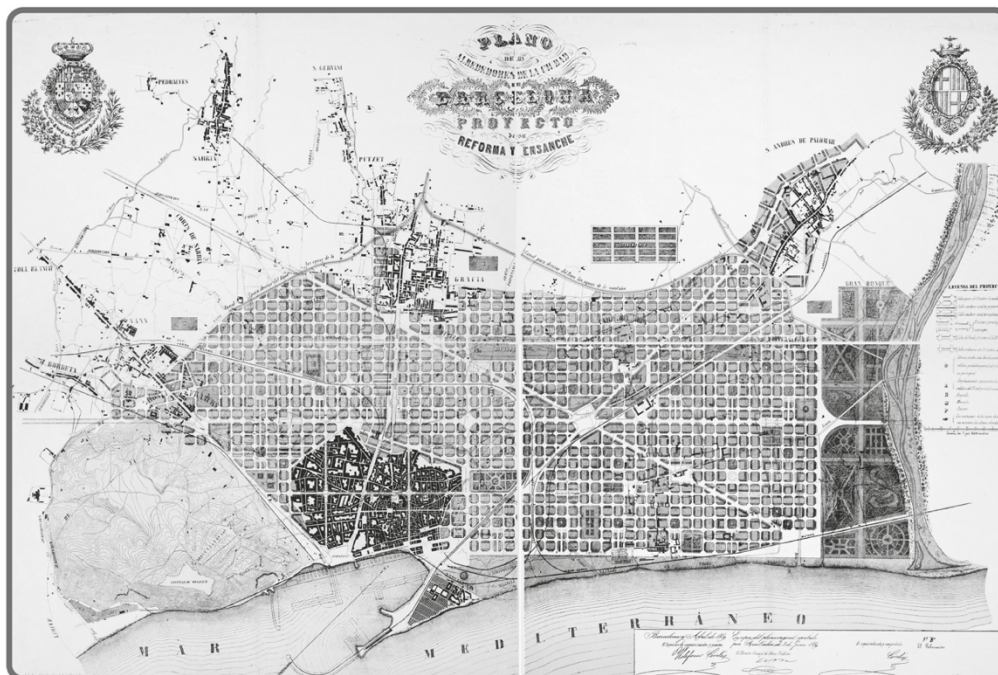


Fig. 2-3 Plano Barcelona y sus alrededores. Proyecto para el Ensanche de la ciudad y su puerto propuesto por Ildefonso Cerdà (fuente: adaptado por el autor a partir de la litografía del Arxiu Històric de la Ciutat de Barcelona (1860))

La reacción del Ayuntamiento no se hace esperar y solicita la revocación de la Orden Real. El Gobierno rechaza la petición, sin embargo, acepta que el Ayuntamiento continúe con el concurso, siempre que éste remitiera los proyectos ganadores para que el Gobierno fuera quien determinara la visión que prevalecería. De igual manera instruye que el Plan Cerdà se exhiba junto con el resto de los proyectos ganadores a efecto de que la sociedad conociera el plan que en principio se desarrollaría.

Como resultado del concurso se presentan únicamente siete proyectos, dentro de los cuales la Junta Calificadora determina que el primer premio sea para el presentado por el arquitecto Antoni Rovira i Trias, el cual presentaba un esquema radiocéntrico (Fig. 2-4) que preponderaba los aspectos visuales sobre la infraestructura de la ciudad (Busquets, 2004).

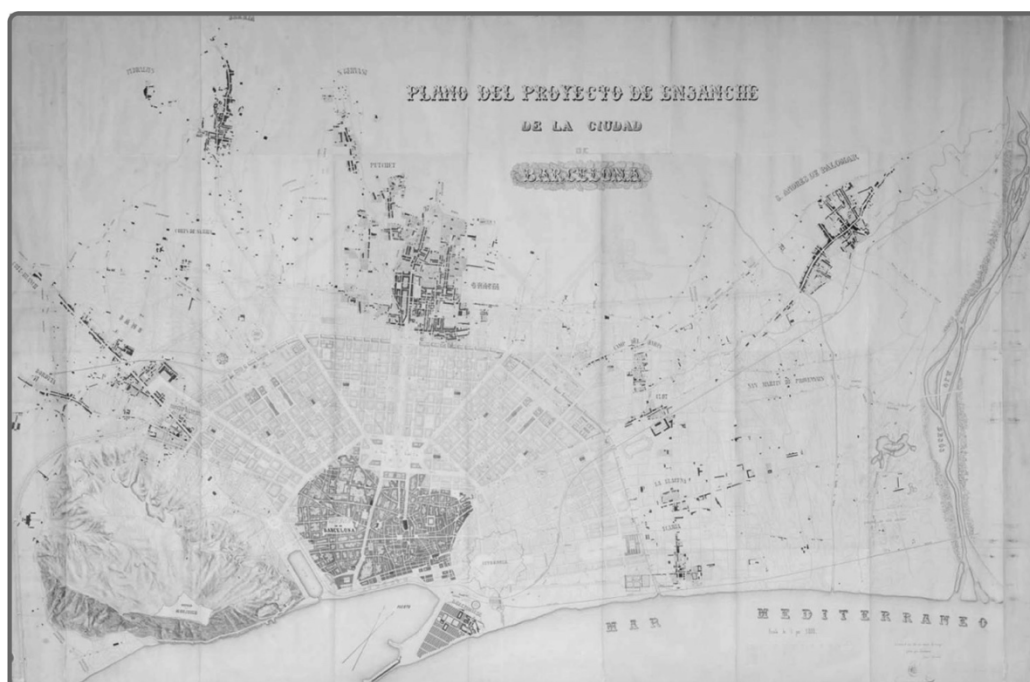


Fig. 2-4 Plano Barcelona y sus alrededores. Proyecto para el Ensanche de la ciudad y su puerto propuesto por Antoni Rovira i Trias (fuente: adaptado por el autor a partir de la litografía del Arxiu Històric de la Ciutat de Barcelona (1860))

La concepción expuesta en las bases, propuestas y proyectos gestionados desde el ámbito local, vislumbraba a la ciudad como una obra de arte, reflejándose así en los espacios, edificios públicos, monumentos y la propia nomenclatura de calles y plazas. Esta idea contrasta con el planteamiento de ciudad igualitaria de Cerdà (Figueras *et al.*, 2010).

El 31 de mayo de 1860 se aprueba finalmente el Plan Cerdà y se da inicio al proceso de urbanización del llano de Barcelona. Hoy en día, y a pesar de que el proyecto original presentado por Cerdà no fue llevado a cabo siguiendo su planteamiento original en algunos aspectos, el Plan Cerdà es considerado un paradigma del urbanismo moderno.

2.1.2.2 *El distrito de L'Eixample*

De acuerdo con los últimos censos de edificios y habitantes de 2011 y 2019 (Tabla 2-1), respectivamente, el distrito de L'Eixample tiene hoy en día un poco más de un cuarto de millón de habitantes y alrededor de 7.780 edificios destinados a vivienda que se encuentran distribuidos en una superficie de 746 hectáreas (Institut d'Estadística de Catalunya, 2011, 2019b).

Tabla 2-1 Distribución por distritos del número de habitantes y edificios de la ciudad de Barcelona (fuente: Institut d'Estadística de Catalunya (2011) (2019b))

Distrito	Ciutat Vella	Eixample	Sants-Montjuïc	Les Corts	Sarrià-Sant Gervasi	Gràcia	Horta-Guinardó	Nou Barris	Sant Andreu	Sant Martí	Total
Habitantes	103.492	265.910	184.091	81.974	149.260	121.798	171.495	170.669	149.821	238.315	1.636.762
%	15,58	18,23	12,47	3,32	5,95	6,72	7,83	9,81	6,36	13,72	100,00
Edificios de vivienda	5.462	7.780	6.916	2.456	8.252	7.413	9.951	7.090	7.068	7.442	69.830
%	7,8	11,1	9,9	3,5	11,8	10,6	14,3	10,2	10,1	10,7	7,8

En lo que respecta a los edificios destinados a viviendas del distrito de L'Eixample cabe destacar:

- El número de edificios con siete o más plantas sobre rasante supera el 67 % del total (Tabla 2-2).
- El número de edificios en un estado *deficiente, malo o ruinoso* equivalen a cerca de un 12% del total (Tabla 2-3).
- Los periodos con mayor actividad edificadora corresponden a 1900-1921 y 1921-1940, concentrando más del 40% del parque edificado del distrito (Tabla 2-4).
- El número de edificios con más de 60, 80 o 100 años de antigüedad corresponden aproximadamente a un 71%, 56% y 21% del total de edificios del Distrito, respectivamente (Tabla 2-4). Estos porcentajes contrastan con aquellos calculados para toda la ciudad, los cuales equivalen a un 55%, 35% y 11% para las mismas antigüedades de más de 60, 80 y 100 años, respectivamente.

Tabla 2-2 Plantas sobre rasante de edificios destinados a vivienda de la Ciudad de Barcelona, por distrito (fuente: Institut d'Estadística de Catalunya (2011))

Distrito	Número de plantas sobre rasante									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10+
Ciutat Vella	261	165	196	566	1.460	1.739	837	164	41	33
Eixample	201	155	172	172	437	1.448	1.845	1.381	1.033	936
Sants-Montjuïc	436	952	828	880	1.039	965	787	466	251	312
Les Corts	197	454	280	148	200	200	172	302	249	254
Sarrià-St Gervasi	775	1.971	1.166	681	879	936	864	556	234	190
Gràcia	797	1.330	1.146	1.055	1.019	823	526	330	246	141
Horta-Guinardó	1.817	2.275	1.165	1.267	1.628	889	392	217	150	151
Nou Barris	1.428	750	564	923	1.223	1.101	457	293	165	186
Sant Andreu	1.060	1.772	906	546	971	483	321	371	266	372
Sant Martí	607	1.399	565	583	786	910	586	488	645	873
Barcelona	7.579	1.1223	6.988	6.821	9.642	9.494	6.787	4.568	3.280	3.448
%	10,9	16,1	10,0	9,8	13,8	13,6	9,7	6,5	4,7	4,9

Tabla 2-3 Estado de conservación de edificios destinados a vivienda de la Ciudad de Barcelona, por distrito (fuente: Institut d'Estadística de Catalunya (2011))

Distrito	Estado de conservación							
	Ruinoso		Malo		Deficiente		Bueno	
	Total	%	Total	%	Total	%	Total	%
Ciutat Vella	44	0,8	302	5,5	1.582	29,0	3.534	64,7
Eixample	13	0,2	130	1,7	778	10,0	6.859	88,2
Sants-Montjuïc	26	0,4	172	2,5	1.120	16,2	5.598	80,9
Les Corts	22	0,9	7	0,3	179	7,3	2.248	91,5

Sarrià-St Gervasi	20	0,2	92	1,1	558	6,8	7.582	91,9
Gràcia	23	0,3	162	2,2	711	9,6	6.517	87,9
Horta-Guinardó	39	0,4	137	1,4	1.042	10,5	8.733	87,8
Nou Barris	18	0,3	53	0,7	610	8,6	6.409	90,4
Sant Andreu	8	0,1	185	2,6	431	6,1	6.444	91,2
Sant Martí	41	0,6	165	2,2	1.065	14,3	6.171	82,9
Barcelona	254	0,4	1.405	2,0	8.076	11,6	6.0095	86,1

Tabla 2-4 Año de construcción de edificios destinados a vivienda de la Ciudad de Barcelona, por distrito (fuente: Institut d'Estadística de Catalunya (2011))

Distrito		Año de construcción									
		Antes de 1900	1900-1920	1921-1940	1941-1950	1951-1960	1961-1970	1971-1980	1981-1990	1991-2001	2002-2011
Ciutat Vella	Edificios	2960	870	708	251	153	115	51	110	139	71
	%	54,5	16,0	13,0	4,6	2,8	2,1	0,9	2,0	2,6	1,3
Eixample	Edificios	1.194	1.604	1.545	628	583	760	761	271	241	188
	%	15,4	20,6	19,9	8,1	7,5	9,8	9,8	3,5	3,1	2,4
Sants-Montjuïc	Edificios	730	1.152	1.341	509	661	860	819	270	377	197
	%	10,6	16,7	19,4	7,4	9,6	12,4	11,8	3,9	5,5	2,8
Les Corts	Edificios	24	140	264	164	212	482	639	276	139	94
	%	1,0	5,8	10,8	6,7	8,7	19,8	26,3	11,3	5,7	3,9
Sarrià-St Gervasi	Edificios	272	396	897	905	1.145	1.685	1.555	607	532	249
	%	3,3	4,8	10,9	11,0	13,9	20,4	18,9	7,4	6,5	3,0
Gràcia	Edificios	736	983	1.219	768	783	912	1.011	411	358	228
	%	9,9	13,3	16,5	10,4	10,6	12,3	13,6	5,5	4,8	3,1
Horta-Guinardó	Edificios	204	388	1.029	963	2.138	2.676	1.278	461	511	303
	%	2,1	3,9	10,3	9,7	21,5	26,9	12,8	4,6	5,1	3,0
Nou Barris	Edificios	65	280	556	330	1.465	2.559	988	233	311	296
	%	0,9	4,0	7,8	4,7	20,7	36,1	13,9	3,3	4,4	4,2
Sant Andreu	Edificios	432	486	1.178	550	877	1.243	989	368	519	426
	%	6,1	6,9	16,7	7,8	12,4	17,6	14,0	5,2	7,3	6,0
Sant Martí	Edificios	636	941	828	310	822	1.298	856	305	985	461
	%	8,5	12,6	11,1	4,2	11,0	17,4	11,5	4,1	13,2	6,2
Barcelona	Edificios	7253	7.254	9.565	5.378	8.839	12.590	8.947	3.312	4.112	2.513
	%	10,4	10,4	13,7	7,7	12,7	18,1	12,8	4,7	5,9	3,6

L'Eixample es el distrito que concentra la mayor cantidad de edificios con más de siete plantas. El estado de conservación de sus edificios se encuentra por encima de la media de la ciudad, al contrario de lo que ocurre con el distrito de Ciutat Vella, el cual concentra la mayor cantidad de edificios con estados de conservación ruinoso, malo o deficiente, lo que se puede asociar directamente con la época de construcción de la mayoría de los edificios que componen su parque edificado (83,5%, 70,5% y 54,5% para edificaciones con más de 60, 80 y 100 años, respectivamente).

El interés por el estudio del distrito de L'Eixample recae, entre otros aspectos, por su importancia y representatividad dentro de la ciudad, siendo el distrito con mayor población y el tercero en cuanto a número de edificios destinados a vivienda.

Los edificios de mampostería no reforzada representan la mayoría de las edificaciones del distrito de L'Eixample (*i.e.* >75% - Milutinovic & Trendafiloski (2003); Lantada (2007); Moreno & Bairán (2012)). Esta tipología y los materiales empleados presentan variantes y características particulares de acuerdo con su época constructiva (ver 2.3.3).

Las estructuras de interés para este trabajo son aquellas que pertenecen al período comprendido entre los años 1890 y 1940, donde la resistencia de fuerzas verticales es resuelta a base de muros de fábrica de ladrillo no reforzados y un sistema de piso a base de forjados unidireccionales resueltos por medio de vigas metálicas, a diferencia de sus predecesores en los cuales las vigas eran de madera.

A pesar de que los edificios fueran construidos de forma independiente, las prácticas constructivas de la época consideraban el uso de paredes medianeras compartidas entre estructuras aledañas dentro de una misma manzana. Lo anterior derivó en un trazado urbanístico que comprendía grandes agregados de edificios compuestos por manzanas también conocidas como islas (Fig. 2-5), cuyas principales características son:

- Manzanas cuadradas de 113 metros de lado.
- Separación por medio de calles de 20 metros de ancho.
- Se edifica en los cuatro lados de la manzana.
- Superficie edificada de hasta 9.200 m².
- La altura promedio de los edificios es de 27,45 m.
- El ancho de fachada de sus edificios oscila entre los 12 y 16 metros.
- La profundidad en planta de sus edificios oscila entre los 11 y 25 metros.

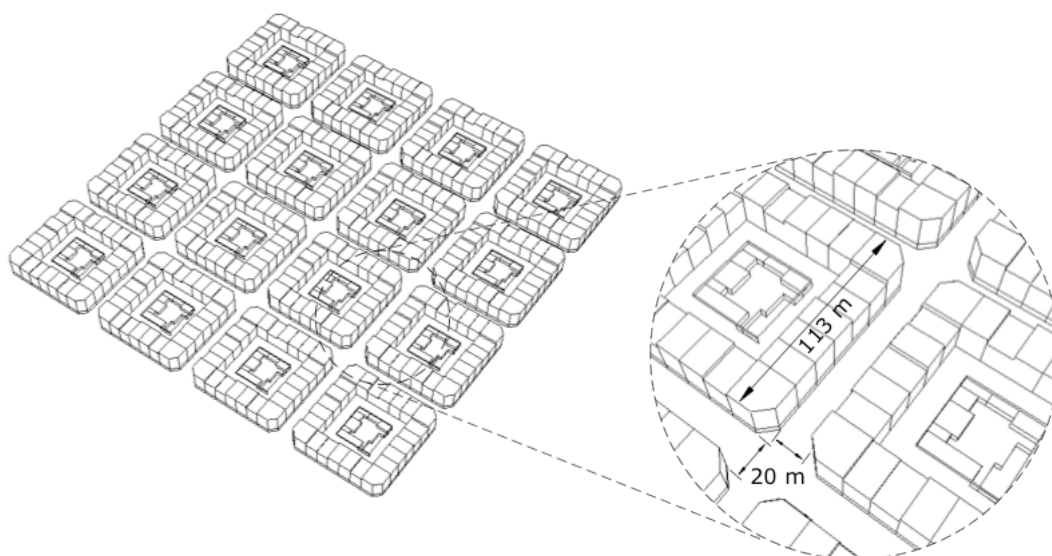


Fig. 2-5 Trazado urbano típico del distrito de L'Eixample (Barcelona) de acuerdo con lo establecido por el Plan Cerdà (fuente: preparado por el autor)

Cabe destacar que las características relacionadas con el volumen y número de lados edificados en cada manzana difieren a lo propuesto originalmente por Cerdà (*i.e.* superficie edificada de 5000 m², altura promedio de edificios de 24,40 m, 2 lados edificados). Estas modificaciones atienden motivos diversos como la elevada densidad demográfica, el mayor beneficio para propietarios y constructores, así como la presión y descontento presente por parte de las autoridades locales (*i.e.* Ayuntamiento) ante la imposición del plan por parte del Gobierno Central.

Por tanto, el diseño de los edificios queda limitado a la forma ortogonal de las manzanas, derivando en el uso de patrones repetitivos en toda la ciudad. Así mismo, y dependiendo de su posición dentro cada lado edificado de la manzana (Fig. 2-6a), podemos observar dos tipos principales de edificios: **1**) aquellos localizados en la parte central de cualquiera de los lados de la manzana (Fig. 2-6b), y **2**) aquellos que se encuentran en las esquinas, conocidos también como edificios de chaflán (Fig. 2-6c).

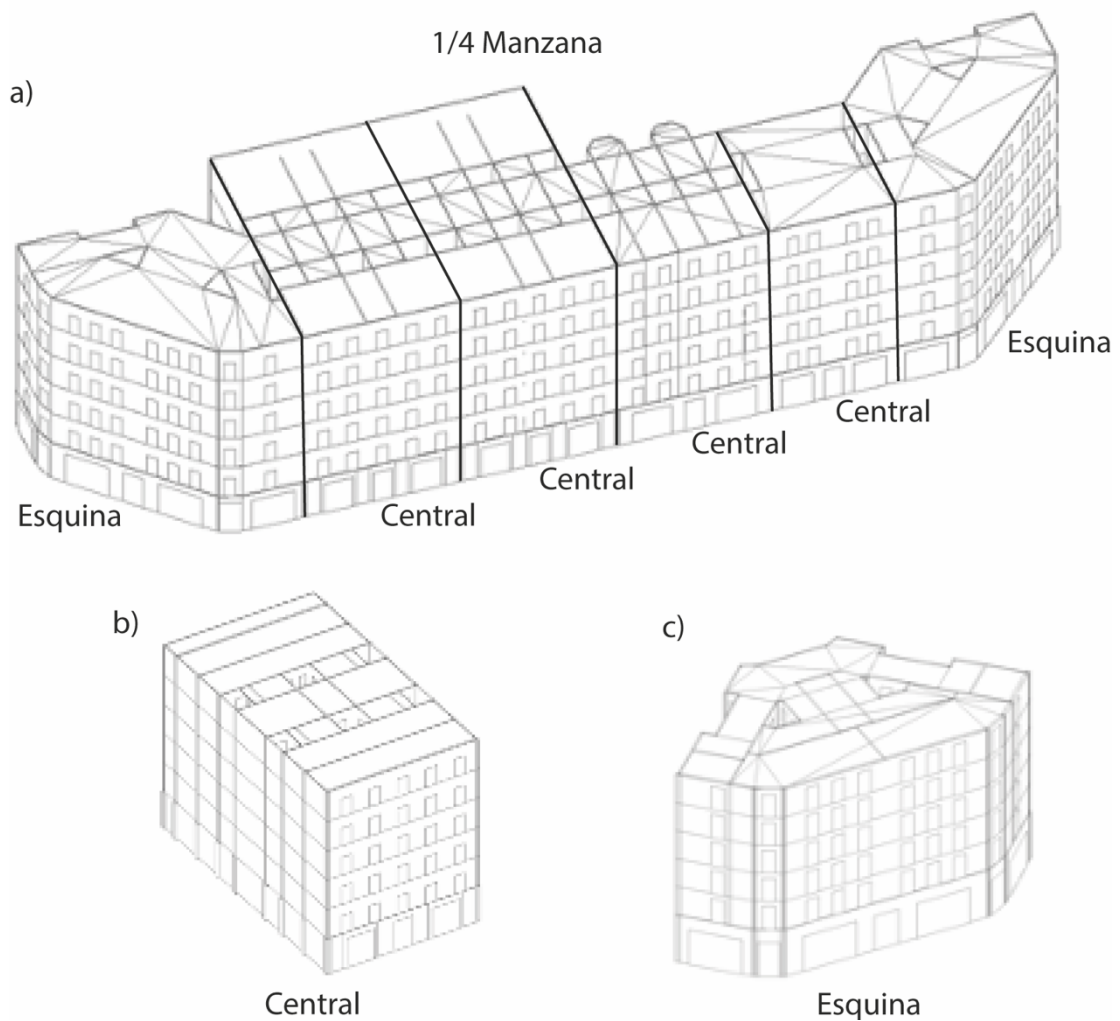


Fig. 2-6 a) Lateral de una manzana típica del distrito de L'Eixample b) edificio de tipo central c) edificio de esquina o chaflán (fuente: preparado por el autor)

En cuanto a la configuración geométrica vista en planta, los edificios centrales suelen tener un perímetro de forma rectangular con un cociente entre las dimensiones longitudinal y transversal de aproximadamente dos a uno. Por otro lado, los edificios de esquina suelen tener un perímetro de forma pentagonal.

Adicionalmente, y asumiendo que las prácticas constructivas de la época permitían el uso de paredes medianeras comunes entre edificios, es común encontrar manzanas compuestas, parcial o totalmente, por agregados de varios edificios.

Debido al proceso natural de renovación del parque habitacional de cualquier ciudad, la demolición de edificios antiguos es una práctica común que permite dar paso a estructuras capaces de solventar las necesidades urbanas actuales. Para el caso de Barcelona, esto involucra la ruptura en la continuidad de algunos de sus agregados de edificios, con lo cual se ha de estudiar la afectación que dicha modificación puede conllevar en el comportamiento estructural de las edificaciones afectadas.

2.2 La acción sísmica esperada

2.2.1 Introducción

El riesgo que conllevan los terremotos puede relacionarse con un aspecto económico y con un aspecto técnico. A su vez, desde el punto de vista técnico, existen aspectos de tipo probabilista ligados directamente con la ocurrencia y las características del terremoto como tal, así como otros relacionados con los efectos que este pueda inducir sobre una(s) determinada(s) estructura(s).

Hoy en día, y como consecuencia de lo anterior, la consideración de la acción sísmica es un concepto inevitablemente presente en las diversas normativas sismorresistentes actuales. Su definición está directamente ligada con el tipo de análisis estructural que se pretenda realizar.

Tradicionalmente, el término *peligrosidad sísmica* se refiere a la probabilidad de que el parámetro elegido para medir el movimiento del terreno (*i.e.* aceleración básica del terreno) exceda un determinado valor (*i.e.* umbral) debido a la ocurrencia de un terremoto durante un tiempo establecido. No obstante, estudios recientes han demostrado la insuficiencia a la hora de definir la acción únicamente por medio de este parámetro, resultando con ello en la definición de índices capaces de caracterizar la violencia y potencial de daño de los terremotos basándose en registros de movimiento sísmico y/o la respuesta de estructuras sometidas a ellos (Barbat *et al.*, 1994).

El estudio de la peligrosidad sísmica es, por tanto, una herramienta fundamental para la toma de decisiones en la planificación urbanística, así como en el diseño sísmico de estructuras. Uno de los requisitos fundamentales para poder llevar a cabo este tipo de estudios involucra el conocimiento de la sismicidad de la zona de interés, la cual puede definirse a partir de diversos parámetros relacionados con la localización y el tamaño/destructividad del movimiento sísmico.

En lo que se refiere a los parámetros de localización, las *fuentes sismogénicas* son el resultado de la recolección de toda la información geotectónica e información sísmica disponible en la zona de estudio.

Por otro lado, los parámetros referentes al tamaño/destructividad del terremoto son la magnitud, la intensidad y el momento sísmicos, así como la aceleración, la velocidad y el desplazamiento del terreno.

La medición, disponibilidad y subjetividad/objetividad de la información de los parámetros mencionados anteriormente, está estrechamente relacionada con dos épocas principales, la época pre-instrumental y la época instrumental (a partir de 1857).

Existen diversos métodos para llevar a cabo la evaluación de la peligrosidad sísmica, cada uno de los cuales presenta distintas hipótesis y resultados en base a la calidad y completitud de la información disponible respecto a la sismicidad pasada y presente de la zona estudiada, teniendo entre ellos: métodos deterministas, probabilistas, de valores extremos y Bayesianos (Muñoz, 1989).

La elección del método a emplear dependerá del tipo de análisis estructural a realizar, del grado de actividad e instrumentación de la zona sísmica en estudio y, por ende, de la calidad y completitud de los datos disponibles.

El uso de espectros de respuesta es común para análisis de tipo lineal, donde la respuesta estructural se obtiene a partir de análisis modales. En el caso de análisis de tipo no-lineal, se advierten dos posibilidades según la complejidad del estudio: **1)** un análisis lineal equivalente mediante el uso de espectros de respuesta inelástica para estructuras convencionales, y **2)** el uso de acelerogramas para definir el movimiento sísmico del terreno, y procedimientos de cálculo avanzados (*e.g.* integración paso a paso) para estructuras no convencionales (Barbat *et al.*, 1995).

2.2.2 Peligrosidad sísmica en Barcelona

La ciudad de Barcelona, está localizada en una región sísmica considerada de riesgo leve-moderado al noreste de la Península Ibérica, correspondiéndole una intensidad entre VI y VII según lo establece la escala macrosísmica Europea, EMS'98 (Grünthal, 1998).

Se considera que el grado de vulnerabilidad de la ciudad es elevado debido a que un gran porcentaje de su parque inmobiliario funcional no fue diseñado considerando los efectos de las acciones sísmicas. Adicionalmente, la información instrumental con la que se cuenta es escasa y reciente.

Por otro lado, en el marco del proyecto RISK-UE (Mouroux *et al.*, 2004), diversos estudios fueron llevados a cabo con la finalidad de caracterizar diferentes tipos de zonas y terrenos de la ciudad de Barcelona (Irizarry, 2004; Secanell *et al.*, 2004), resultando en la definición de dos escenarios sísmicos posibles y un total de cuatro tipos de terreno diferentes distribuidos en los 10 distritos en los que se divide la ciudad (Fig. 2-7). Adicionalmente, se realizaron estudios de microzonación a manera de obtener los espectros de respuesta específicos de sitio de dichos escenarios (Cid, 1998; Secanell *et al.*, 1998).

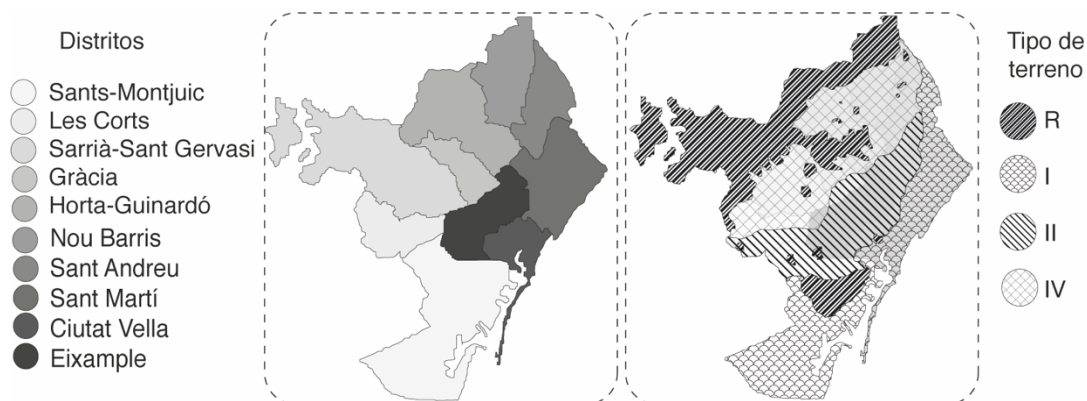


Fig. 2-7 Distritos y tipos de terreno de la ciudad de Barcelona, España (Secanell *et al.*, 2004) (fuente: preparado por el autor)

El primer escenario, denominado escenario *determinista*, asume que la sismicidad histórica contiene suficiente información para evaluar el riesgo sísmico de una región determinada, quedando definido de acuerdo a dos eventos históricos (Fig. 2-8): el terremoto de 1428 ocurrido en el Pirineo Este, con una profundidad focal de 10 km, una distancia epicentral de 90 km y una intensidad de IX según la escala MSK (Grünthal, 1993); y el terremoto de Cardedeu de 1448, con una profundidad de 7 km, una distancia epicentral de 25 km y una intensidad VIII según la escala MSK (Susagna & Goula, 1999; Secanell *et al.*, 2004).

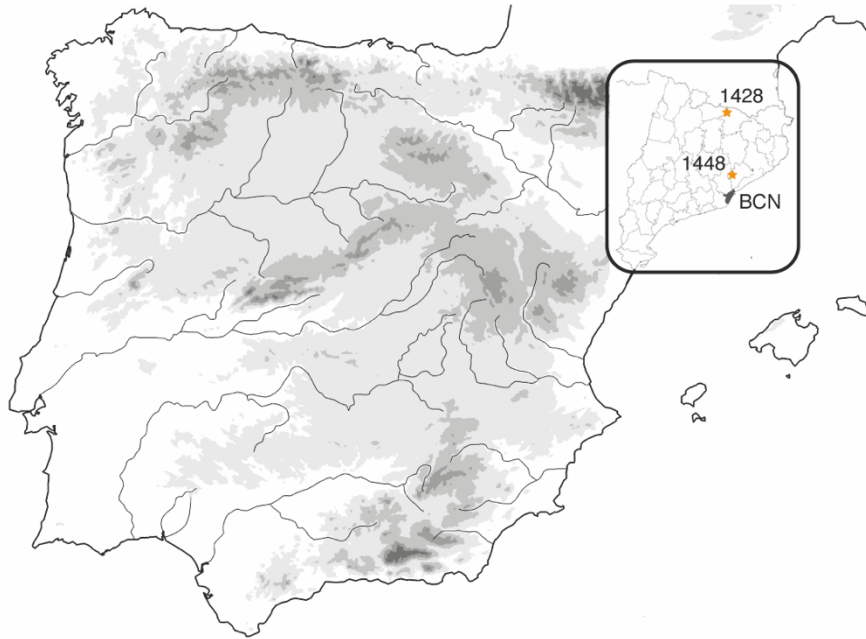


Fig. 2-8 Eventos sísmicos históricos de 1428 y 1448 utilizados para la definición del escenario sísmico determinista de la ciudad de Barcelona, España (fuente: preparado por el autor)

A su vez, el segundo escenario, denominado escenario *probabilista*, se obtiene en base a la ley de atenuación de Ambrasseys (Ambrasseys *et al.*, 1996) y parámetros regionales obtenidos por Secanell *et al.* (2004), compatibles con registros de movimiento sísmico con un 10% de probabilidad de ocurrencia en 50 años (*i.e.* registros sísmicos con 475 años de período de retorno).

2.2.3 La norma sísmica española (NCSE-02)

La acción sísmica es considerada dentro del territorio español mediante la Norma de Construcción Sismorresistente (NCSE-02, 2002). Su objetivo primordial es el de proporcionar los criterios a seguir con el fin de evitar la pérdida de vidas humanas y mitigar aquellos daños que puedan ocasionar los terremotos, así como reducir los costes económicos asociados a ellos.

El mapa de peligrosidad sísmica para España que se muestra en la Fig. 2-9 contiene los valores característicos de la aceleración horizontal del terreno (*i.e.* aceleración sísmica básica, a_b), así como el coeficiente de contribución K de cada uno de los diversos tipos de terremoto que podrían esperarse en cada punto de este.

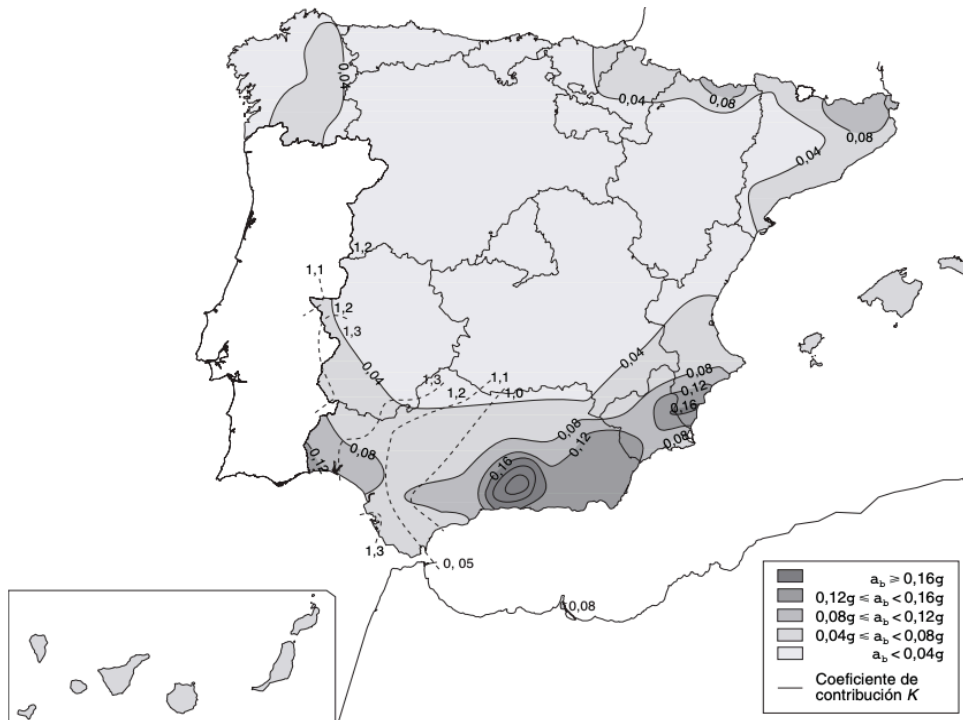


Fig. 2-9 Mapa de peligrosidad sísmica del territorio español (fuente: NCSE-02 (2002))

Así mismo, podemos definir la aceleración sísmica de cálculo, a_c , como:

$$a_c = S \cdot \rho \cdot a_b \quad (2-1)$$

donde:

- a_b es la aceleración sísmica básica obtenida del mapa de la Fig. 2-9.
- ρ es el coeficiente de riesgo (adimensional) en función de la importancia de la construcción en cuestión ($\rho = 1.0$ – normal, $\rho = 1.3$ - especial) y la probabilidad de que se exceda a_c durante la vida útil de la misma.
- S es el coeficiente de amplificación del terreno, el cual varía en función del valor de $\rho \cdot a_b$ (Tabla 2-5).

Tabla 2-5 Coeficiente de amplificación del terreno de acuerdo a la normativa sismorresistente (fuente: NCSE-02 (2002))

S	Condiciones
$S = \frac{C}{1.25}$	$\rho \cdot a_b \ll 0,01 g$
$S = \frac{C}{1.25} + 3,33 \cdot \left(\rho \cdot \frac{a_b}{g} - 0,1 \right) \cdot \left(1 - \frac{C}{1.25} \right)$	$0,01 g < \rho \cdot a_b < 0,04 g$
$S = 1,0$	$0,04 g \ll \rho \cdot a_b$

C – coeficiente del terreno acorde a las características geotécnicas (Tabla 2-6)

Tal como se muestra en la Tabla 2-6, la normativa clasifica los tipos de terreno en cuatro:

Tabla 2-6 Tipos de terreno del territorio español de acuerdo a la normativa sismorresistente (fuente: NCSE-02 (2002))

Tipo	I	II	III	IV
Descripción	Roca compacta, suelo cementado o granular muy denso	Roca muy fracturada, suelos granulares densos o cohesivos duros	Suelo granular de compactad media o suelo cohesivo de consistencia firme a muy firme	Suelo granular suelto o suelo cohesivo blando

Velocidad de propagación de las ondas elásticas transversales o de cizalla, V_s en m/s	$V_s > 750$	$750 \gg V_s > 400$	$400 \gg V_s > 200$	$V_s = 200$
C	1,0	1,3	1,6	2,0

En lo que respecta a Barcelona, la aceleración básica del terreno es igual a $0,04g$ según el mapa de peligrosidad de la Fig. 2-9. Así mismo, los edificios de interés para este trabajo se consideran de importancia normal, por lo que $\rho = 1,0$ y, por tanto, se cumple que $\rho \cdot a_b \gg 0,04g$, por lo que el coeficiente de amplificación del terreno, S , a utilizar es igual a $1,0$. Finalmente, sustituyendo estos valores en la ec. (2-1), obtenemos un valor para la aceleración de cálculo igual a $a_c = 0,04g$.

2.2.3.1 Espectros de respuesta elástica

La NCSE-02 define un espectro normalizado de respuesta elástica (*i.e.* oscilador simple con amortiguamiento al 5% del crítico) para aceleraciones horizontales y con un periodo de retorno de 500 años (Fig. 2-10), en el que podemos diferenciar tres tramos:

- ascendente
 $T < T_A$ $\alpha(T) = 1 + 1,5 \cdot T/T_A$
- meseta
 $T_A \ll T \leq T_B$ $\alpha(T) = 2,5$
- descendente
 $T > T_B$ $\alpha(T) = K \cdot C/T$

donde:

- $\alpha(T)$ es el valor del espectro normalizado de respuesta elástica.
- T es el período propio del oscilador en segundos.
- K el coeficiente de contribución obtenido del mapa de peligrosidad sísmica (Fig. 2-9).
- C el coeficiente del terreno (Tabla 2-6).
- T_A y T_B los períodos característicos del espectro de respuesta, los cuales se calculan:

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

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

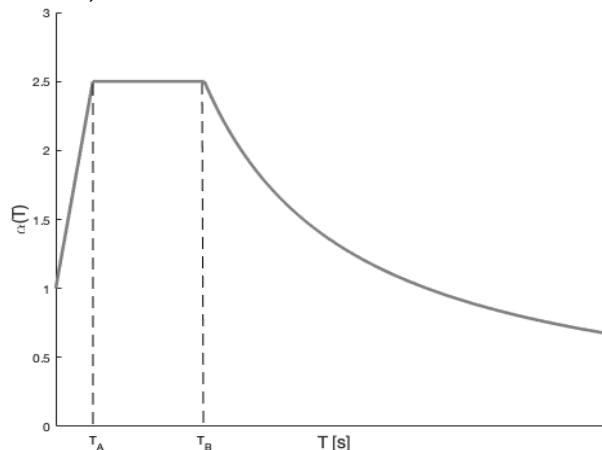


Fig. 2-10 Espectro de respuesta elástica normalizado (5% amortiguado) según NCSE-02 (fuente: preparado por el autor)

Partiendo del espectro normalizado, y empleando el valor de la aceleración sísmica de cálculo, $a_c = 0,04g$, obtenido anteriormente para Barcelona y los edificios de mampostería no reforzada, podemos generar los espectros de respuesta para todos los tipos de terreno que contempla la normativa (Fig. 2-11).

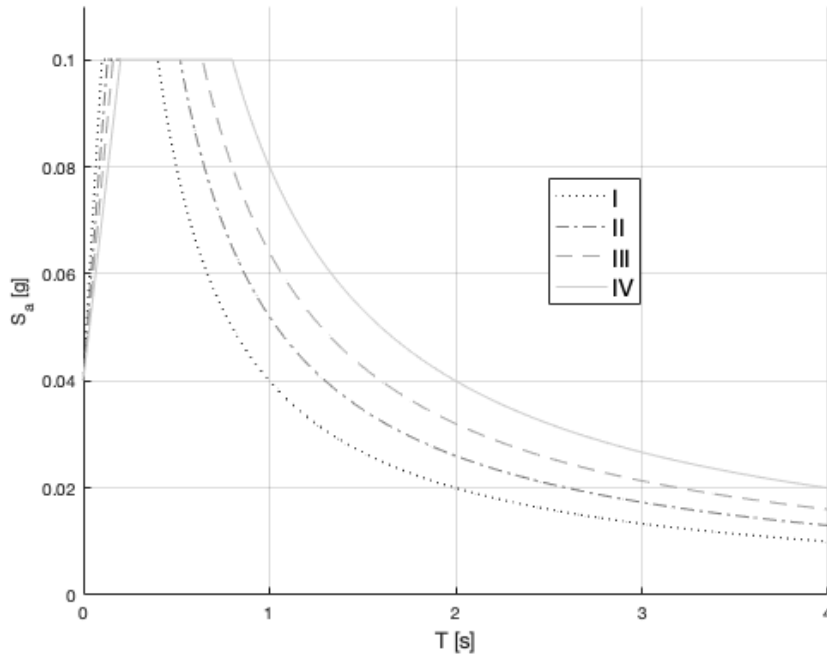


Fig. 2-11 Espectro de respuesta elástica (5% amortiguado) para cada tipo de terreno y $a_c = 0.04 g$, según NCSE-02 (fuente: preparado por el autor)

2.2.4 El Eurocódigo 8 (EC8)

A nivel europeo, las disposiciones para proyectos de estructuras sismorresistentes se encuentran contenidas en el Eurocódigo 8 (Eurocode-8-1, 2004), cuyos objetivos principales son: preservar la vida humana, reducir el impacto y los daños producidos en la medida de lo posible, así como asegurar la operatividad de la infraestructura esencial y de protección civil.

El Eurocódigo 8, en su versión más reciente de 2004, distingue la existencia de cinco tipos de terreno (Tabla 2-7).

Tabla 2-7 Tipos de terreno de acuerdo con EC8 (fuente: elaborado por el autor)

Tipo	A	B	C	D	E
Descripción	Roca o formaciones geológicas similares a roca	Depósitos de arena muy densa, grava o arcilla muy rígida	Depósitos profundos de arena densa o de densidad media a densa, grava o arcilla dura	Depósitos de suelos sueltos a medios no cohesionados o principalmente suelos cohesivos de rigidez débil a firme	Suelo constituido por capa aluvial de tipo C o D que yace sobre un material más rígido tipo A
Velocidad de propagación de las ondas elásticas transversales o de cizalla, V_s en m/s	$V_s > 800$	$800 > V_s > 360$	$360 > V_s > 180$	$V_s < 180$	—

El espectro de respuesta elástico para las componentes horizontales queda definido en cuatro tramos a partir de las siguientes expresiones:

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

$$\begin{aligned}
T_B \ll T \ll T_C & \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5 \\
T_C \ll T \ll T_D & \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5 \left[\frac{T_C}{T} \right] \\
T_D \ll T \ll 4s & \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5 \left[\frac{T_C T_D}{T^2} \right]
\end{aligned}$$

donde:

- $S_e(T)$ es la ordenada del espectro de respuesta elástico en términos de pseudo-aceleraciones espectrales.
- T es el período de vibración de un sistema lineal con un grado de libertad (IGDL).
- a_g es el valor del cálculo de la aceleración del terreno referida a un terreno tipo A, conforme la expresión:
$$a_g = \gamma_I \cdot a_{gR}$$
- T_B y T_C son los límites inferior y superior de los períodos de la meseta del espectro (i.e. tramo con aceleración constante).
- T_D es el período a partir del cual empieza la rama de desplazamiento constante.
- S es el coeficiente del terreno.
- η es el coeficiente corrector del amortiguamiento, cuyo valor es unitario para un índice de amortiguamiento viscoso de $\xi = 5\%$, de lo contrario se calcula como:

$$\eta = \sqrt{\frac{10}{5+\xi[\%]}} \gg 0,55$$

El Eurocódigo 8 identifica dos tipos de espectro:

- *Tipo 1*: empleado para representar los sismos de magnitud media a grande (i.e. magnitud $\gg 5,5$) que se generan a poca distancia.
- *Tipo 2*: empleados para representar los sismos de magnitud inferior (i.e. magnitud $< 5,5$).

En función del tipo de espectro se definen también diversos valores para los parámetros S , T_B , T_C y T_D que permiten generar los espectros de respuesta (Tabla 2-8).

Tabla 2-8 Valores de los parámetros que definen los espectros de respuesta horizontales de tipo I y II para cada tipo de terreno según el EC8 (fuente: preparado por el autor)

Tipo de terreno Tipo de espectro	A		B		C		D		E	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
S	1,0	1,0	1,2	1,35	1,15	1,5	1,35	1,8	1,4	1,6
T_B [s]	0,15	0,05	0,15	0,05	0,20	0,10	0,20	0,10	0,15	0,05
T_C [s]	0,4	0,25	0,5	0,25	0,6	0,25	0,8	0,30	0,5	0,25
T_D [s]	2,0	1,2	2,0	1,2	2,0	1,2	2,0	1,2	2,0	1,2

La aceleración pico de referencia para un tipo de terreno A, a_{gR} , ha de obtenerse a partir de los valores establecidos en los mapas de peligrosidad establecidos de la normativa local (e.g. NCSE-02). Del apartado anterior sabemos que para Barcelona el valor correspondiente es igual a $a_{gR} = 0,04 g$.

El factor de importancia, γ_I , correspondiente a las distintas clases de importancia de los edificios (Tabla 2-9), ha de definirse de acuerdo con lo establecido en la documentación local, o bien, en su defecto deben emplearse los valores de 0,8, 1,0, 1,2 y 1,4 para las clases I, II, III y IV, respectivamente. Los edificios analizados en este trabajo se consideran de importancia normal, correspondiéndoles un factor de importancia, de acuerdo con lo establecido en la NCSE-02, de $\gamma_I = 1,0$.

Tabla 2-9 Clasificación de la importancia de los edificios según su clase de acuerdo con lo establecido en el EC8 (fuente: preparado por el autor)

Clase de importancia	Tipo de edificación
I	Edificios de protección civil de menor importancia
II	Edificios ordinarios que no pertenecen a otra categoría
III	Edificios cuya resistencia sísmica es importante en términos de las consecuencias asociadas a su colapso
IV	Edificios cuya integridad durante los terremotos es de vital importancia para protección civil

Los espectros de respuesta horizontales aplicables para Barcelona, corresponden a los espectros del tipo 2. La Fig. 2-12 muestra el espectro de respuesta tipo 2 para los distintos tipos de terreno considerados por el Eurocódigo 8.

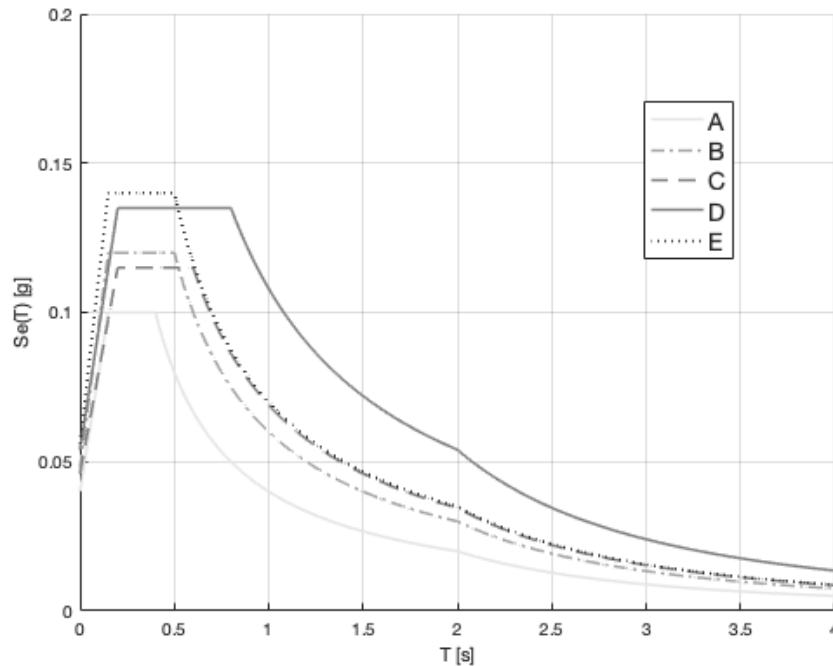


Fig. 2-12 Espectro de respuesta elástico tipo 2 para terrenos tipo A, B, C, D y E según EC8 (fuente: preparado por el autor)

2.2.5 Espectros específicos para la ciudad

A raíz de los estudios mencionados anteriormente (ver 2.2.2) y de la zonación de la ciudad propuesta por (Cid, 1998), el Instituto Cartográfico de Cataluña-ICC (Irizarry *et al.* (2003)) desarrolla una formulación analítica para los diversos espectros de respuesta 5% amortiguados en función del tipo de terreno (*i.e.* zona -Tabla 2-10), permitiendo, de este modo, representar de forma fiable los distintos niveles de demanda para los escenarios determinista y probabilista.

Tabla 2-10 Tipos de terreno en la ciudad de Barcelona de acuerdo con los estudios realizados por Cid (1998) (fuente: elaborado por el autor)

Zona	R	I	II	III
Descripción	Afloramientos paleozoicos y terciarios	Afloramientos holocenos con presencia de materiales cuaternarios y terciarios a profundidades mayores	Afloramientos del pleistoceno sobre un sustrato terciario y basamento con materiales del Paleozoico	Composición similar a la zona II con una capa de materiales del Cuaternario por encima del basamento paleozoico

Las formulaciones que permiten definir el espectro de respuesta elástico para las componentes horizontales obtenidas propuestas por el ICC (Irizarry *et al.*, 2003) son las siguientes:

$$\begin{aligned}
 0 < T \ll T_B & \quad S_e(T) = pga \cdot \left[1 + \frac{T}{T_B} \cdot (B_C - 1) \right] \\
 T_B \ll T \ll T_C & \quad S_e(T) = pga \cdot B_C \\
 T_C \ll T \ll T_D & \quad S_e(T) = pga \cdot B_C \left[\frac{T_C}{T} \right]^d
 \end{aligned}$$

$$T_D \ll T \ll 4s \quad S_e(T) = pga \cdot B_C \left[\frac{T_C T_D}{T^2} \right]$$

donde:

- $S_a(T)$ es la ordenada del espectro de respuesta elástico en términos de pseudo-aceleraciones espectrales.
- T es el período de vibración de un sistema lineal con un grado de libertad (*IGDL*).
- pga es el valor de la aceleración pico del terreno.
- B_C es un factor definido como:

$$B_C = \frac{S_{amax}}{pga}$$

- T_B y T_C son los límites inferior y superior de los períodos de la meseta del espectro (*i.e.* tramo con aceleración constante).
- T_D es el período a partir del cual empieza la rama de desplazamiento constante.
- d es un parámetro que modula la caída del espectro para períodos superiores:

$$d = - \frac{\log(T_B/T_C)}{\log(T_D/T_C)}$$

En función del tipo de escenario considerado (*i.e.* determinista o probabilista) se definen los diversos valores para los parámetros B_C , T_B , T_C , T_D y d , que a su vez permiten generar los espectros de respuesta correspondientes (Tabla 2-11).

Tabla 2-11 Valores de los parámetros que definen los espectros de respuesta horizontales de los escenarios determinista y probabilista para cada tipo de terreno según el ICC (fuente: preparado por el autor)

Zona	R		I		II		III	
	Det.	Prob.	Det.	Prob.	Det.	Prob.	Det.	Prob.
Escenario								
B_C	2,26	2,29	1,91	2,00	2,45	2,50	2,29	2,57
T_B [s]	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
T_C [s]	0,23	0,25	0,39	0,40	0,22	0,23	0,22	0,19
T_D [s]	1,75	1,75	2,30	2,85	2,20	2,21	2,00	1,77
d	1,12	0,94	1,70	1,34	1,43	1,28	1,40	1,12

De los mismos estudios mencionados previamente se desprenden una serie de valores correspondientes a la aceleración pico del terreno, pga , los cuales se recogen en la siguiente tabla:

Zona	R		I		II		III	
	Det.	Prob.	Det.	Prob.	Det.	Prob.	Det.	Prob.
Escenario								
pga [g]	0,072	0,100	0,136	0,188	0,141	0,194	0,122	0,169

Los espectros de respuesta elástico para los escenarios determinista y probabilista se muestran en la Fig. 2-13 y Fig. 2-14, respectivamente, para todos los tipos de terrenos considerados.

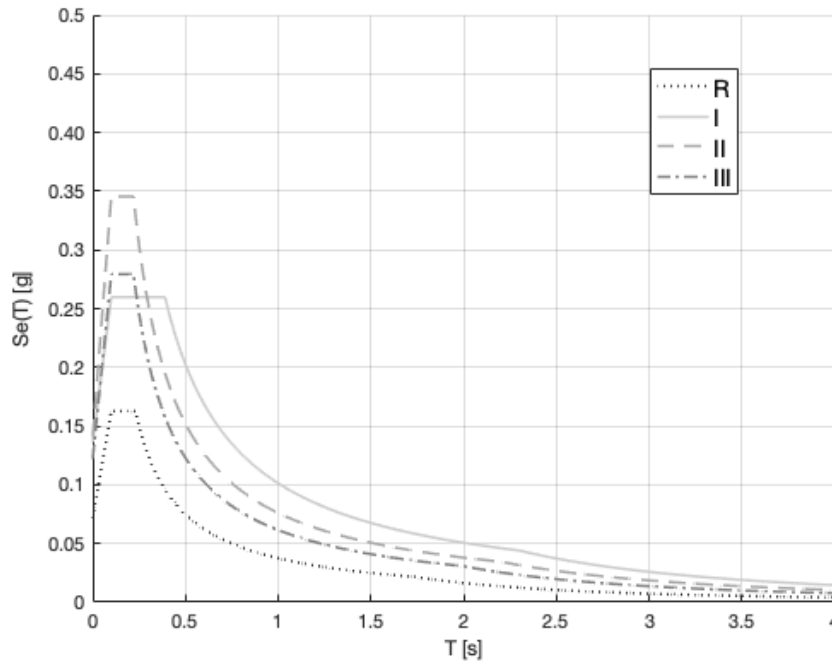


Fig. 2-13 Espectros de respuesta elástico deterministas para terrenos tipo R a III según ICC (fuente: preparado por el autor)

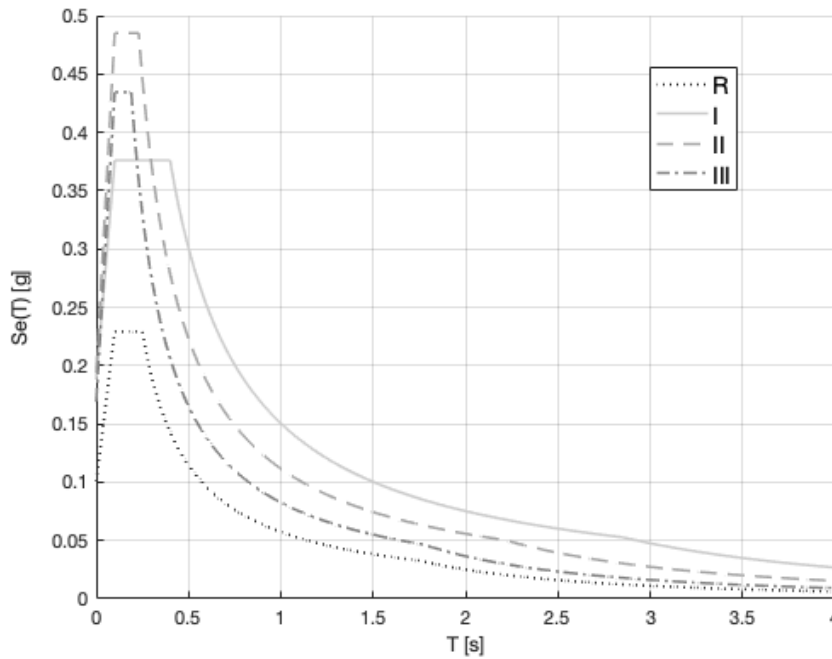


Fig. 2-14 Espectros de respuesta elástico probabilistas para terrenos tipo R a III según ICC (fuente: preparado por el autor)

2.2.6 Comparativa

De acuerdo con los estudios de microzonación realizados por Cid (1998) para la ciudad de Barcelona, el distrito del Eixample se localiza en la Zona II, la cual se corresponde con los tipos de terreno III y C de la NCSE-02 y EC8, respectivamente (Tabla 2-12).

Tabla 2-12 Equivalencia de los distintos tipos de terreno de acuerdo con la NCSE-02, EC8 y estudios de Cid (1998) (fuente: elaborado por el autor)

NCSE-02	V_s [m/s]	EC8	Cid.	V_s [m/s]
Tipo de terreno		Tipo de terreno	Tipo de terreno	
I	>800	A	R	~800
II	750-800	B	III	~400
	700-750			
	650-700			
	600-650			
	550-600			
III	500-550	C	II	~300
	450-500			
	400-450			
	360-400			
	300-360			
IV	250-300	D	I	~200
	200-250			
	180-200			
	<180			

**Tipos de terreno correspondientes al Eixample sombreados

Los espectros normalizados de respuesta correspondientes al tipo de terreno del Eixample, de acuerdo con la NCSE-02, EC8 y las formulaciones del ICC (Irizarry *et al.*, 2003) se muestran en la Fig. 2-15. Así mismo, y a efectos comparativos, en la Fig. 2-16 estos espectros también se muestran aplicando la aceleración del terreno correspondiente según sea el caso.

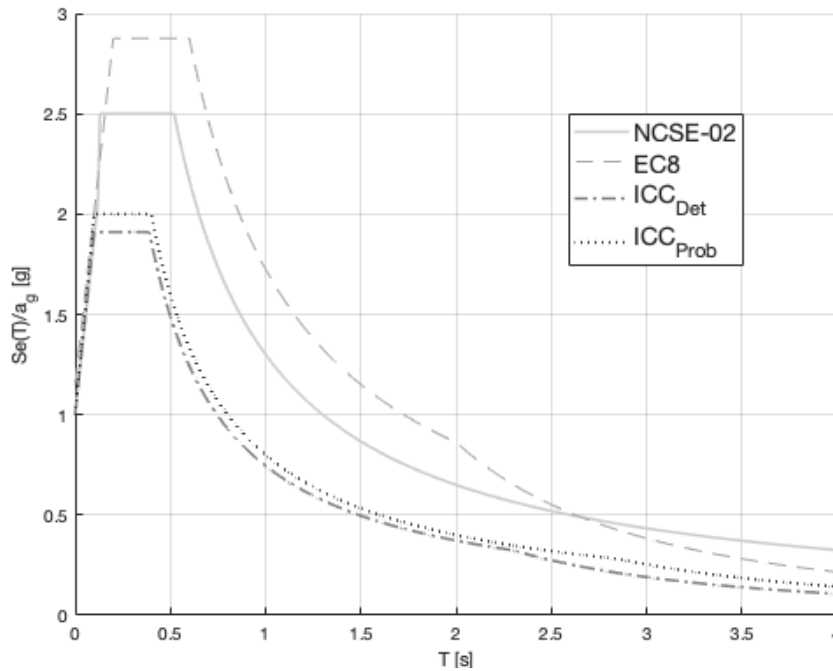


Fig. 2-15 Comparativa de los espectros normalizados de respuesta elástica esperados en el distrito de L'Eixample (Barcelona) (fuente: preparado por el autor)

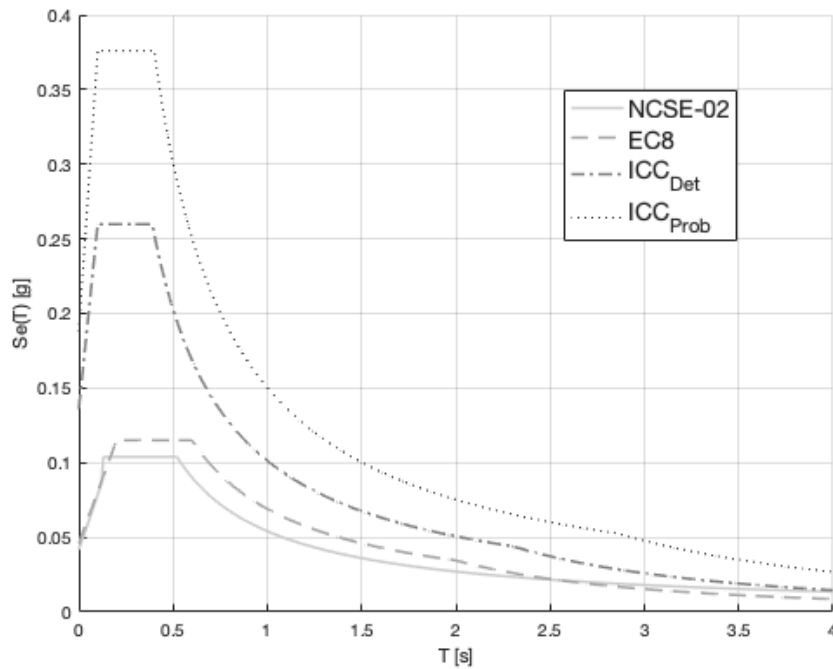


Fig. 2-16 Comparativa de los espectros de respuesta elástico esperados en el distrito de L'Eixample (Barcelona) (fuente: preparado por el autor)

2.3 Los edificios

2.3.1 Generalidades

Los edificios de mampostería no reforzada pertenecen a una de las tipologías estructurales más comunes y fáciles de identificar dentro del parque urbano funcional de un gran número de ciudades europeas como es el caso de la ciudad de Barcelona, España. Aún en la actualidad, este tipo de estructuras representa un porcentaje elevado de la totalidad de edificios destinados a vivienda dentro de la ciudad (*i.e.* $\approx 75\%$ - Milutinovic & Trendafiloski (2003); Lantada (2007); Moreno & Bairán (2012)).

De acuerdo con el Censo de Edificios correspondiente al año 2011 (Institut d'Estadística de Catalunya, 2011), existe un total de 70.717 edificios repartidos entre los 10 distritos que conforman la ciudad de Barcelona, de los cuales un 98,7 % (69.830 edificios) están destinados principalmente a uso de vivienda (Tabla 2-13).

Tabla 2-13 Censo 2011 de edificios e inmuebles de la Ciudad de Barcelona (fuente: Institut d'Estadística de Catalunya (2011))

Edificios	70.717
- Destinados principalmente a vivienda	69.830
- Destinados a otras finalidades	887
Inmuebles	857.862

Así mismo, cabe resaltar algunos datos adicionales relacionados con los edificios destinados a vivienda de Barcelona:

- El número de edificios con siete o más plantas sobre rasante supera el 25 % del total (Tabla 2-14).
- El número de edificios en un estado *deficiente, malo o ruinoso* equivalen a un 14% del total (Tabla 2-15).
- El número de edificios con 60, 80 o 100 o más años de antigüedad corresponde aproximadamente a un 55%, 35% y 21% del total, respectivamente (Tabla 2-16).

Tabla 2-14 Plantas sobre rasante de edificios destinados a vivienda de la Ciudad de Barcelona (fuente: Institut d'Estadística de Catalunya (2011))

Plantas sobre rasante	Número de edificios	%
1	7.579	10,9
2	11.223	16,1
3	6.988	10,0
4	6.821	9,8
5	9.642	13,8
6	9.494	13,6
7	6.787	9,7
8	4.568	6,5
9	3.280	4,7
10 o más	3.448	4,9
Total	69.830	100

Tabla 2-15 Estado de conservación de edificios destinados a vivienda de la Ciudad de Barcelona (fuente: Institut d'Estadística de Catalunya (2011))

Estado de conservación	Número de edificios	%
Ruinoso	254	0,4
Malo	1.405	2,0
Deficiente	8.076	11,6
Bueno	60.095	86,1
Total	69.830	100

Tabla 2-16 Año de construcción de edificios destinados a vivienda de la Ciudad de Barcelona (fuente: Institut d'Estadística de Catalunya (2011))

Año de construcción	Número de edificios	%
Antes de 1900	7.253	10,4
De 1900 a 1920	7.240	10,4
De 1921 a 1940	9.565	13,7
De 1941 a 1950	5.378	7,7
De 1951 a 1960	8.839	12,7
De 1961 a 1970	12.590	18,0
De 1971 a 1980	8.747	12,8
De 1981 a 1990	3.312	4,7
De 1991 a 2001	4.112	5,9
De 2002 a 2011	2.594	3,7
Total	69.830	100

2.3.2 La mampostería de obra de fábrica de ladrillo

2.3.2.1 Historia

La mampostería ha sido de vital importancia para el hombre a lo largo de su historia. Podemos asociar sus orígenes con la necesidad básica del ser humano de tener un espacio que le brinde seguridad, descanso y confort ante las inclemencias de la naturaleza. Es así como las primeras estructuras surgen al apilar rocas, permitiendo satisfacer dicha necesidad.

El uso del adobe -tipo de ladrillo sin cocción que se produce de la mezcla de pasto seco y barro- se fecha entre el año 10.000 y 8.000 a.C., mientras que el ladrillo -bloque de arcilla o barro cocido- constituye el principal material empleado por el hombre para la construcción de sus viviendas desde hace al menos 10.000 años. El ladrillo era, por tanto, valorado y utilizado extensamente en lugares donde la piedra y la madera eran escasas.

A pesar de pasar desapercibido en algunas ocasiones, el ladrillo es uno de los inventos que más ha contribuido al desarrollo de distintas culturas y civilizaciones, estando siempre presente en cualquier lugar del mundo civilizado y cubriendo infinidad de necesidades y usos.

Pese a tratarse de un material económico, son muchas las virtudes que podemos mencionar del ladrillo, entre las cuales caben resaltar la rapidez y sencillez de su colocación en fábrica, su versatilidad ante distintos climas, su mantenimiento prácticamente nulo, su resistencia, su incombustibilidad o la inalterabilidad de su forma.

Sus componentes, métodos de fabricación y aplicaciones se han desarrollado con el paso del tiempo, pudiendo destacar cuatro grandes hechos o innovaciones relativas a su evolución: **1)** el uso de moldes para su fabricación (antiguo Egipto - 1.450 a.C.); **2)** la cocción de los ladrillos (3500 a.C.); **3)** la industrialización del proceso de fabricación (segunda mitad del siglo XIX); y **4)** la introducción de los ladrillos huecos (inicios del siglo XX).

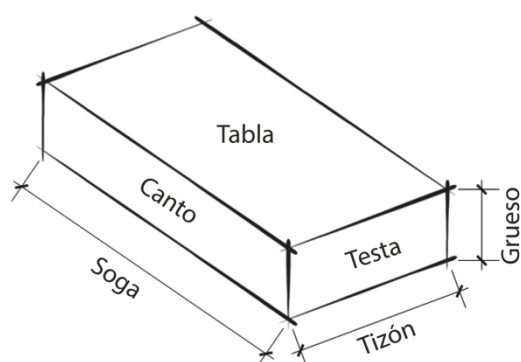
En lo que respecta a la historia del ladrillo moderno, podemos mencionar dos etapas: la producción por técnicas artesanales (1780-1830) y la producción por técnicas mecánicas (desde 1830). La segunda etapa se vió favorecida por el enorme aumento en la productividad, y el gran impulso y difusión en el uso de este material, tanto en el campo de las obras públicas como de la arquitectura civil, a raíz de la revolución industrial, gestada en la segunda mitad del siglo XIX en gran parte de las capitales europeas y otras grandes urbes mundiales, así como por la gran apertura comercial que eliminaría la limitante de la presencia de bancos de arcilla cercanos para la fabricación de ladrillos.

El ladrillo comienza a verse desplazado, como elemento estructural principal, poco antes de la primera mitad del siglo XX debido a los requerimientos en altura cada vez mayores en las edificaciones y a la aparición y uso de nuevos materiales constructivos como el hormigón o el acero.

Hoy en día, el ladrillo sigue siendo un material ampliamente utilizado debido a sus cualidades constructivas, económicas y, más recientemente, de eficiencia energética, propiciando la creación de sistemas constructivos nuevos que ofrecen soluciones viables en la industria de la construcción contemporánea.

2.3.2.2 Ladrillo

El ladrillo se puede definir como una pieza paralelepípedica, comúnmente de forma ortoédrica (Fig. 2-17), la cual ha de ser manejable con una sola mano y que se obtiene mediante el moldeo, secado y la consiguiente cocción de una pasta de tierras arcillosas. Su forma es muy regular, su manejo fácil y su uso de lo más variado y amplio.



Grueso: Dimensión del lado menor (altura)
Tizón: Dimensión del lado intermedio (ancho)
Soga: Dimensión del lado mayor (largo)
Testa: Cara definida por el tizón y el grueso, siendo la cara menor del ladrillo.
Canto: Cara definida por la soga y el grueso, siendo la cara mediana del ladrillo.
Tabla: Cara definida por la soga y el tizón, siendo la cara mayor del ladrillo.

Fig. 2-17 Elementos geométricos del ladrillo (fuente: preparado por el autor)

Las medidas de los ladrillos tradicionales han estado ligadas con diversas medidas humanas (*i.e.* dedos, pies, palmos, cuartas, etc.) durante gran parte de su existencia. En España lo anterior implicaría variaciones en sus dimensiones de acuerdo con la época y ordenanza vigente (Tabla 2-17).

Tabla 2-17 Ejemplos de equivalencias en el dimensionamiento de ladrillos según la ordenanza vigente (fuente: elaborado por el autor)

Ordenanza	Soga		Tizón		Grueso		Proporción (soga/tizón)
	medida	cm	medida	cm	medida	cm	
Madrid, 1820	17 dedos	31,5	13 dedos	24	3,5 dedos	6,5	1,30
Madrid, 1857	1 pie	29,6	1 cuarta	20,9	2 dedos	3,7	1,41 o $\sqrt{2}$

La adopción del sistema métrico decimal en la segunda mitad del siglo XIX propicia los primeros estudios de normalización a fin de adaptar las distintas piezas de fábrica a las nuevas medidas, estableciendo su obligatoriedad a partir del mes de julio de 1880, según lo establecido en el Real Decreto del 14 de febrero de 1879 (Rodríguez Sánchez, 2006).

Los nuevos estudios y tratados de construcción incorporarán como base las proporciones que han de tener las distintas dimensiones de los ladrillos, y el grueso de las juntas de mortero, con la finalidad de permitir distintas disposiciones de las piezas según el elemento del que se trate y su función estructural (Ger y Lobe, 1898; Bassegoda Piniés, 1920; Esselborn, 1928).

Posteriormente, y como consecuencia de la incorporación de maquinaria para la fabricación industrial de ladrillos, se publica el B.O. de mayo de 1942 con la intención de establecer unas dimensiones normalizadas, para los ladrillos macizos, de 25 cm, 12cm y 5 cm para la soga, tizón y grueso, respectivamente. La disposición anterior no fue del todo bien recibida por algunas comunidades, existiendo regiones que continuaron fabricando ladrillos con dimensiones distintas (*e.g.* Cataluña siguió fabricando ladrillos de 29 cm), generándose también diversos estudios y comparativas entre las diversas opciones disponibles (Lahuerta, 1948; Valentín Gamazo, 1948).

Finalmente, el proceso constante de unificación de formas y tamaños permitirá establecer las medidas y proporciones que existen actualmente, abandonando las antiguas. Así mismo, la industrialización permitirá la creación de nuevos tipos de piezas (*e.g.* ladrillos huecos, perforados, ...) y la utilización de nuevos materiales (*e.g.* conglomerados, hormigón, ...).

2.3.2.3 *Materias primas*

Arcillas

Las tierras arcillosas son la principal materia prima del ladrillo. En ellas podemos encontrar predominantemente arcilla (silicato de alúmina hidratado), así como carbonato de cal, arena y óxido de hierro, formando un agregado de minerales que procede principalmente de la descomposición de rocas que, como el granito, contienen abundante feldespato y que se originan a raíz del desgaste ocasionado por el viento y el agua.

El grado de pureza de los feldespatos que componen a la arcilla, así como el tipo y concentración de los elementos adicionales que puedan acompañarla, propician que exista una variedad muy grande de arcillas, con una amplia gama de propiedades como su plasticidad, contracción, refractariedad, porosidad y color.

Lo anterior nos permite clasificarlas y determinar sus usos más adecuados, teniendo, por ejemplo, arcillas puras (*i.e.* caolín) para la fabricación de porcelanas; arcillas con proporciones debajo del 25% de

carbonato de cal para la fabricación de ladrillos resistentes al agua y hielo; o arcillas con óxido de hierro ideales para la obtención de ladrillos con resistencias a la compresión superiores.

Desgrasantes

Existen dos principales grupos de arcillas de acuerdo con su grado de plasticidad:

- Arcillas grasas: presentan una gran plasticidad, fácil moldeo y gran adherencia.
- Arcillas magras: presentan poca plasticidad y un elevado contenido arenoso.

A este respecto, los materiales desgrasantes pretenden disminuir la plasticidad del material cerámico antes de su cocción. Estos materiales se adicionan en arcillas de gran plasticidad y adherencia con la finalidad de contrarrestar algunas de las dificultades (*i.e.* deformaciones y roturas) que presentan tanto en su manipulación como en su secado.

Dentro de los materiales desgrasantes más comunes, podemos mencionar el polvo de ladrillo molido, ceniza, sílice generalmente en forma de cuarzo (*i.e.* arena), sílex, residuos industriales e incluso micas y granos de calcita.

Agua

El agua también es una materia prima en la fabricación de ladrillos y deberá de estar exenta de sales solubles para evitar que éstas salgan a la superficie en forma de eflorescencias.

2.3.2.4 Fabricación

Se producen una gran variedad de tipos de ladrillos, cada uno para funciones distintas, utilizándose tanto para la construcción como para la decoración.

La industria ladrillera provee, junto con el cemento, la cal y la arena, la materia prima para la mayor parte de las construcciones habitadas o utilizadas por los seres humanos.

La dispersión de la producción permite que el ladrillo sea un material de bajo coste debido a su proximidad con los centros de consumo, contando con un circuito simple de fabricación, acopio y distribución.

Los principales pasos involucrados en la fabricación de ladrillos son:

1. Selección de la materia prima y preparación de la pasta o mezcla.
2. Moldeado.
3. Secado.
4. Cocción.

La ejecución de estos pasos difiere de acuerdo con el método de fabricación empleado. Se pueden identificar tres principales métodos en la fabricación del ladrillo: los métodos artesanales, los métodos semi-industriales y los métodos industriales.

La principal diferencia entre el método artesanal y semi-industrial radica en el proceso de moldeado, donde la pasta para el ladrillo semi-industrial se extruye a través del uso de maquinaria, generando con ello superficies lisas. Los ladrillos resultantes de cualquiera de estos dos métodos se caracterizan por tener una gran dispersión en sus propiedades, lo cual está estrechamente relacionado con el proceso de cocción.

El método industrial se diferencia de los anteriores por la utilización de maquinaria tanto en el moldeado de las piezas como por el uso de hornos más sofisticados que permiten una cocción más homogénea, resultando en piezas de una calidad final superior, con características determinadas y controlables.

Los efectos de cada una de las etapas del proceso de producción se ven reflejados en la calidad final de las unidades, la cual no depende únicamente de la calidad de la materia prima seleccionada para su elaboración, sino también del tratamiento de esta durante la fabricación de los ladrillos.

Como resultado de una buena fabricación, los ladrillos habrán de ser sólidos, resistentes, de forma homogénea y compacta, sin la presencia de caliches ni fisuras, con una buena cochura y de color uniforme.

2.3.2.5 Características y propiedades

Dentro de las características básicas que un ladrillo debe poseer podemos mencionar:

- Una geometría homogénea con caras planas, lados paralelos, bordes y ángulos agudos, producto de un buen moldeado.
- Suficiente resistencia a la compresión.
- Correcta adherencia con el mortero gracias a una adecuada porosidad.
- No verse comprometido ante condiciones climáticas adversas.
- Ausencia de eflorescencias causadas por la presencia de sales solubles.
- Ausencia de fisuras.
- Cochura adecuada sin presentar indicios de vitrificación o coloraciones no deseadas.

Con respecto a estas características, podemos clasificar las propiedades de las piezas en estéticas y mecánicas. Las primeras están relacionadas con aspectos como el color y la textura del ladrillo, mientras que las segundas se refieren a aspectos relacionados con la resistencia a la compresión, la variación en las dimensiones, posibles concavidades, coeficientes de absorción, resistencia al congelamiento y al fuego, aislamiento térmico, entre otros.

Así mismo, podemos clasificar a los ladrillos de diversas maneras dentro de las cuales podemos mencionar:

1. Por su fabricación (*e.g.* de tejar, de mesa, galleteros, prensados, etc.).
2. Por su grado de cochura (*e.g.* adobes, santos, escafilados, pardos, recochos, etc.).
3. Por su configuración geométrica (*e.g.* macizos, de panal, perforados, huecos, aplantillados, trabucos, refractarios, hidráulicos, coloreados, etc.).
4. Por su uso y calidad (*e.g.* resistentes, aligerantes, forjantes, o tipos A, B y C según la UNE 41004).

2.3.2.6 Mampostería

La mampostería es un sistema tradicional de construcción que consiste en la colocación manual de los diversos elementos o mampuestos que lo componen. Durante mucho tiempo fue el sistema preponderante de construcción en la mayor parte del mundo, manteniendo aún una importante presencia en diversos países y regiones.

Dentro de los tipos de mampuestos existentes podemos mencionar, por ejemplo, piedras, ladrillos o bloques prefabricados, los cuales normalmente presentan formas regulares y se caracterizan por sus dimensiones, resistencia y absorción, entre otras características.

La disposición y anclaje de los mampuestos se conoce como *aparejo* y la unión de estos materiales se lleva a cabo a través de una *argamasa* que comúnmente es una mezcla de cemento, cal, arena y agua en determinadas proporciones (*i.e.* mortero).

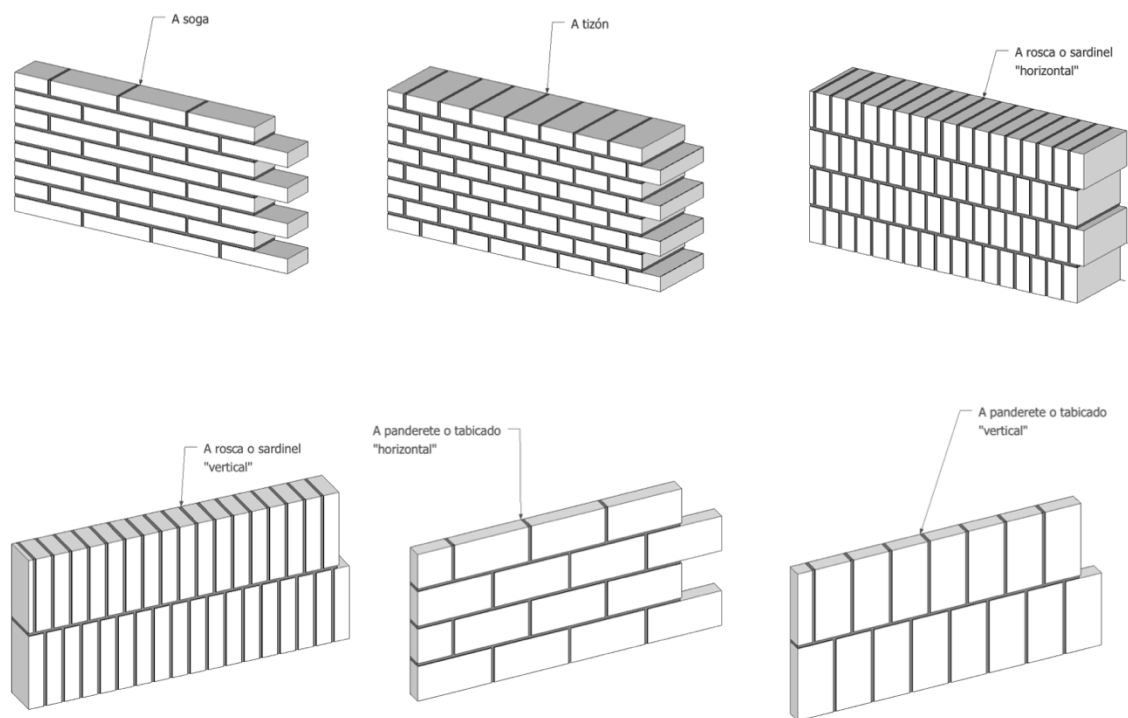
Su uso se ha extendido gracias a la infinidad de posibilidades que permite al variar distintas formas, texturas, tamaños, acabados y colores, tanto de sus elementos constitutivos, como del conjunto de estos.

Su aportación no es sólo de tipo resistente sino que también se suman aspectos relacionados con el confort visual y funcional, la eficiencia energética, la durabilidad, entre otros. En lo que respecta a los muros de mampostería, su resistencia y durabilidad estará estrechamente ligada con la calidad tanto de los materiales empleados en su construcción, como de la pericia de la mano de obra empleada para su construcción.

2.3.2.7 Aparejos

El aparejo es el sistema de traba adoptado y que rige la disposición geométrica en que las distintas piezas de mampostería se colocan ordenadamente para garantizar la unidad constructiva de muros o tabiques. Los aparejos pueden ser regulares o irregulares, de acuerdo con las piezas que los constituyen. Las piezas se disponen en hiladas sucesivas, las cuales se asientan unidas mediante algún conglomerante (*i.e.* mortero).

Las diferentes maneras de disponer la fábrica permite clasificarlas como una entidad propia e identificativa de algunos países que lo practican, tal es el caso de los aparejos inglés, flamenco, holandés, belga o incluso ‘a la española’ (Fig. 2-18).



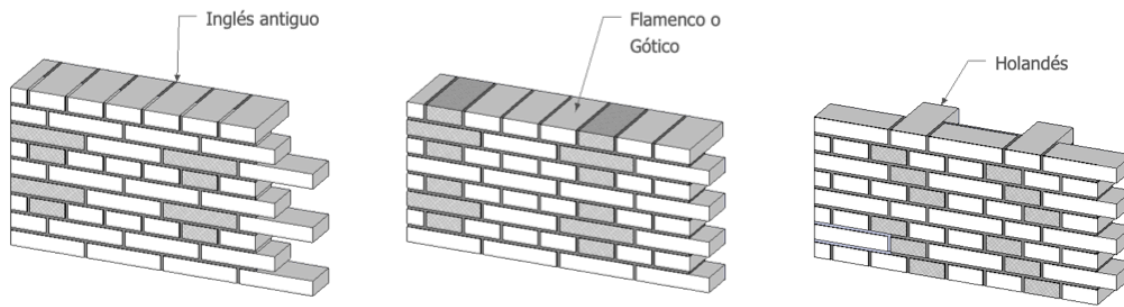


Fig. 2-18 Distintos ejemplos de aparejos (fuente: preparado por el autor)

2.3.2.8 Muros

Se conocen como *fábricas* a aquellas construcciones de piedras naturales o artificiales que se agrupan de forma regular o irregular mediante un aglomerante (*i.e.* mortero). En el caso de que estas cierren edificios se les conoce como *muros*, que a su vez pueden ser continuos en toda su longitud o estar delimitados por pilares entre vanos.

De acuerdo con su situación y función podemos clasificar los muros en:

- *Muros de carga*: aquellos que reciben y soportan cargas verticales provenientes de otros elementos (*e.g.* forjados) y que son transmitidas desde el techo hasta los cimientos. Pueden ser exteriores o interiores, reforzados o no reforzados, y su espesor se determina de acuerdo con la cantidad de carga que han de soportar.
- *Muros de arriostamiento*: aquellos que proveen estabilidad lateral, recibiendo y soportando cargas con componente horizontal (*e.g.* empuje de tierras).
- *Muros autoportantes*: aquellos capaces de recibir tanto cargas verticales como horizontales.

Existen también otras posibles clasificaciones de acuerdo con su disposición constructiva, los materiales y elementos que los componen, sus espesores, entre otros.

Dentro de los principales elementos de un muro podemos mencionar (Fig. 2-19):

- *Junta*: líneas del mortero de unión que se aprecian en el paramento.
- *Tendel*: junta continua entre dos hiladas sucesivas, generalmente horizontales.
- *Llaga*: junta entre dos piezas sucesivas de una misma hilada, generalmente discontinuas entre hiladas y verticales.
- *Hilada*: conjunto de ladrillos de un mismo plano horizontal que se van asentando en un muro.
- *Zócalo o basamento*: parte inferior del muro que arranca de la cimentación y es, generalmente, de mayor anchura.
- *Paramento*: caras mayores del muro.
- *Trasdós*: cara exterior del muro.
- *Intradós*: cara interior del muro.

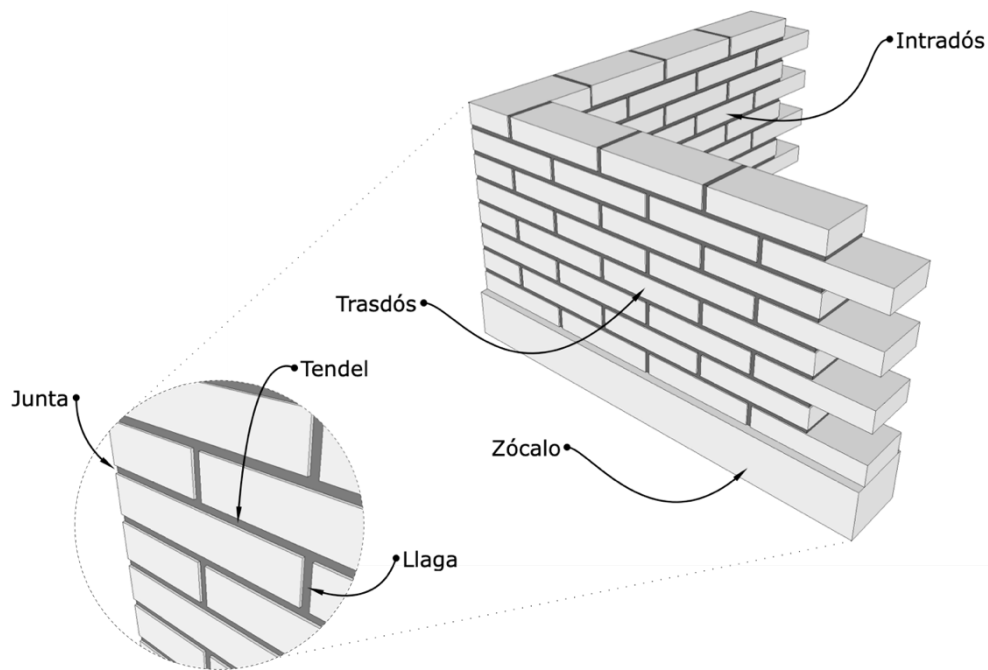


Fig. 2-19 Elementos básicos de un muro (fuente: preparado por el autor)

En cuanto a la resistencia de los muros, sus dos componentes principales: el ladrillo y el mortero, participan de forma conjunta con la finalidad de contrarrestar las distintas tensiones (*i.e.* compresión, tracción y cortante) originadas por las solicitaciones a las que se ven sometidos en las tres dimensiones. Adicionalmente, la resistencia de los muros también dependerá de otros factores como el espesor de las juntas, el tipo de aparejo utilizado, la calidad de la mano de obra, irregularidades en la superficie de los ladrillos, o la existencia y disposición de posibles perforaciones del ladrillo, entre otros.

2.3.2.9 Mortero

La argamasa (*i.e.* mortero) es un compuesto a base de agua, conglomerantes inorgánicos, agregados finos y, en ocasiones, algunos aditivos que permiten el aparejamiento de las piezas.

El desarrollo de la mampostería está estrechamente ligada al desarrollo de los morteros, ya que son éstos los que han permitido mantener cada pieza en su sitio. Se puede considerar que uno de los primeros materiales conglomerantes fue la misma materia prima del adobe, es decir, el barro o lodo utilizado para estabilizar las piezas.

Existen indicios de que los antiguos egipcios utilizaban morteros a base de cal, yeso y betún. Por su parte los griegos utilizaban cal aérea y los romanos una mezcla de piedra caliza quemada y pulverizada, arena, agua y ceniza volcánica.

Durante la Edad Media e inicios de la Edad Moderna se emplearon los denominados *morteros bastardos* a base de cal aérea, cuya calidad no fue particularmente notable.

Es hasta la segunda mitad del siglo XVIII que la cal aérea es sustituida por cales hidráulicas, aumentando con ello su calidad. Con el paso del tiempo comenzaron a introducirse los *morteros de cemento*, los cuales consisten en una mezcla de arena y agua con cemento, siendo su uso muy amplio.

En 1824 se inventa el *cemento Portland* que, al mezclarse con grava, áridos finos, agua y fibras de acero discontinuas, conforma una masa pétreo resistente y duradera que se conoce como hormigón o concreto reforzado.

Las propiedades físicas, químicas, mineralógicas y petrográficas de las materias primas utilizadas en la elaboración de los morteros permiten identificar el periodo histórico y las técnicas empleadas en la construcción de una estructura antigua.

2.3.3 Evolución y clasificación de tipologías constructivas

La expansión de la ciudad de Barcelona se llevó a cabo en diferentes etapas que pueden ser identificadas de acuerdo con el periodo de construcción de sus edificios de mampostería no reforzada. De acuerdo con lo anterior y con algunas características estructurales y arquitectónicas, Paricio *et al.* (1999) propusieron una clasificación y distribución de los edificios del distrito de L'Eixample. Adicionalmente, González-Drigo *et al.* (2015) complementan esta clasificación con características estructurales adicionales a fin de poder distinguir los cuatro periodos que se detallan a continuación:

- a) *Premodernismo (1860-1900)*. Hoy en día representa aproximadamente el 26% de los edificios del distrito. La fachada simétrica de seis niveles en altura se encuentra dividida en tres partes: *i*) la planta baja terminada con mampostería de piedra, *ii*) los niveles intermedios con estuco imitando piedra, y *iii*) el nivel superior, compuesto por un friso, una cornisa y una balaustrada. Los elementos principales del edificio son paredes de carga de piedra en planta baja y ladrillos cerámicos macizos de arcilla en niveles superiores, además de forjados unidireccionales resueltos con vigas de madera y cerrados con bovedillas de ladrillo de arcilla y pisos de madera.
- b) *Modernismo (1888-1915)*. Alrededor de un 7% de los edificios pertenecen a este periodo. La fachada simétrica muestra una ligera continuación a lo largo de su altura compuesta por seis niveles que incluyen una distribución regular de aperturas, con una discontinuidad en el nivel inferior. Los elementos ornamentales y cromáticos hechos con piedras artificiales, una tribuna típica en el segundo nivel, y el uso de elementos de hierro y hierro fundido, caracterizan este periodo. El hierro fundido es introducido como solución para las columnas de la planta baja con la finalidad de permitir espacios diáfanos orientados a usos comerciales. Las vigas de hierro substituyen a las de madera en los forjados unidireccionales. La construcción se basa en paredes de carga de mampostería de piedra en planta baja y de ladrillo cerámico macizo de arcilla en niveles superiores.
- c) *Posmodernismo (1910-1936)*. Aproximadamente el 29% de los edificios corresponden a este periodo. Edificios de siete niveles de altura aparecen en este periodo. La fachada se divide en tres partes: *i*) la planta baja, que incluye grandes aperturas y paredes de carga hechas con mampostería de piedra, *ii*) niveles intermedios con un patrón regular de aperturas que consistían en ventanas altas y balcones soportados por elementos de hierro y paredes hechas de mampostería de ladrillo macizo de arcilla, y *iii*) un nivel superior característico que consistía en una buhardilla con elementos ornamentales hechos de piedra artificial con cubierta de pizarra.
- d) *Periodo contemporáneo (1939-1988)*. Representa un 38% de los edificios. Este periodo se inició con cambios en las tecnologías y materiales constructivos. La fachada se divide en dos partes: *i*) una planta baja con grandes aperturas que duplican la altura de las de plantas superiores, y *ii*) un cuerpo grande que se encuentra a manera de viga en voladizo y que concentra el resto de las aperturas cuyo patrón es rectangular. Los arcos y todos los elementos ornamentales desaparecen. El hormigón reforzado substituye al hierro en los sistemas de forjado y en las columnas de la planta baja. Un aspecto notable de las ordenanzas constructivas de este periodo es la posibilidad de añadir niveles por encima de los siete niveles iniciales que se tenían en las edificaciones, los cuales estaban ligeramente retraídos con respecto a la fachada original.



Fig. 2-20 Clasificación del parque de viviendas del distrito de L'Eixample de Barcelona de acuerdo a su periodo de construcción: a) premodernismo, b) modernismo, c) posmodernismo, y d) contemporáneo (fuente: preparado por el autor basado en las ilustraciones provistas en Paricio *et al.* (1999))

2.3.4 Los edificios en estudio

2.3.4.1 Generalidades del sistema estructural resistente

El sistema estructural resistente de los edificios analizados en este trabajo (*i.e.* edificios de mampostería no reforzada con forjados unidireccionales resueltos a base de vigas metálicas construidos entre 1890-1940), se diferencia según la planta o nivel, teniendo así: **1)** plantas bajas diáfanas resueltas mediante muros de carga con espesores grandes, columnas de mampostería o hierro y vigas de acero, y **2)** niveles superiores donde las cargas son soportadas únicamente por muros de carga de espesores menores a aquellos usados en niveles inferiores (González-Drigo *et al.*, 2015).

Existen diferencias, tanto de espesor como de importancia estructural, entre los diferentes muros que podemos encontrar en las plantas de la estructura. Según su ubicación y tipo podemos encontrar diversos valores que son característicos para cada tipo de elemento (Paricio, 2001):

- Paredes laterales intermedias (*i.e.* paredes medianeras), con espesores de 30 cm en planta baja y 15 cm en plantas superiores.
- Fachadas frontal y trasera con espesores de 45 a 60 cm en plantas bajas y 30 cm en niveles superiores.
- Cajón de escalera y núcleo central de la estructura con espesores de 30 cm en planta baja y 15 a 30 cm en plantas superiores.
- Paredes de carga internas, con espesores de 10 a 15 cm.
- Paredes internas divisorias con espesores de 10 cm o menos.

Los espesores típicos, para estructuras similares a las estudiadas en este trabajo, quedan resumidos en la Tabla 2-18.

Tabla 2-18 Espesores típicos de paredes según su tipo y localización (fuente: elaborado por el autor)

Tipo de muro	Planta						
	1	2	3	4	5	6	7
Medianero	30	15	15	15	15	15	15
Fachada frontal	45	30	30	30	30	30	30
Fachada trasera	45	30	30	30	30	30	30
Núcleo central y de escalera	30	15	15	15	15	15	15
De carga (internos)	–	15	15	15	15	15	15
Divisorios (internos)	–	5	5	5	5	5	5

De acuerdo con el espesor de los muros podemos encontrar distintos tipos de piezas y aparejos, según sea el caso. La calidad de los ladrillos y del mortero también varía dependiendo la ubicación del elemento y de la carga a soportar, utilizándose ladrillos de menores prestaciones y mortero de cal en elementos que soportan rangos inferiores de carga, mientras que para elementos sujetos a cargas superiores y pilares esbeltos se emplean ladrillos de alta resistencia con morteros de cemento Portland (Benavent, 1981).

Lo anterior deriva de los procesos de fabricación artesanal de las piezas de aquel entonces, en donde la calidad de aquellas era muy heterogénea y estaba estrechamente ligada al proceso de cocción utilizado y la ubicación de los ladrillos dentro de los hornos utilizados para su elaboración.

2.3.4.2 Cimientos

Inicialmente las cimentaciones fueron fabricadas únicamente de fábrica de ladrillo, incorporando posteriormente el uso del mortero de cal y el hormigón.

Existen diversos tipos de cimentaciones dependiendo del tipo de elemento, su ubicación y funcionalidad. Por ejemplo, para el caso de los pilares de fundición comúnmente encontrados en primeras plantas, se empleaban cimentaciones aisladas en forma de cubo sobre las cuales el elemento estructural descansaba. Por otro lado, la cimentación de muros dependía directamente del tipo de muro en cuestión, identificando principalmente tres:

- *Paredes medianeras*: la construcción de dichas paredes, así como de su cimentación se realizaba en forma conjunta a pesar de que las edificaciones laterales fueran construidas posteriormente. El espesor de los muros aumenta conforme se accede a niveles inferiores, identificando muros de 30 cm en plantas bajas y de hasta 60 cm en sótanos.
- *Fachadas*: normalmente se empleaban muros rectos que se extendían hasta terreno firme, de lo contrario podían presentar una pequeña cimentación o presentar escalonamiento por la parte exterior.
- *Muros internos*: para este tipo de paredes se emplea una cimentación continua con espesores que varían desde los 40 hasta los 60 cm.

Adicionalmente, existían también cimentaciones con funciones de contención del terreno por medio de muros escalonados, así como otras que, por medio del uso de arcos pozos con viga de coronación, permitían alcanzar el terreno firme cuando este tenía profundidades superiores a los 2,50 m.

2.3.4.3 Paredes

Podemos identificar, fácilmente, tres principales tipos de paredes o muros: fachadas, interiores y medianeras, cada una de las cuales presenta distintas características.

Dentro de las fachadas podemos identificar la fachada frontal y la fachada trasera, las cuales suelen tener espesores superiores al resto de muros. Así mismo, la fachada frontal suele presentar elementos ornamentales a diferencia de la fachada trasera. Por otro lado, las fachadas suelen presentar aperturas de mayores dimensiones que el resto de los muros de la estructura, principalmente en plantas bajas.

Las paredes internas permiten identificar dos grupos: aquellas que tienen una función de carga (espesores $>10\text{cm}$), y aquellas que tienen una función divisoria (espesores $\leq 10\text{ cm}$). Estas aperturas suelen estar resueltas por medio de dinteles que pueden ser de madera, metálicos o de hormigón, dependiendo de la época constructiva.

Finalmente, las paredes medianeras, son aquellas que son comunes a los edificios aledaños. Su función estructural es importante y sus espesores varían en función de la planta, teniendo espesores superiores en plantas bajas. Suelen presentar longitudes importantes, cuya esbeltez suele ser resuelta por medio de una especie de nervado con columnas a cada 5 o 6 metros, que a su vez permiten a las edificaciones que se construyen posteriormente aprovechar para ensanchar el muro común y con ello lograr el efecto de agregado estructural.

2.3.4.4 Patios internos o de luces

Con la finalidad de permitir una mejor iluminación y tener una mayor ventilación, se pueden observar diversos patios internos, también denominados de luces, distribuidos en la planta de las distintas configuraciones estructurales de los edificios. Incluso, es común ver áreas que coinciden con las de otros edificios, permitiendo con ello una mayor extensión de los patios y, por ende, del paso de la luz (Fig. 2-21).

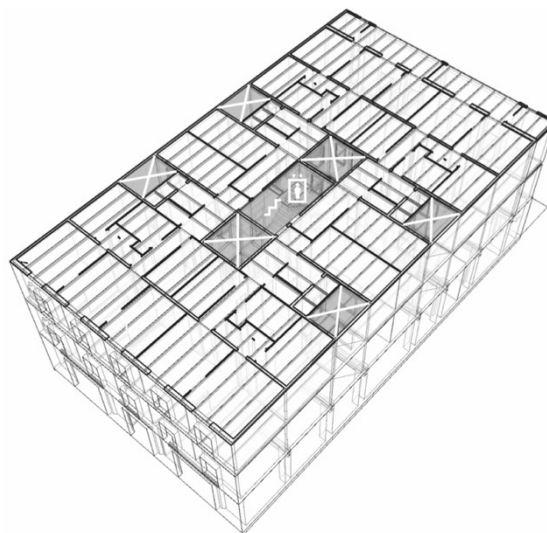


Fig. 2-21 Patios de luces internos distribuidos en planta (fuente: preparado por el autor)

2.3.4.5 Cajón de escalera y núcleo central

A raíz del incremento poblacional, ocurrido desde la segunda mitad del siglo XVIII en Barcelona, las casas unifamiliares de una o dos plantas se ven sustituidas por edificios en altura, siendo uno de sus elementos más característicos la caja de escalera que permitía el acceso a los pisos superiores.

La escalera estará apoyada en una caja perimetral de ladrillo y estará construida con bóveda tabicada de ladrillo cerámico plano, la cual es conocida también como *bóveda catalana*, cuyo principal impulsor, en este período, fue el arquitecto Rafael Guastavino.

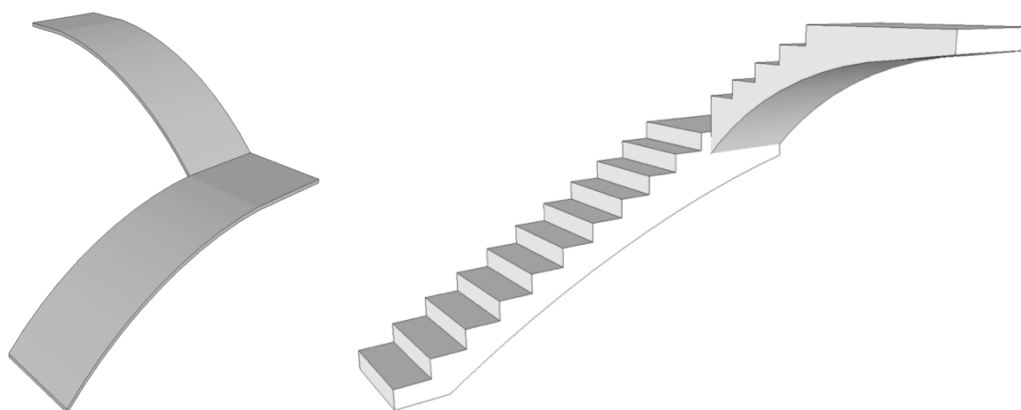


Fig. 2-22 Ejemplo del uso de la bóveda catalana en escaleras (fuente: elaborado por el autor)

La técnica se basa en la construcción de bóvedas rebajadas mediante el uso de piezas cerámicas planas. La primera capa de estas piezas se une con yeso, el cual permite un fraguado rápido, eliminando la necesidad de utilizar cimbras y permitiendo cubrir luces grandes de ser necesario. Las capas posteriores se construyen, sucesivamente, uniéndolas mediante mortero, el cual proporciona la resistencia necesaria al conjunto (Fig. 2-22).

Su facilidad y rapidez de construcción, el bajo coste de sus materiales y la poca mano de obra requerida, permitieron que fuese ampliamente utilizada hasta la primera mitad del siglo XX, cuando fue sustituida por otras técnicas y materiales constructivos como el hormigón o el acero.

En ocasiones, este cajón de escalera se extiende mediante la anexión de un patio de luces aldaño, que permite el paso de la luz y ventilación, y que en otras ocasiones también alberga la estructura del ascensor.

2.3.4.6 Aperturas

Se pueden observar diversos tipos de aperturas, cuyas dimensiones y sistema de redistribución de carga dependen directamente de la ubicación que ocupan dentro de la estructura misma.

Las aperturas con mayores dimensiones se suelen observar en las fachadas principales de plantas bajas o en patios de luces internos. Los primeros se deben al uso de estas zonas para actividades de restauración y comercio, necesitándose así áreas diáfanas con grandes luces y alturas. Conforme se sube en altura, estas aperturas en fachada suelen reducirse.

Es común observar el uso de cargaderos o dinteles para redistribuir las cargas hacia los costados de dichas aperturas. El caso de aperturas grandes, estos elementos suelen ser perfiles metálicos IPN que se colocan en la parte superior de la apertura, teniendo unas longitudes de apoyo que dependen del elemento en cuestión pero que no suelen superar los 20 cm. Así mismo, el número de elementos a utilizar

sobre una misma apertura dependerá de la luz que deba cubrirse y del espesor del muro, siendo algo común encontrar un elemento por cada 15 cm de espesor.

Para aperturas de menores dimensiones, ubicadas en muros internos de la estructura también suelen encontrarse arcos de descarga o dinteles de madera según la época constructiva.

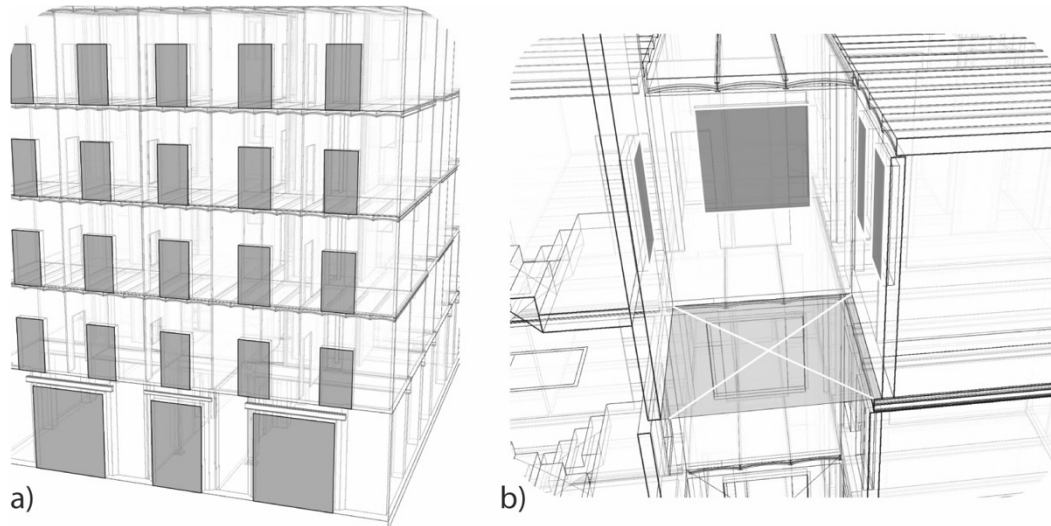


Fig. 2-23 Aperturas en a) fachada frontal, y b) patio interno (fuente: preparado por el autor)

2.3.4.7 Forjados

De acuerdo con su ubicación dentro de la estructura se pueden identificar dos tipologías principalmente: **1)** los forjados de bóvedas de sótano y planta baja, resueltos por medio de bóvedas de tres gruesos y una estructura vertical de fundición o hierro según la época constructiva, y **2)** los forjados de plantas tipo y áticos.

En el periodo comprendido entre 1890 y 1940, los forjados unidireccionales con viguetas metálicas y bovedillas cerámicas resolvían la mayor parte de los sistemas de piso (Fig. 2-24). Las principales diferencias del material de viguetas del forjado, respecto de periodos constructivos anteriores y posteriores, consisten en el empleo de madera y hormigón, respectivamente.

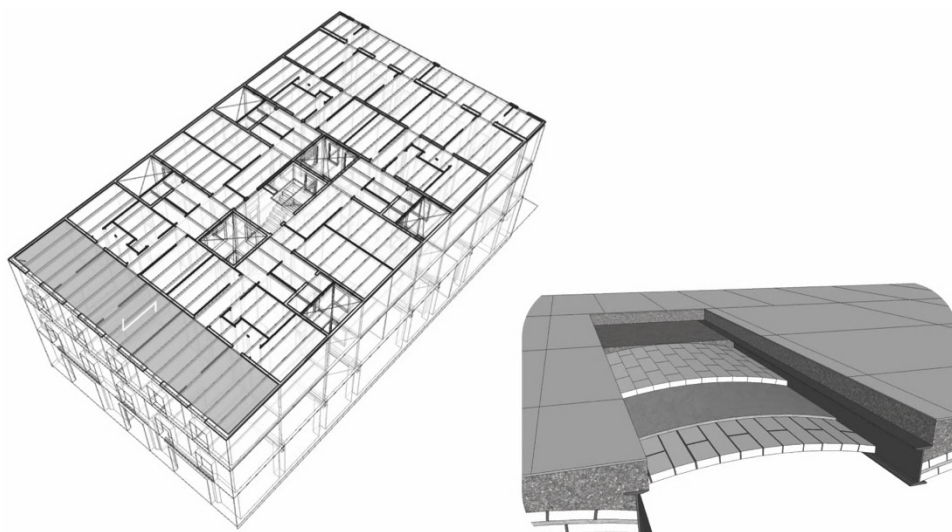


Fig. 2-24 Sistema de forjado unidireccional a base de viguetas metálicas y bovedillas cerámicas (fuente: elaborado por el autor)

Dependiendo de su localización dentro de la estructura, los forjados se apoyaban de forma simple sobre las vigas principales o los muros de carga, presentando apenas suficiente conexión con estos elementos. La longitud de soporte dependía directamente del espesor del elemento que recibiera dichos forjados, siendo normalmente de unos 15 cm para las paredes medianeras laterales, 30 cm para las fachadas en niveles inferiores, y 10 a 15 cm para fachadas en niveles superiores.

Para nuestro caso de estudio, las viguetas metálicas de perfil IPN se encuentran separadas entre 70 y 80 cm, mientras que las bovedillas cerámicas colocadas entre ellas son de espesores muy pequeños de entre 15 y 20 cm (*i.e.* doblado de rasilla), rellenas posteriormente por una capa de compresión a base de cascotes, yeso y otros materiales. Esta última capa es nivelada y cubierta posteriormente con pavimento cerámico (Fig. 2-25). Las viguetas que componen al forjado suelen estar en paralelo con la dirección más corta del área a ser cubierta.

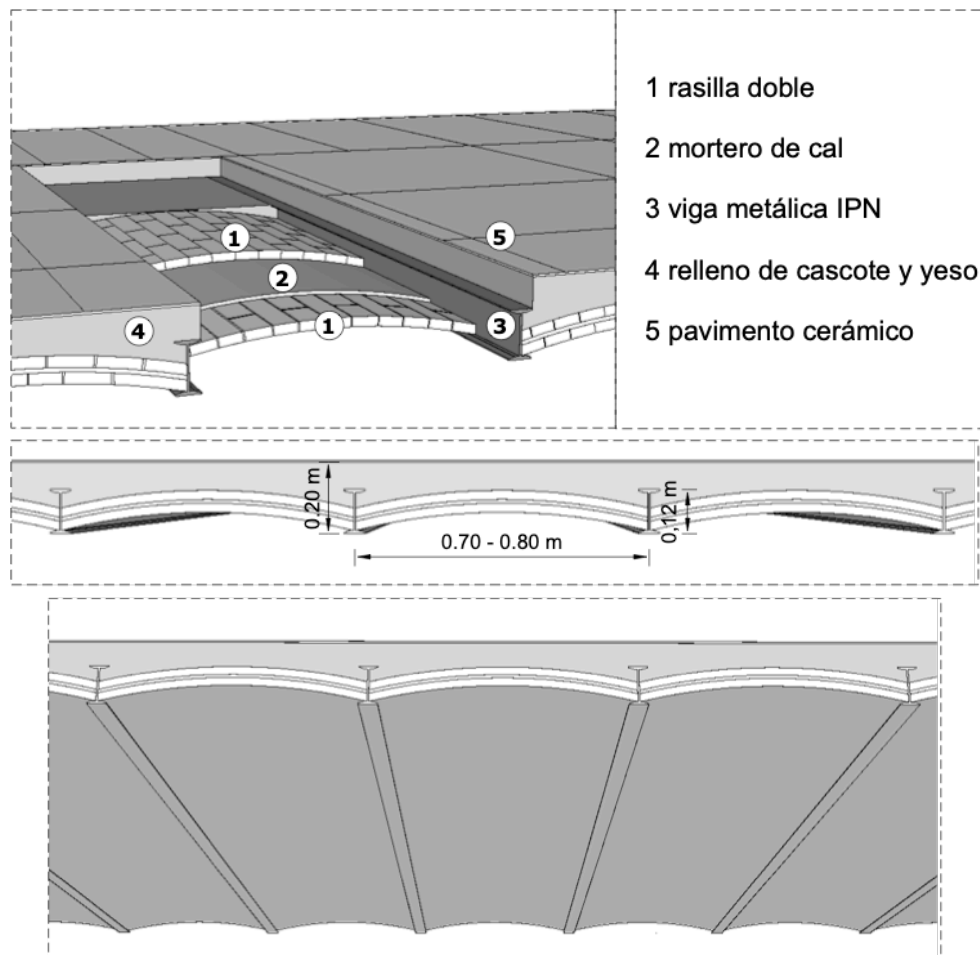


Fig. 2-25 Vista isométrica, frontal e inferior de los forjados unidireccionales de vigueta metálica y bovedilla cerámica, elementos que los componen y dimensiones comunes (fuente: elaborado por el autor)

En el caso de las cubiertas y tejados, a finales del siglo XIX se emplea un sistema de doble techo compuesto también bovedillas cerámicas y viguetas metálicas para el primero, y vigas de madera y múltiples capas de rasilla para el superior. A inicios del siglo XX la madera se sustituye por elementos metálicos y tabiquillos conejeros para las pendientes.

2.3.4.8 Otros elementos

Con la finalidad de conseguir espacios diáfanos y alturas mayores que permiten el uso de las plantas bajas para finalidades de restauración y comercio, los muros de carga son resueltos mediante el uso de otros elementos estructurales tales como *pilares* de fundición, *perfiles laminados*, *celosías* o *jácenas* que permiten salvar grandes luces (Fig. 2-26).

Sus dimensiones dependerán tanto de su ubicación en la planta, la luz a cubrir, la carga a soportar (*i.e.* número de plantas superiores), entre otros aspectos. Se encuentran distribuidos de forma simétrica en las distintas áreas de las plantas bajas y coinciden en posición con muros de carga ubicados en plantas superiores.

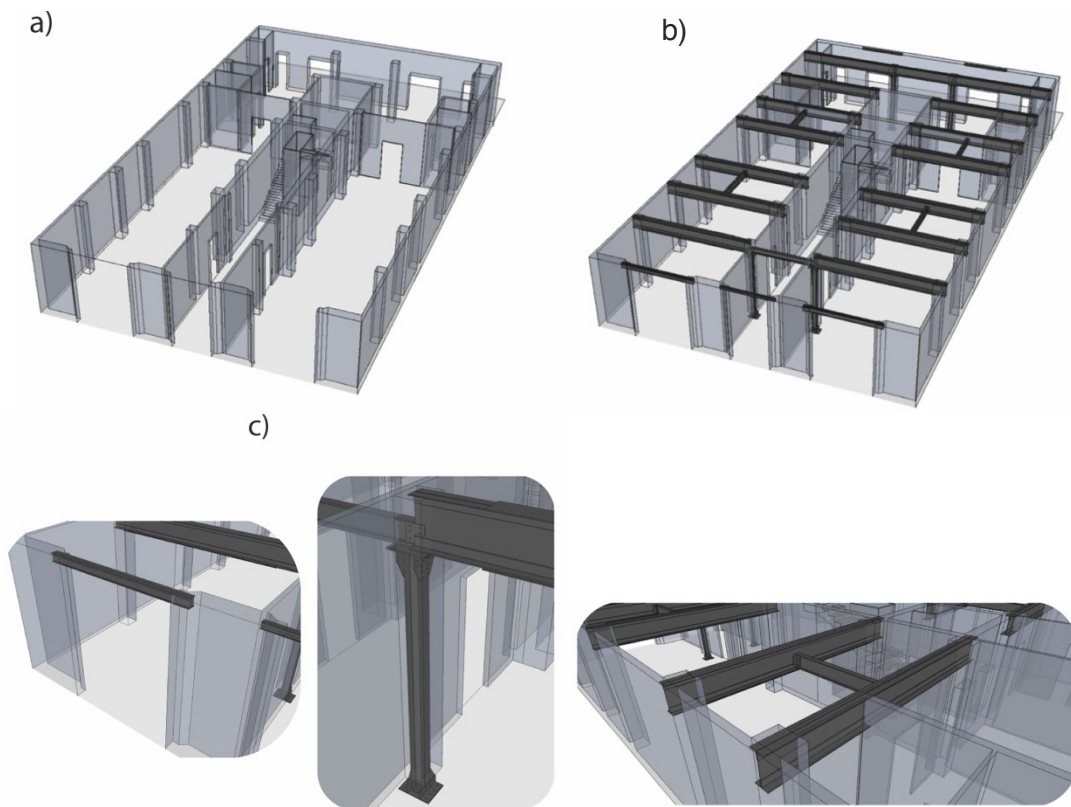


Fig. 2-26 a) Espacio diáfano para uso comercial o de restauración en planta baja; b) uso de jácenas y pilares en sustitución de muros de carga; y c) detalle de dinteles, pilares y jácenas empleados en planta baja (fuente: elaborado por el autor)

2.3.4.9 Cargas

De acuerdo con lo expuesto en las ordenanzas contemporáneas a la época constructiva de interés, así como a los primeros códigos y lineamientos que comenzaron a aparecer en los años 1960's, y diversas fuentes bibliográficas (Bassegoda Piniés, 1920; Schindler & Bassegoda, 1955; Lahuerta & Rodríguez, 1962; Ministerio de la Vivienda, 1963, 1988) se determina una carga permanente de 350 kg/m^2 para todos los niveles, la cual está conformada por 200 kg/m^2 correspondientes al peso del sistema de piso, 100 kg/m^2 correspondientes a la carga proveniente de paredes de partición, y 50 kg/m^2 correspondientes al peso del pavimento hidráulico utilizado. Por el otro lado, una carga variable de 200 kg/m^2 se asigna a los niveles intermedios, mientras que el último nivel tiene una carga inferior de 100 kg/m^2 (González-Drigo *et al.*, 2015).

2.3.4.10 Los ladrillos y los morteros

Dado el período de interés de los edificios objeto de este trabajo, la fabricación de los ladrillos corresponde a la época pre-industrial, lo cual está asociado a la existencia de una gran heterogeneidad en las piezas (*i.e.* propiedades mecánicas) y diversas calidades, las cuales están asociadas directamente con el proceso de cochura de estas dentro de los hornos artesanales (Schindler & Bassegoda, 1955; Benavent, 1981). El color de las piezas era un indicador directo de la resistencia y calidad de las mismas, variando desde tonalidades rojizas para los ladrillos de resistencia inferior (alrededor de 7 MPa) hasta tonalidades ocre para aquellos de resistencia superior (alrededor de 15 MPa).

Los morteros utilizados en estas estructuras dependían directamente del elemento estructural, teniendo así morteros bastardos, morteros naturales (*i.e.* romanos) y morteros de cemento Portland. El uso de unos u otros ladrillos también estaba asociado con sus dimensiones, teniendo así ladrillos ordinarios de 29 x 14 x 5,5 cm para las paredes de carga, ladrillos de 29 x 14 x 4,5 cm para las paredes divisorias, y ladrillos de 29 x 14 x 3 cm y 29 x 14 x 2 cm para la construcción de bovedillas.

Los edificios estudiados en este trabajo están fabricados con ladrillos cerámicos macizos de arcilla, con buena adherencia y textura. A pesar de la falta de reportes técnicos adicionales o pruebas mecánicas específicas que pudieran acotar de mejor manera las características de estas estructuras, sus propiedades mecánicas (Tabla 2-19) fueron obtenidas mediante la extrapolación de documentos contemporáneos y estudios existentes, tomando también en cuenta la opinión experta de arquitectos e ingenieros civiles. El capítulo siguiente presenta información detallada acerca de estas propiedades.

Tabla 2-19 Propiedades mecánicas materiales de los ladrillos (fuente: preparado por el autor)

Parámetro	Límite inferior	Valor medio	Límite superior	Unidades
Peso específico, γ	—	18	—	kN/m ³
Esfuerzo a compresión, f_m	215	300	385	N/cm ²
Módulo elástico, E	107500	150000	192500	N/cm ²
Módulo de cortante, G	35833	50000	64167	N/cm ²
Esfuerzo cortante, τ	6,45	9,00	11,55	N/cm ²

2.3.5 Edificios aislados

Como resultado de diversas y continuas visitas al Archivo Histórico del Colegio de Arquitectos de Cataluña (COAC) encabezadas por el *Dr. José Ramón González Drigo* y el autor de este documento, se logró la recopilación de información de diversos edificios de mampostería no reforzada característicos del período de estudio de este trabajo (*i.e.* 1890-1940), permitiendo, con ello, replicar los planos y características principales, necesarios para su posterior modelado 3D y análisis por medio del programa de cálculo estructural Tremuri (Galasco *et al.*, 2002). Adicionalmente, visitas in situ a los edificios de interés existentes y otros de similares características, permitieron corroborar, de primera mano y entre otras cosas, sus dimensiones, la ubicación de diversos elementos estructurales, la existencia de aperturas, número de niveles, estado de las edificaciones, modificaciones posteriores y otros detalles.

A continuación, se presentan los cuatro edificios considerados para este trabajo: tres edificios de tipo central y un edificio de esquina (*i.e.* chaflán). La elección de los mismos obedece a la alta representatividad que tienen de la tipología constructiva predominante en el distrito de L'Eixample y al grado de detalle encontrado en sus planos, lo cual permitió un modelado 3D completo. Cabe mencionar que todos los edificios analizados mantienen, actualmente, su función como viviendas.

La información presentada consiste en diversas vistas a partir de modelos 3D generados para algunos de los edificios o secciones de los mismos, los planos obtenidos a partir de las visitas al COAC, los modelos 3D creados en Tremuri y algunas tablas resumen de sus principales características.

2.3.5.1 ED-01

Vistas varias

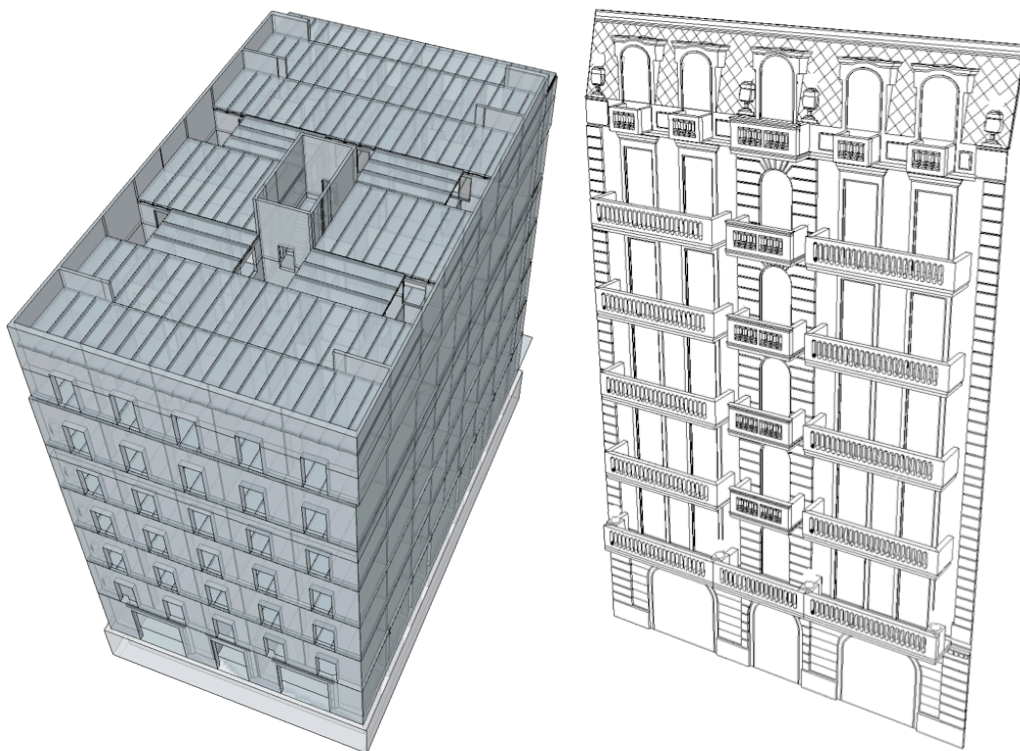


Fig. 2-27 Vista en altura del edificio ED-01. Izquierda: edificio completo. Derecha: detalle de la fachada frontal (fuente: elaborado por el autor)

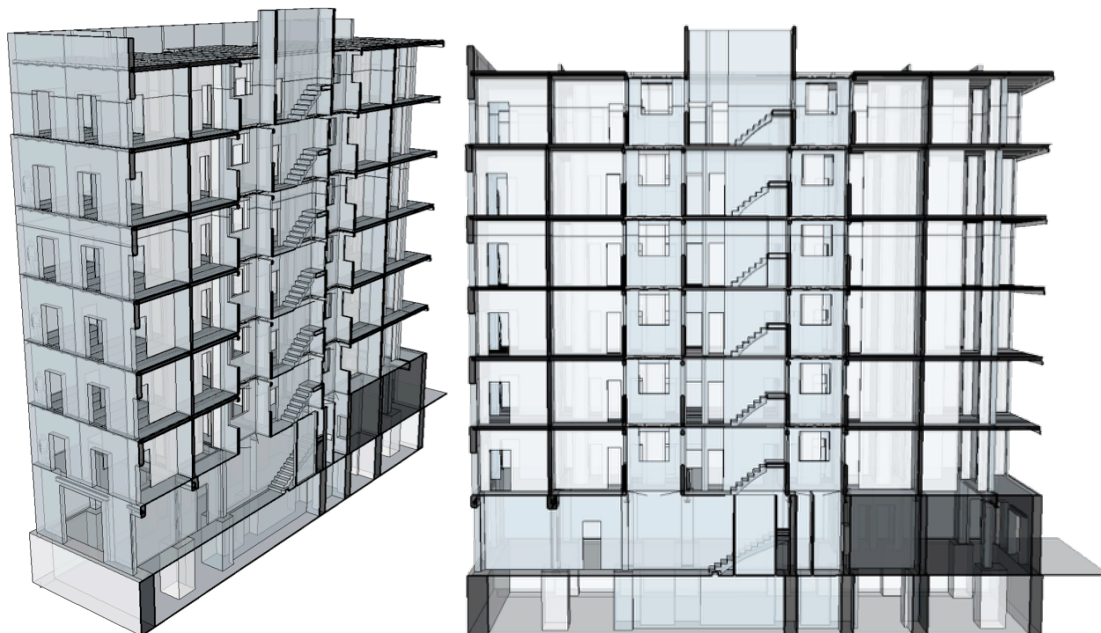


Fig. 2-28 Vista en altura de corte en dirección perpendicular a fachada principal del edificio ED-01. Izquierda: isométrica. Derecha: frontal (fuente: elaborado por el autor)

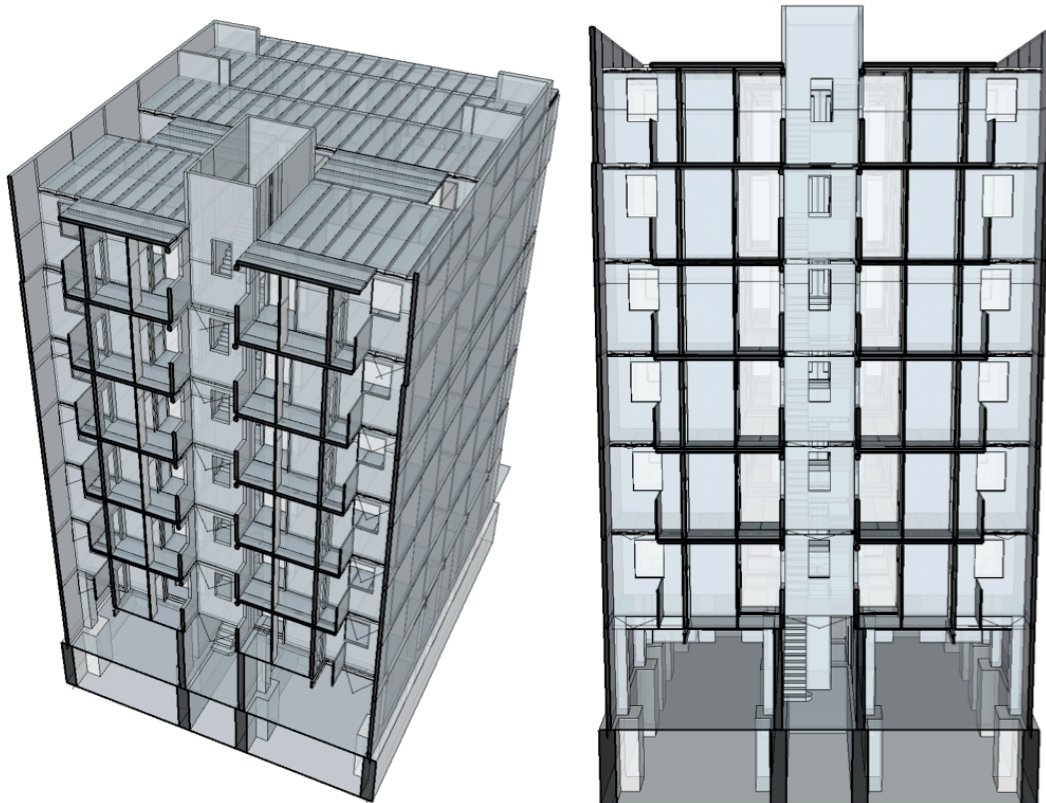


Fig. 2-29 Vista en altura de corte en dirección paralela a fachada principal del edificio ED-01. Izquierda: isométrica. Derecha: frontal (fuente: elaborado por el autor)

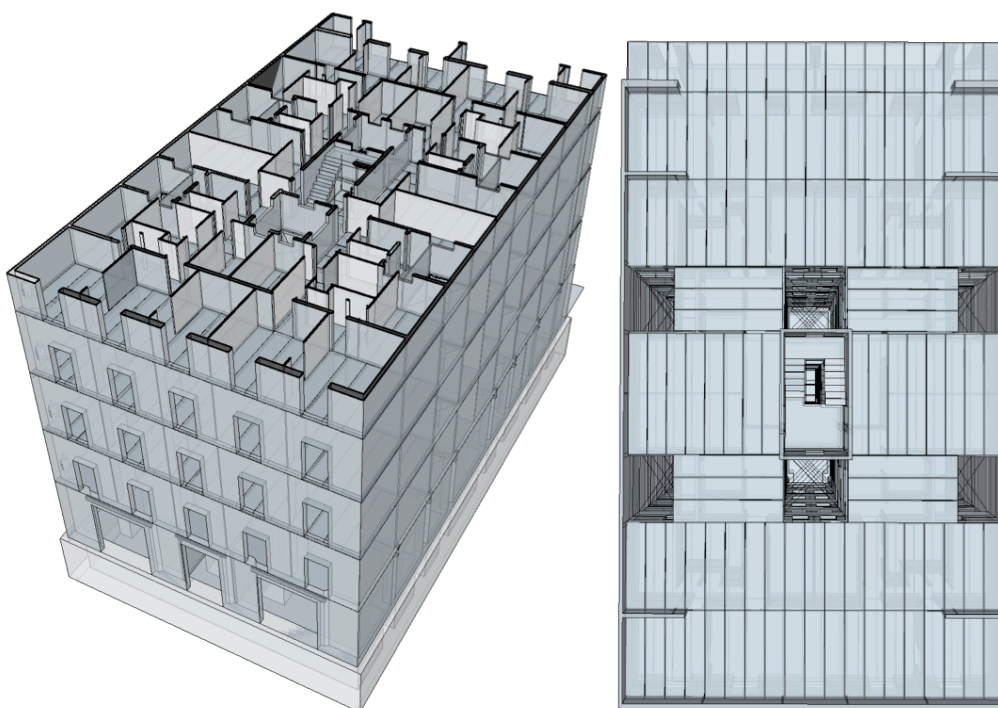


Fig. 2-30 Distribución en planta tipo del edificio ED-01. Izquierda: isométrico. Derecha: vista en planta y dirección de forjados (fuente: elaborado por el autor)

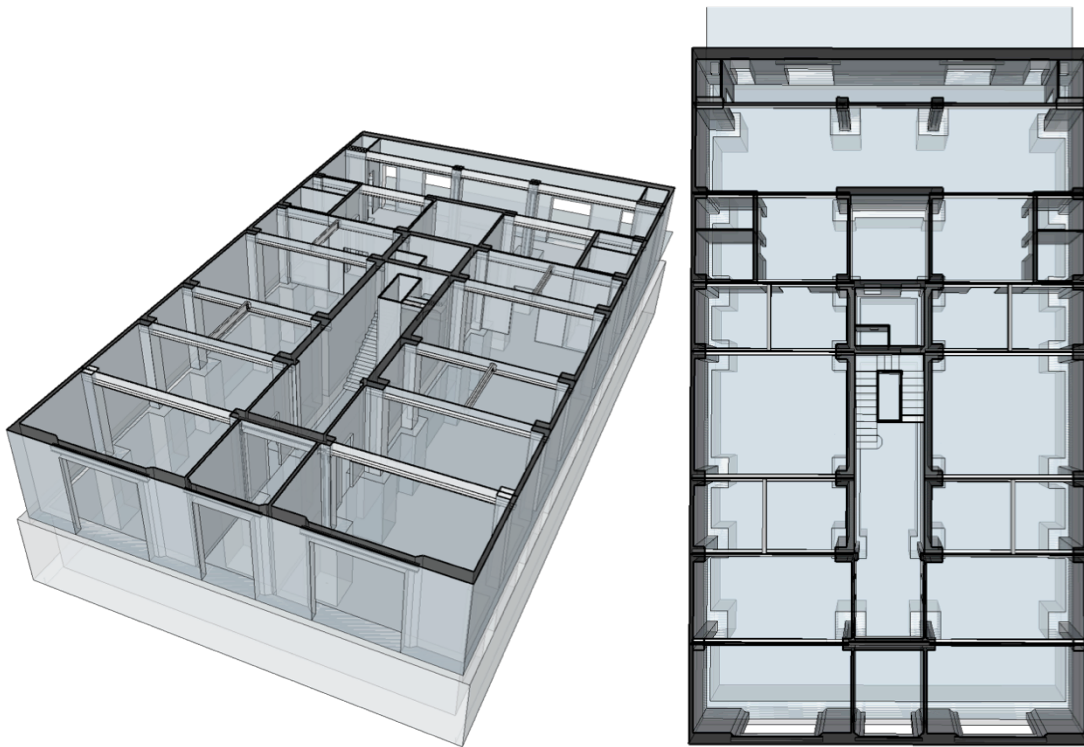
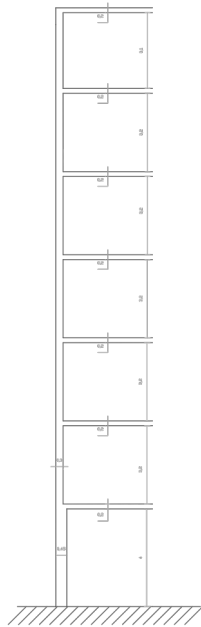


Fig. 2-31 Distribución en planta baja del edificio ED-01. Izquierda: isométrico. Derecha: vista en planta (fuente: elaborado por el autor)

Planos y datos generales



Parámetro	Valor	Unidades
Edificio	ED-01	—
Número de plantas	7	—
Altura total	24,5	m
Altura planta baja	4,00	m
Altura plantas tipo	3,20	m
Altura planta última	3,10	m
Espesor de forjados	0,20	m
Ancho en planta	16	m
Profundidad en planta	27,85	m
Fachada frontal planta baja (espesor)	0,45	m
Fachada frontal plantas tipo (espesor)	0,30	m

Fig. 2-32 Vista elevada del edificio ED-01 (fuente: elaborado por el autor a partir de planos del Archivo Histórico del Colegio de Arquitectos de Cataluña)

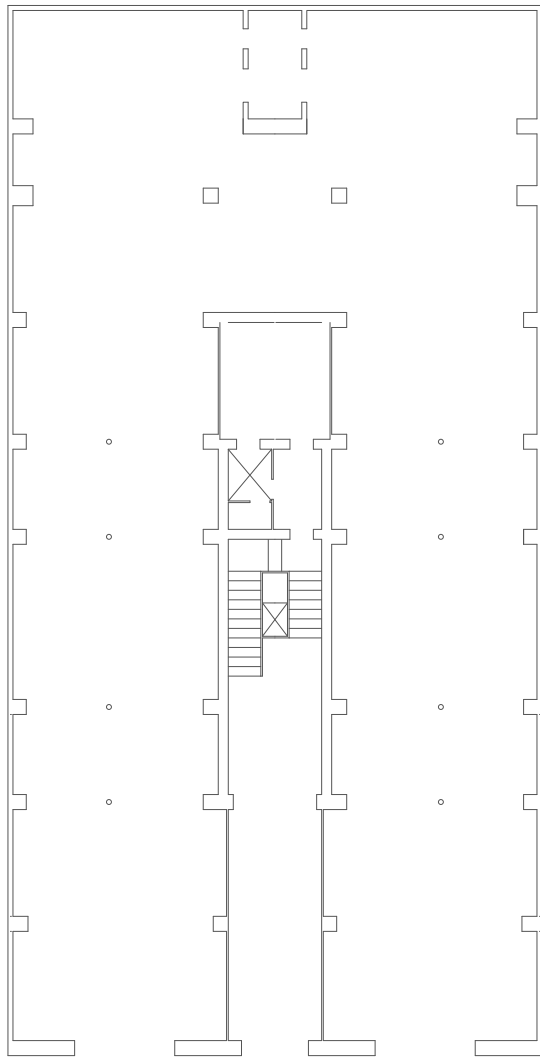


Fig. 2-33 Vista en planta de PLANTA BAJA del edificio ED-01 (fuente: elaborado por el autor)

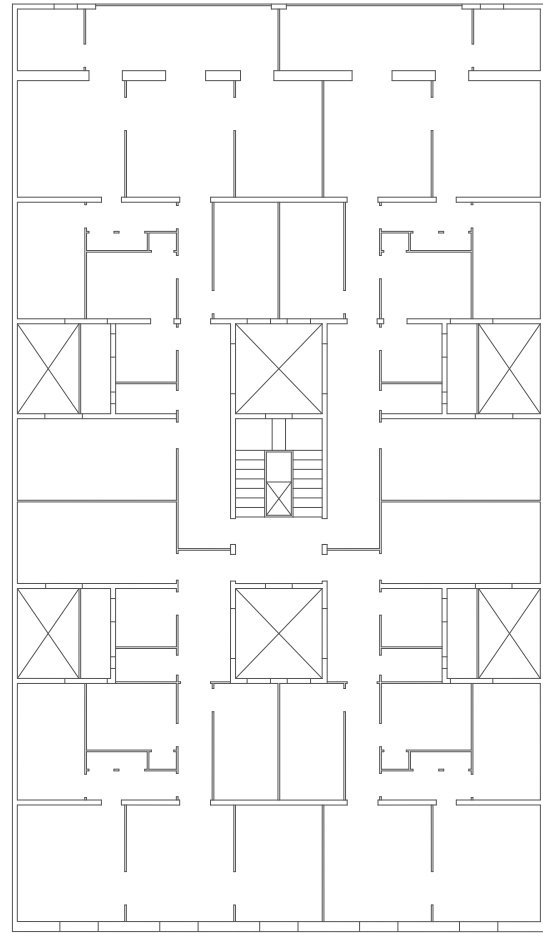


Fig. 2-34 Vista en planta de plantas tipo del edificio ED-01 (fuente: elaborado por el autor)

Modelo 3muri

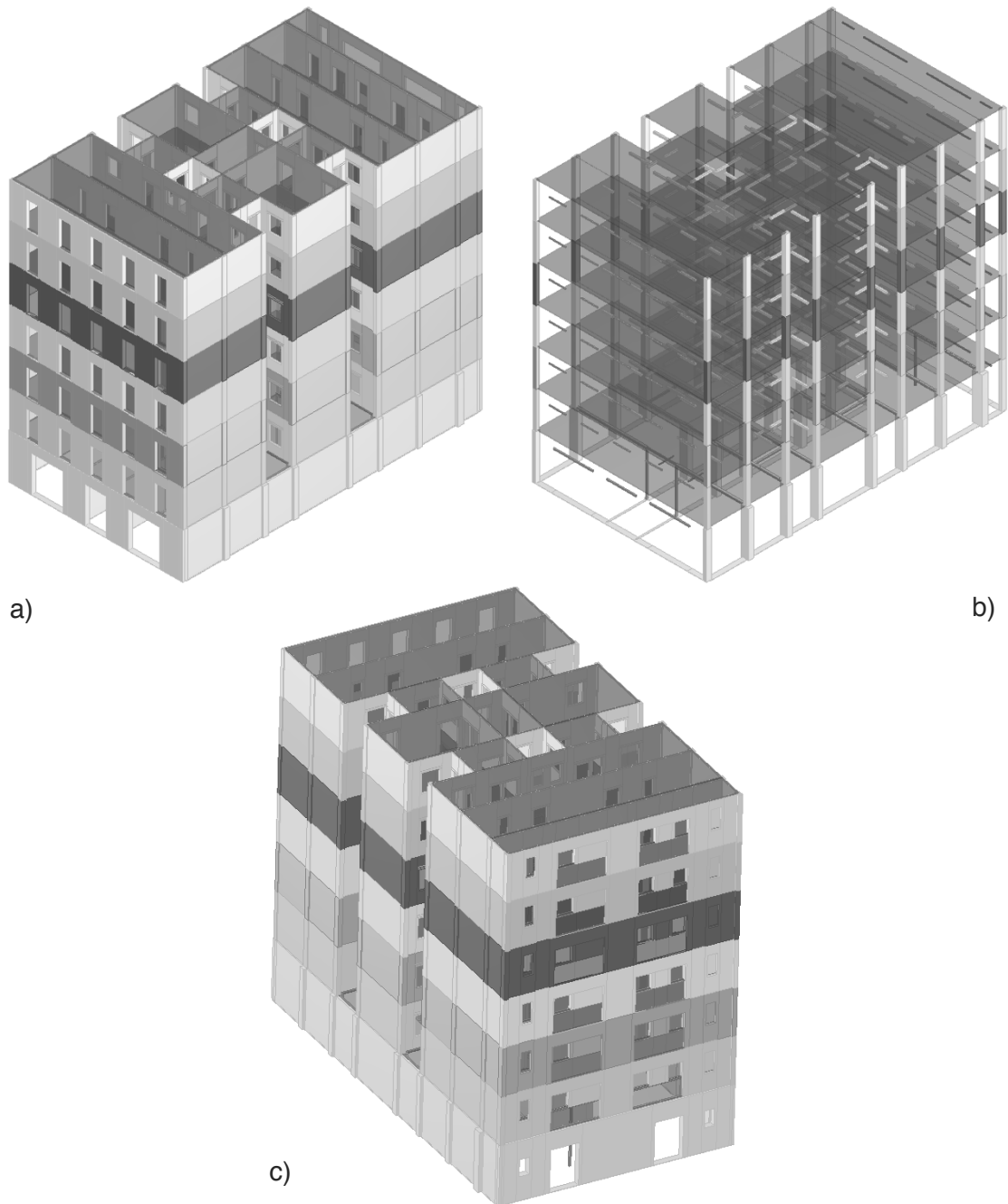


Fig. 2-35 Modelo Tremuri edificio ED-01 completo. a) Vista isométrica fachada principal. b) Vista isométrica fachada principal sin muros. c) Vista isométrica fachada trasera

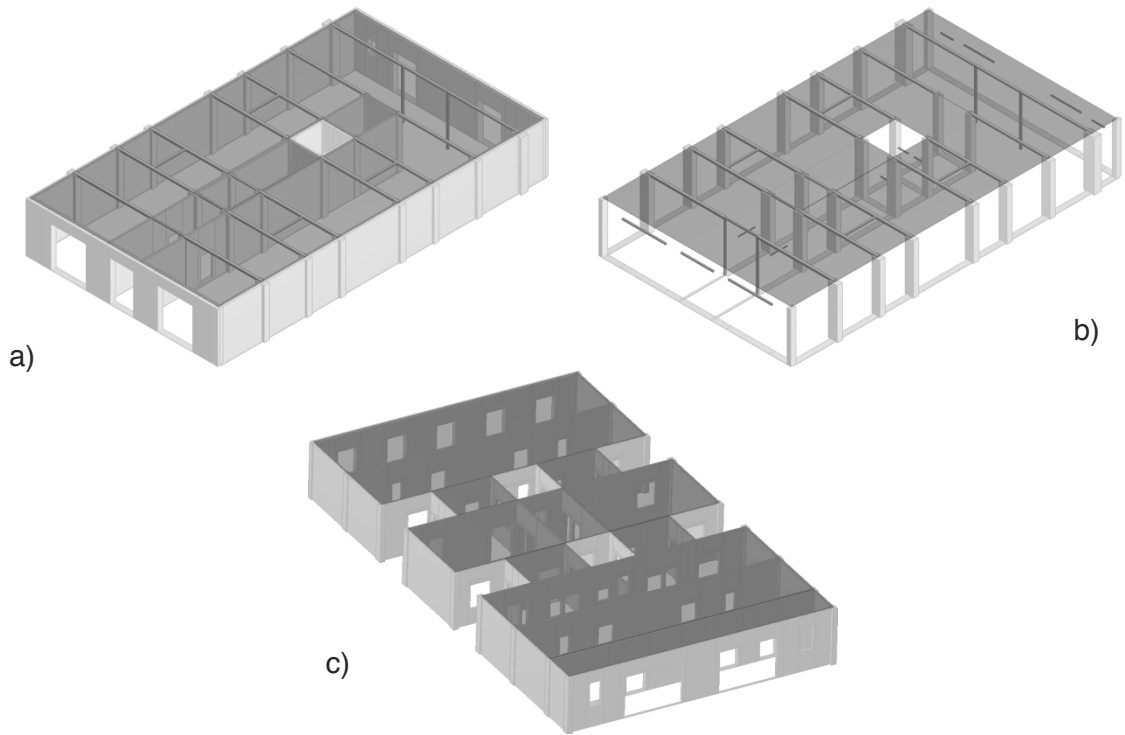


Fig. 2-36 Modelo Tremuri edificio ED-01 planta baja. a) Vista isométrica fachada principal. b) Vista isométrica fachada principal sin muros. c) Vista isométrica fachada trasera

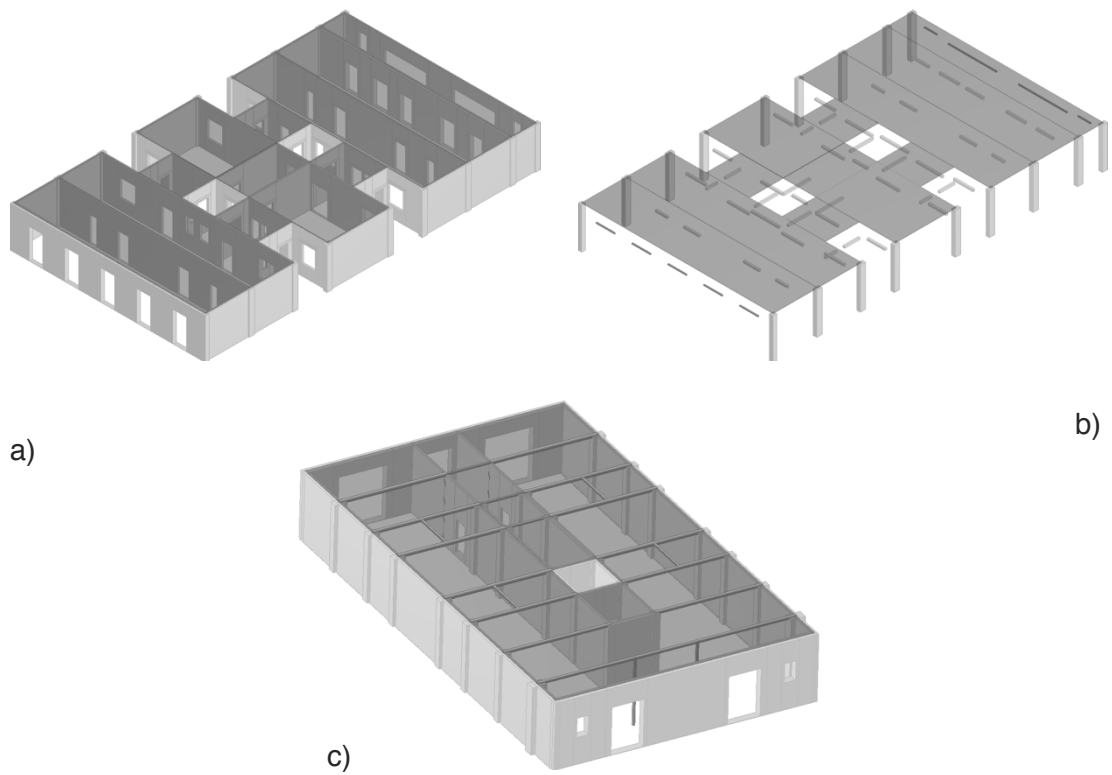


Fig. 2-37 Modelo Tremuri edificio ED-01 planta tipo. a) Vista isométrica fachada principal. b) Vista isométrica fachada principal sin muros. c) Vista isométrica fachada trasera

2.3.5.2 ED-02

Vistas varias

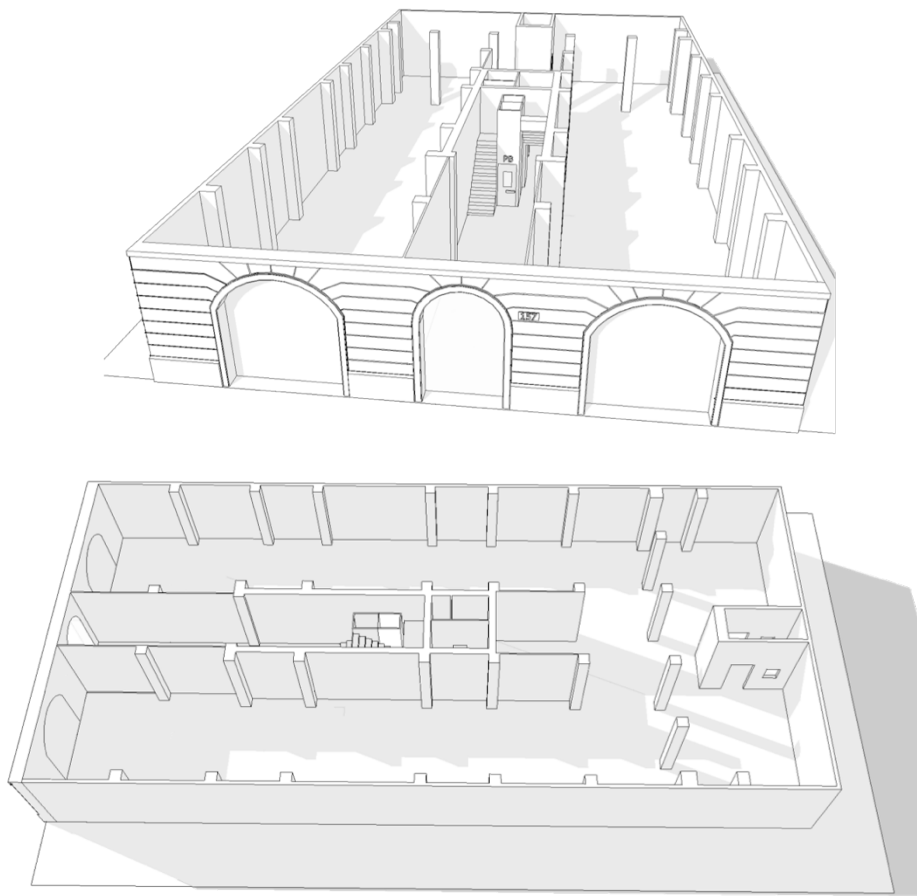


Fig. 2-38 Planta baja del edificio ED-02. Arriba: isométrico frontal sin perfiles metálicos (jácenas). Abajo: isométrico lateral sin perfiles metálicos (jácenas) (fuente: elaborado por el autor)

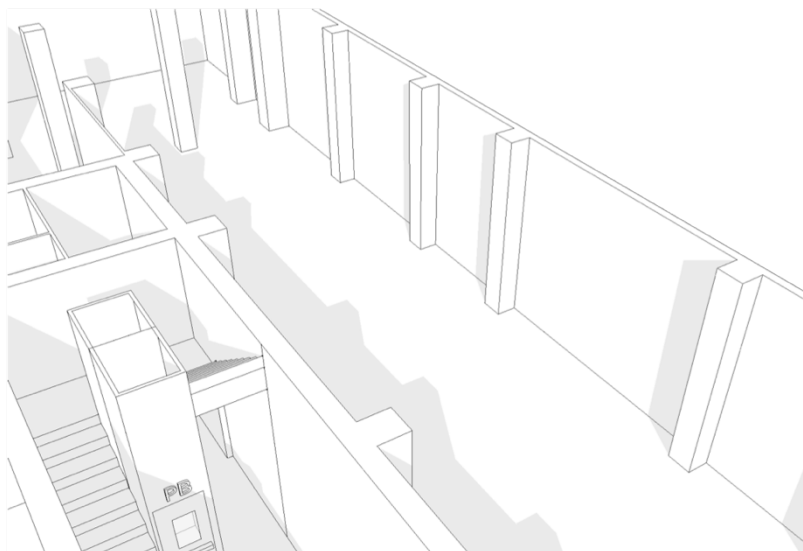


Fig. 2-39 Planta baja del edificio ED-02. Nervado de columnas para arriostamiento de muros (fuente: elaborado por el autor)

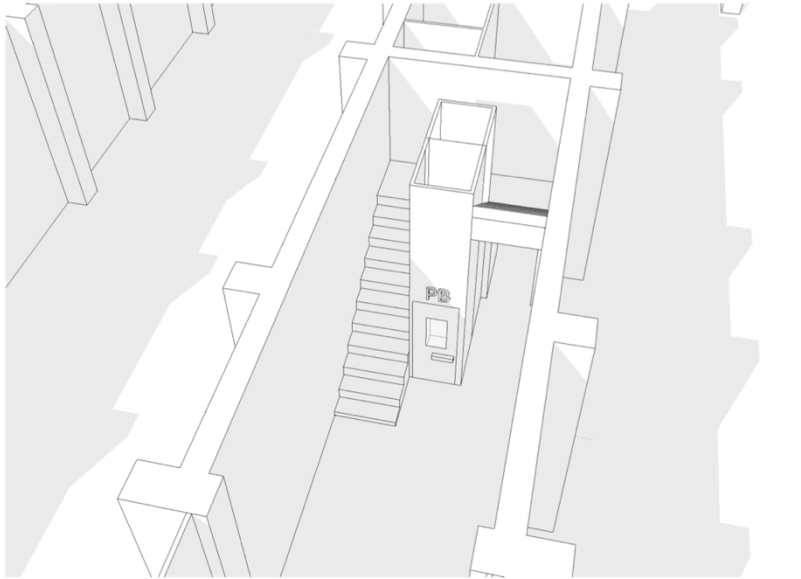
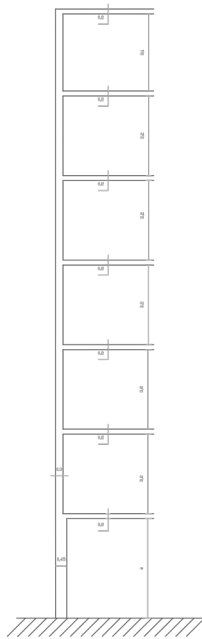


Fig. 2-40 Planta baja del edificio ED-02. Núcleo central con cubo de escalera, cubo de ascensor y patio de luces (fuente: elaborado por el autor)

Planos y datos generales



Parámetro	Valor	Unidades
Edificio	ED-02	--
Número de plantas	7	--
Altura total	24,5	m
Altura planta baja	4,00	m
Altura plantas tipo	3,20	m
Altura planta última	3,10	m
Espesor de forjados	0,20	m
Ancho en planta	15,65	m
Profundidad en planta	18,55	m
Fachada frontal planta baja (espesor)	0,45	m
Fachada frontal plantas tipo (espesor)	0,30	m

Fig. 2-41 Vista elevada del edificio ED-02 (fuente: elaborado por el autor a partir de planos del Archivo Histórico del Colegio de Arquitectos de Cataluña)

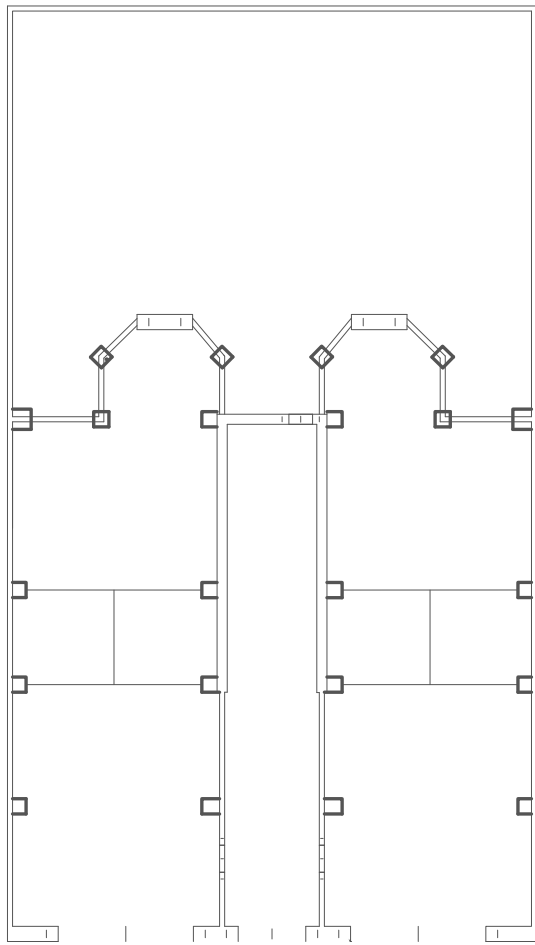


Fig. 2-42 Vista en planta de PLANTA BAJA del edificio ED-02 (fuente: elaborado por el autor)

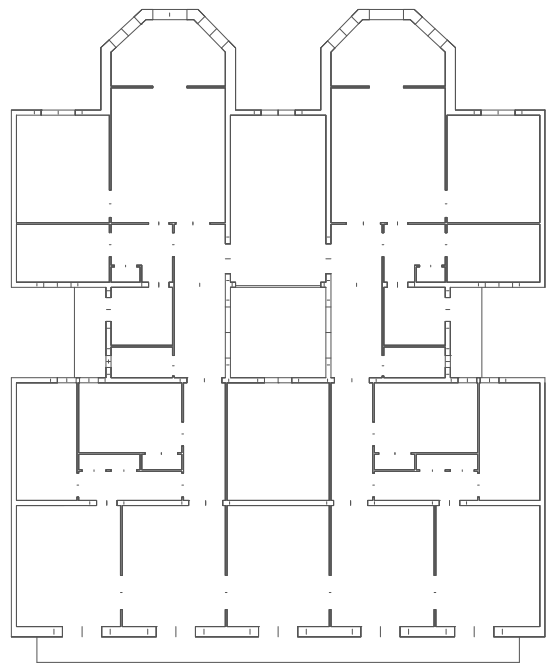
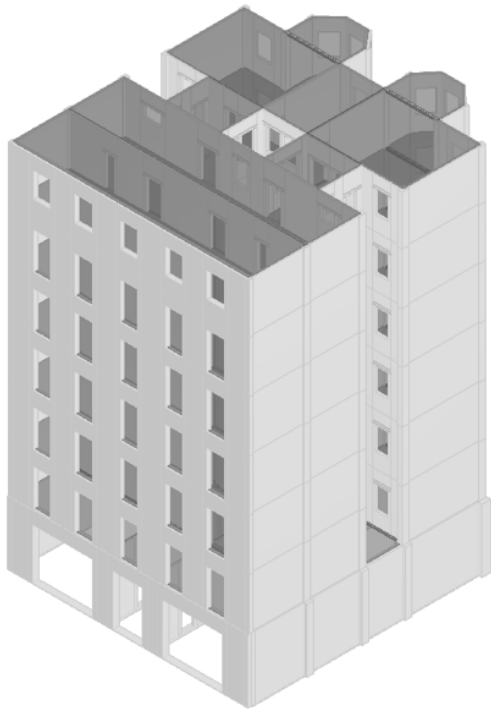
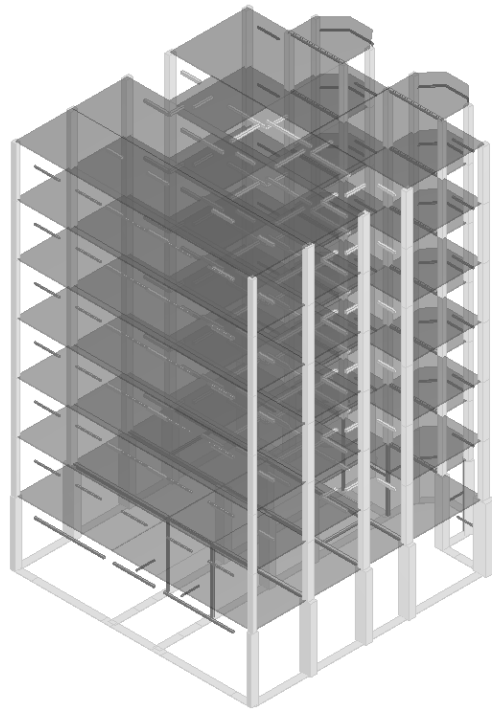


Fig. 2-43 Vista en planta de plantas tipo del edificio ED-02 (fuente: elaborado por el autor)

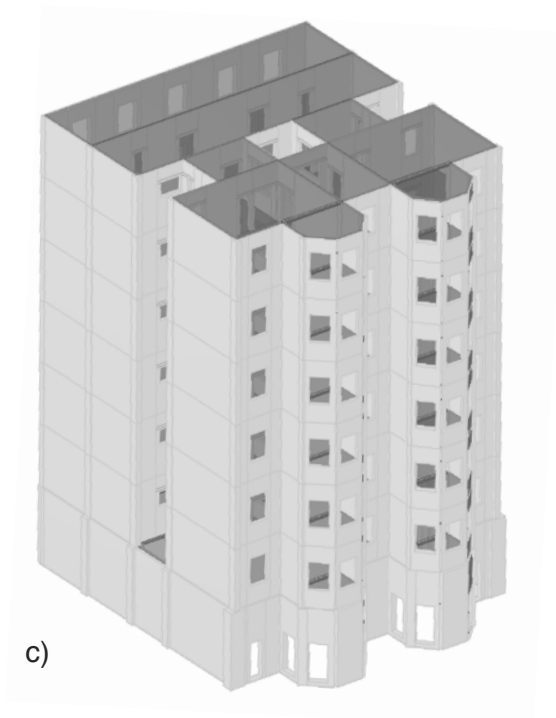
Modelo 3muri



a)



b)



c)

Fig. 2-44 Modelo Tremuri edificio ED-02 completo. a) Vista isométrica fachada principal. b) Vista isométrica fachada principal sin muros. c) Vista isométrica fachada trasera

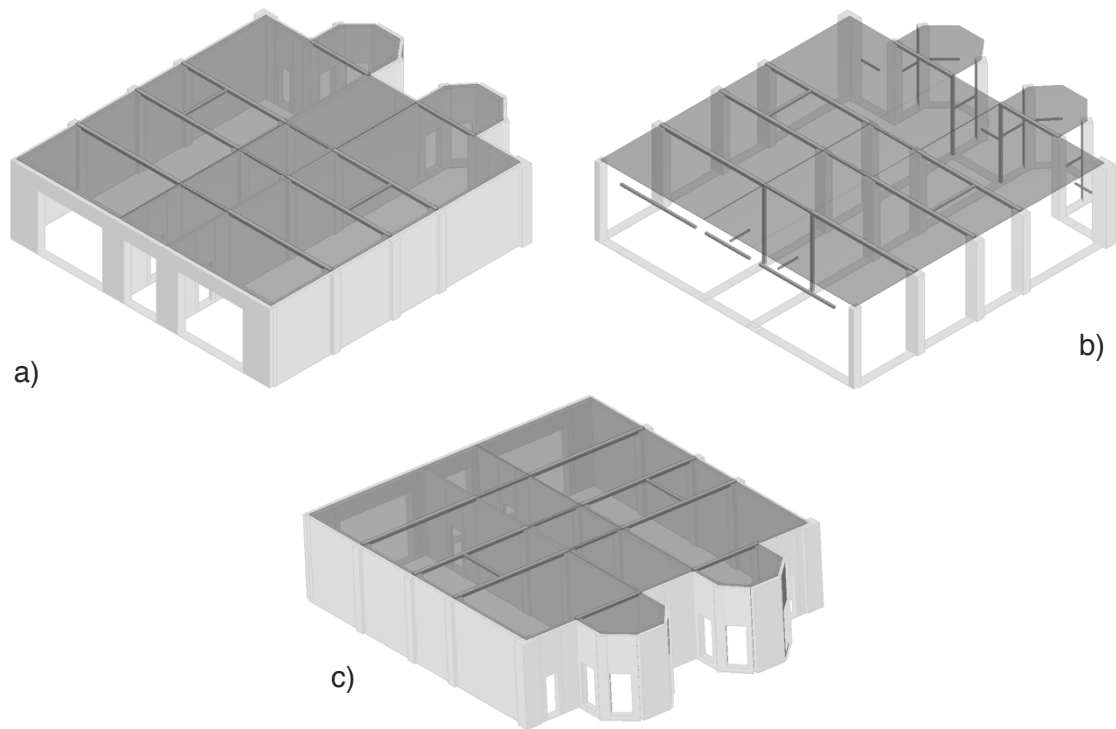


Fig. 2-45 Modelo Tremuri edificio ED-02 planta baja. a) Vista isométrica fachada principal. b) Vista isométrica fachada principal sin muros. c) Vista isométrica fachada trasera

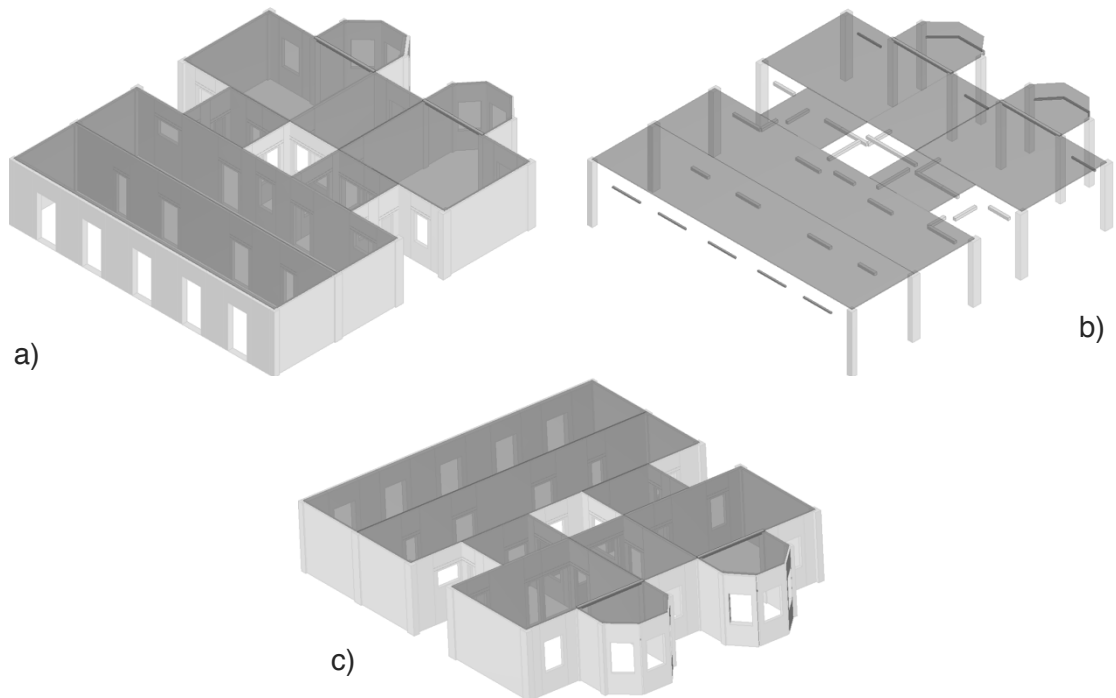


Fig. 2-46 Modelo Tremuri edificio ED-02 planta tipo. a) Vista isométrica fachada principal. b) Vista isométrica fachada principal sin muros. c) Vista isométrica fachada trasera

2.3.5.3 ED-03

Vistas varias

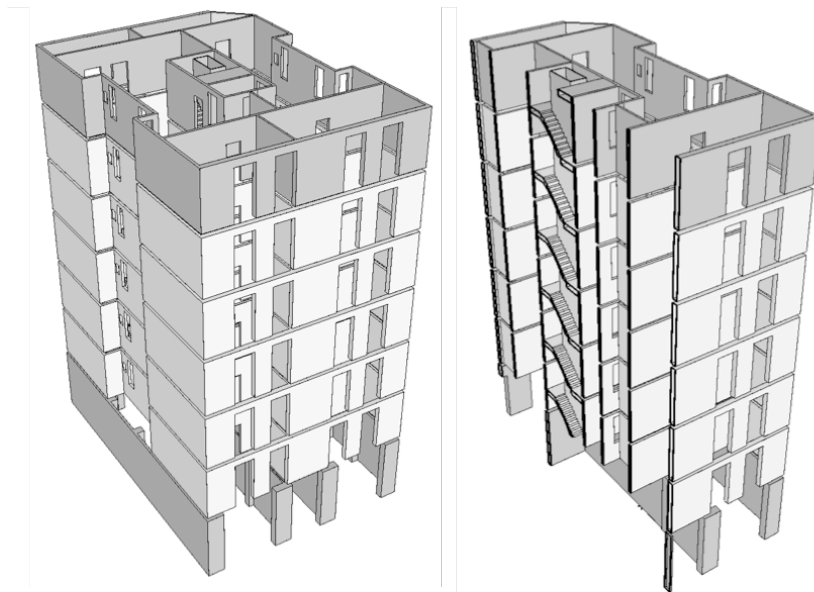


Fig. 2-47 Vista en altura del edificio ED-03. Izquierda: edificio completo. Derecha: corte en dirección perpendicular a fachada frontal (fuente: elaborado por el autor)

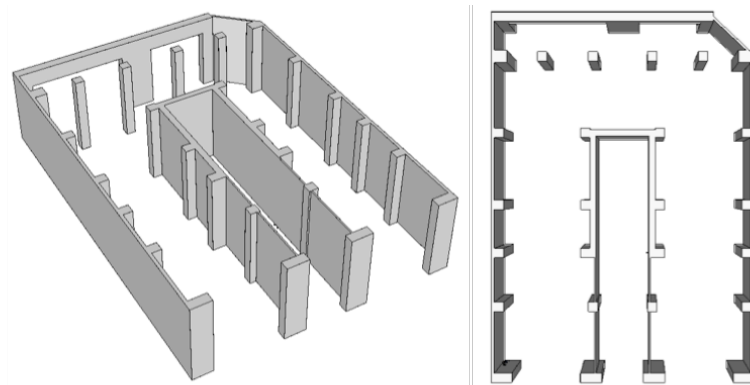


Fig. 2-48 Planta baja del edificio ED-03. Izquierda: vista isométrica. Derecha: vista en altura (fuente: elaborado por el autor)

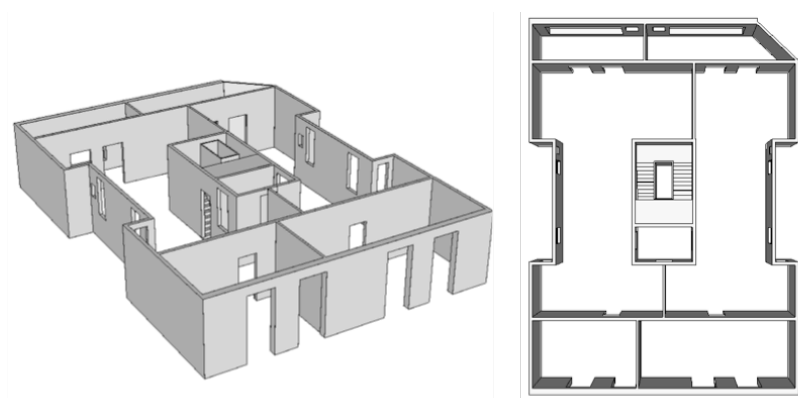


Fig. 2-49 Planta tipo del edificio ED-03. Izquierda: vista isométrica. Derecha: vista en altura (fuente: elaborado por el autor)

Planos y datos generales

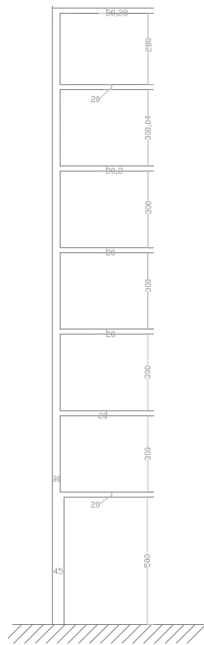


Fig. 2-50 Vista elevada del edificio ED-03
(fuente: elaborado por el autor a partir
de planos del Archivo Histórico del
Colegio de Arquitectos de Cataluña)

Parámetro	Valor	Unidades
Edificio	ED-03	—
Número de plantas	7	—
Altura total	24,2	m
Altura planta baja	5,00	m
Altura plantas tipo	3,00	m
Altura planta última	2,80	m
Espesor de forjados	0,20	m
Ancho en planta	12,70	m
Profundidad en planta	17,90	m
Fachada frontal planta baja (espesor)	0,45	m
Fachada frontal plantas tipo (espesor)	0,30	m

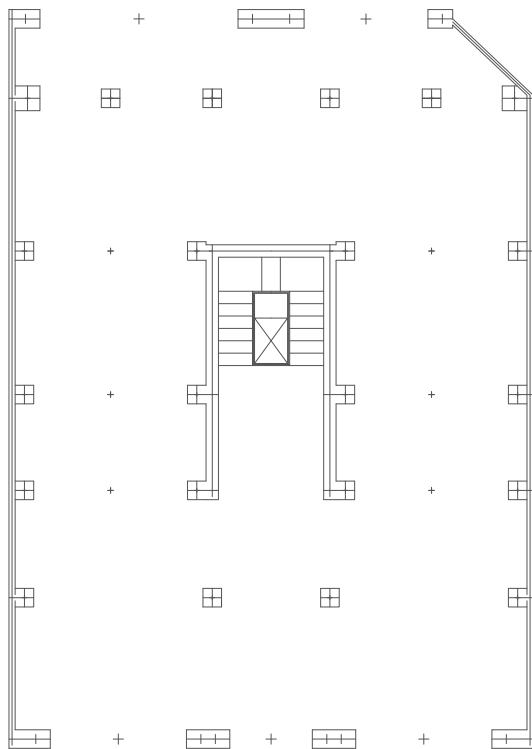


Fig. 2-51 Vista en planta de PLANTA BAJA del
edificio ED-03 (fuente: elaborado por el
autor)

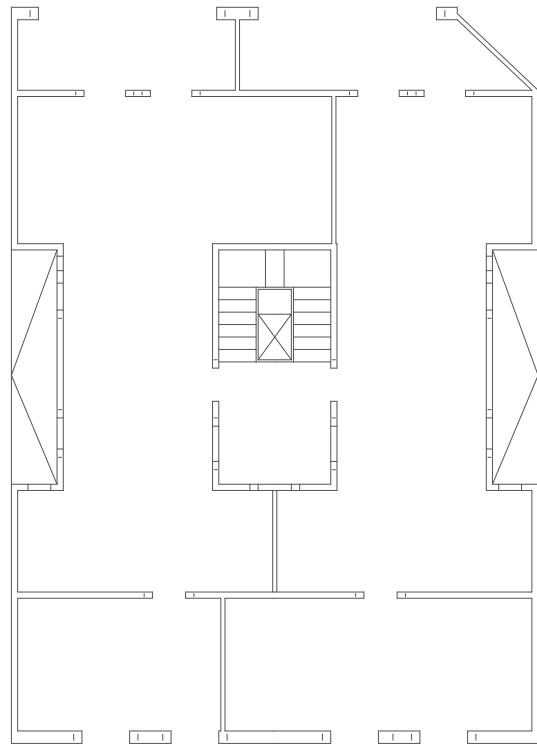


Fig. 2-52 Vista en planta de plantas tipo del
edificio ED-03 (fuente: elaborado por el
autor)

Modelo 3muri

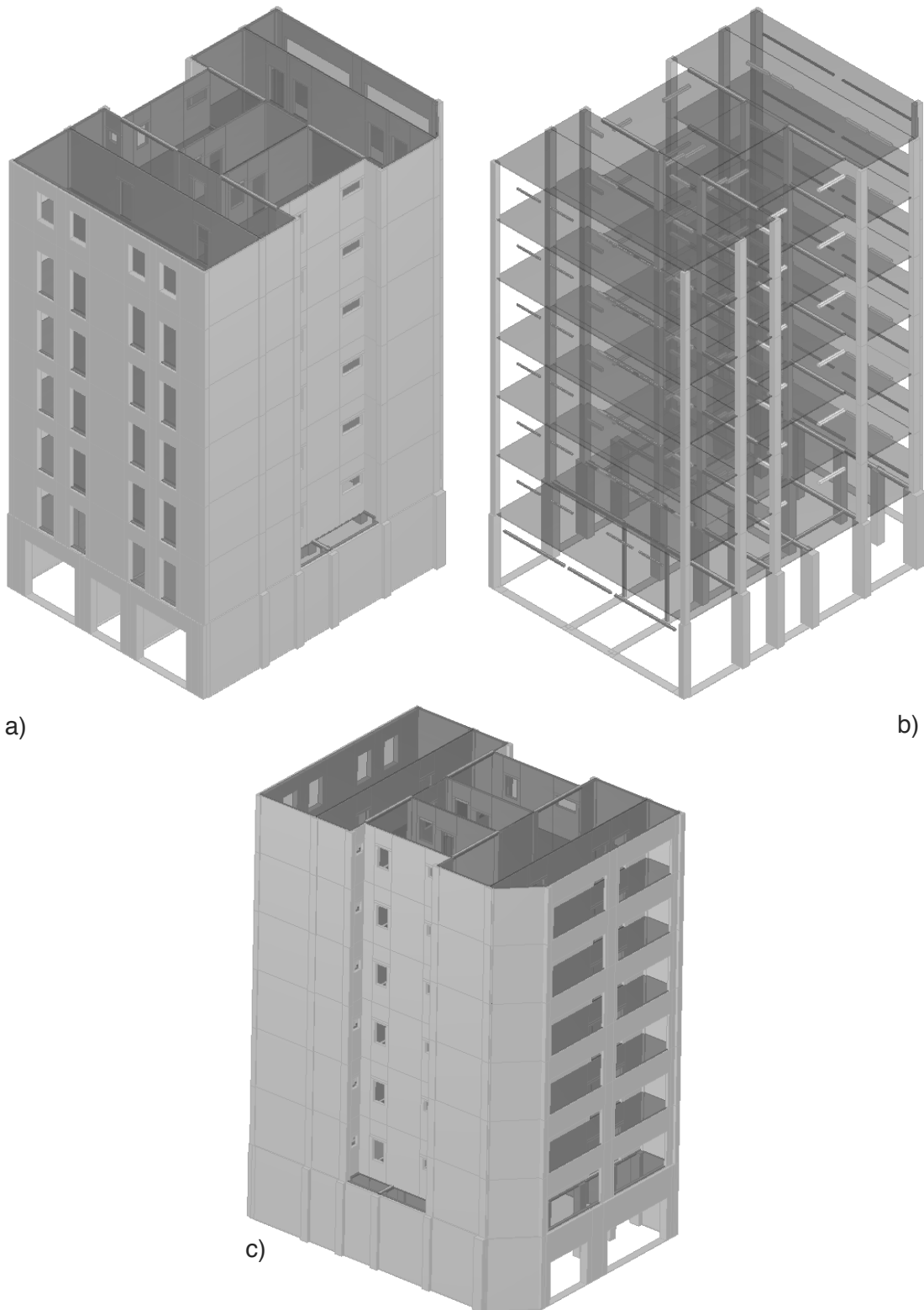


Fig. 2-53 Modelo Tremuri edificio ED-03 completo. a) Vista isométrica fachada principal. b) Vista isométrica fachada principal sin muros. c) Vista isométrica fachada trasera

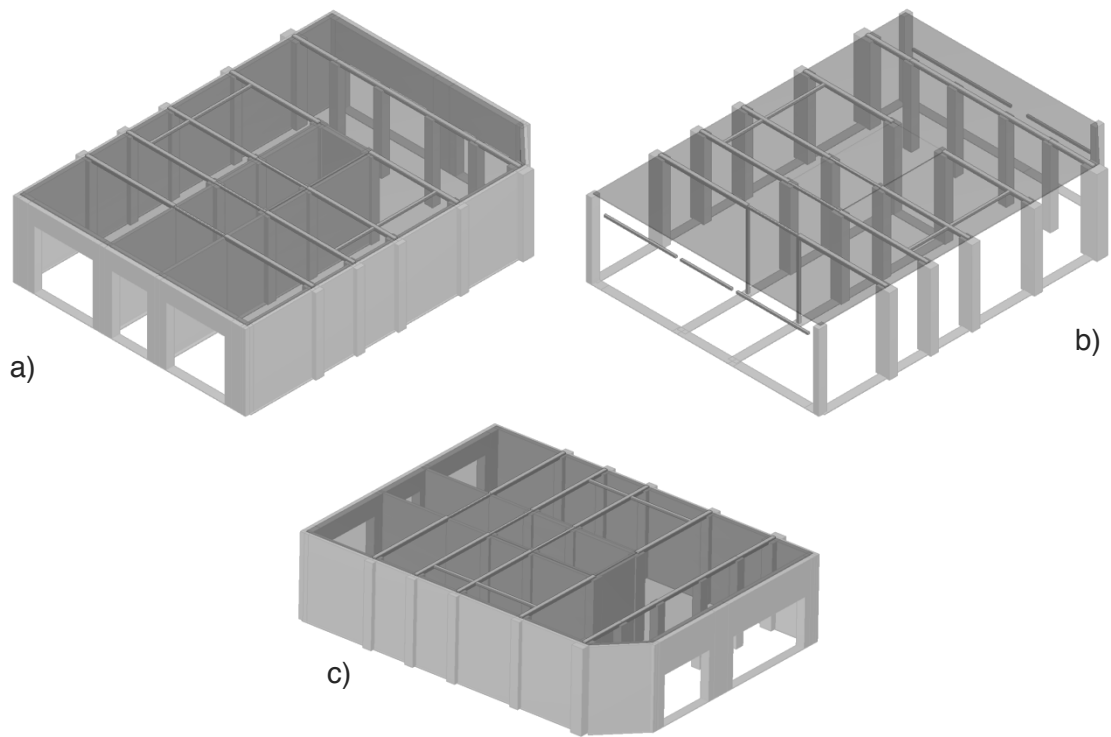


Fig. 2-54 Modelo Tremuri edificio ED-03 planta baja. a) Vista isométrica fachada principal. b) Vista isométrica fachada principal sin muros. c) Vista isométrica fachada trasera

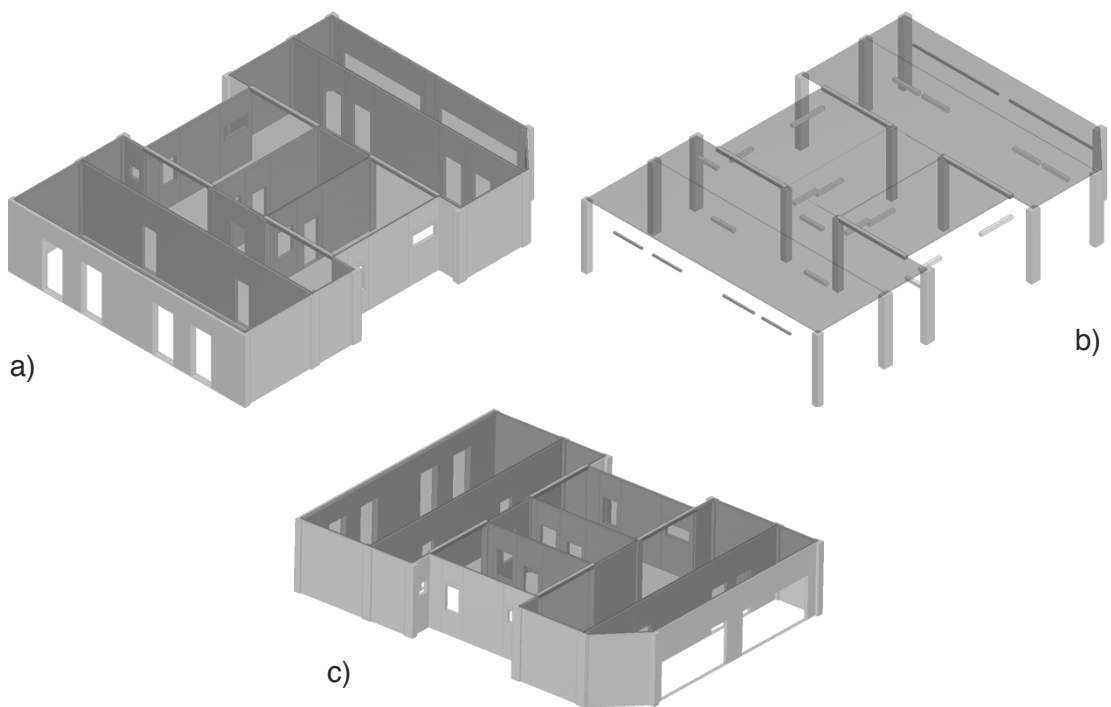


Fig. 2-55 Modelo Tremuri edificio ED-03 planta tipo. a) Vista isométrica fachada principal. b) Vista isométrica fachada principal sin muros. c) Vista isométrica fachada trasera

2.3.5.4 ED-04

Vistas varias

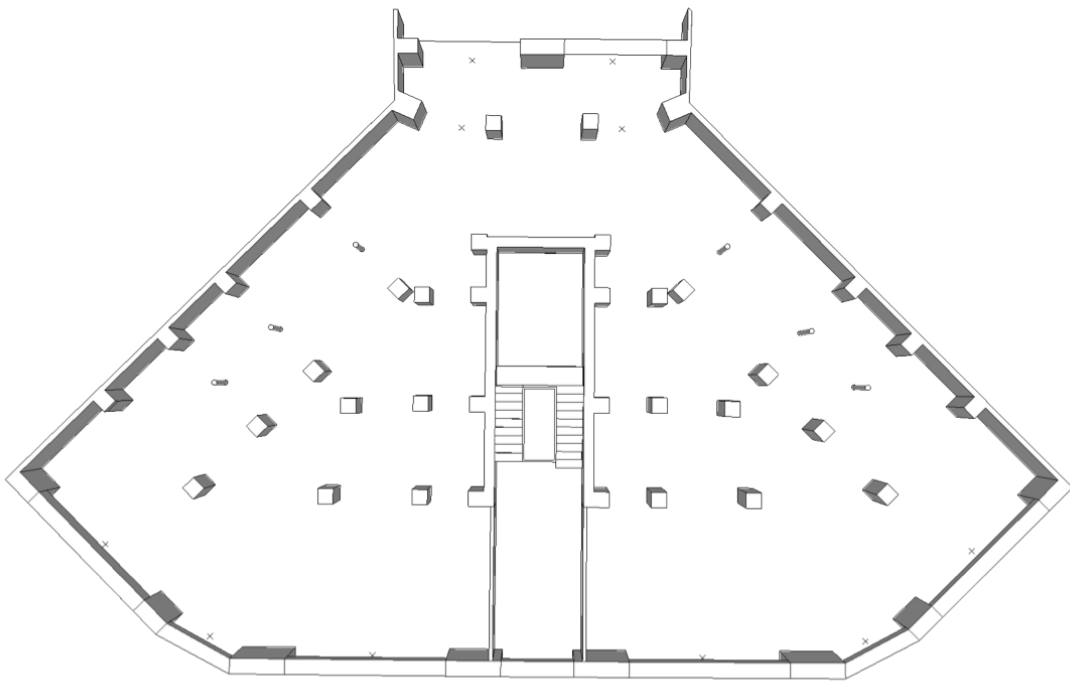


Fig. 2-56 Vista en planta de PLANTA BAJA del edificio ED-04 (fuente: elaborado por el autor)

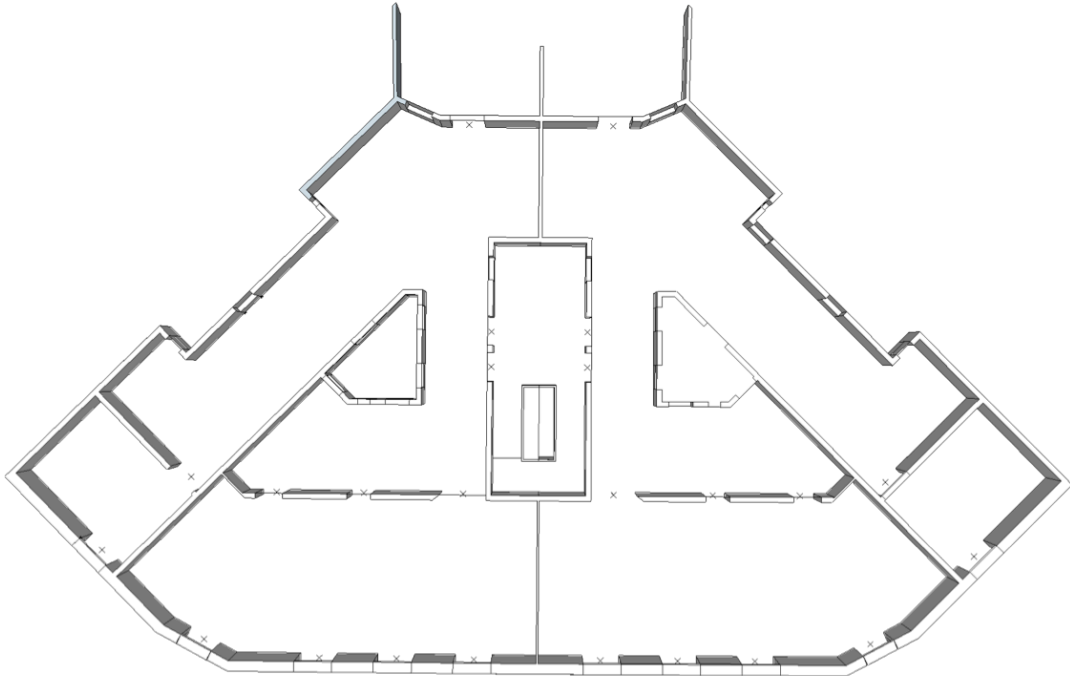


Fig. 2-57 Vista en planta de planta tipo del edificio ED-04 (fuente: elaborado por el autor)

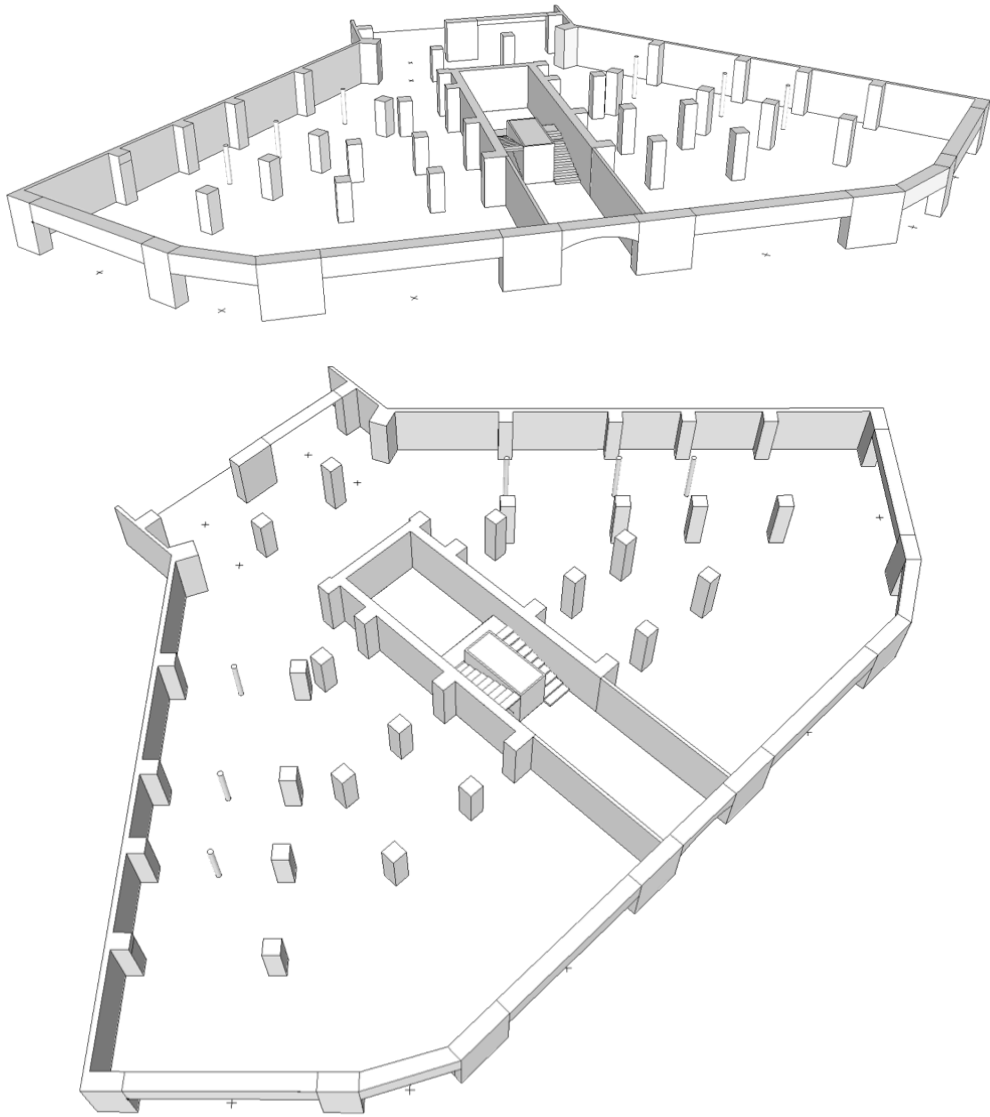


Fig. 2-58 Vistas isométricas de PLANTA BAJA del edificio ED-04 (fuente: elaborado por el autor)

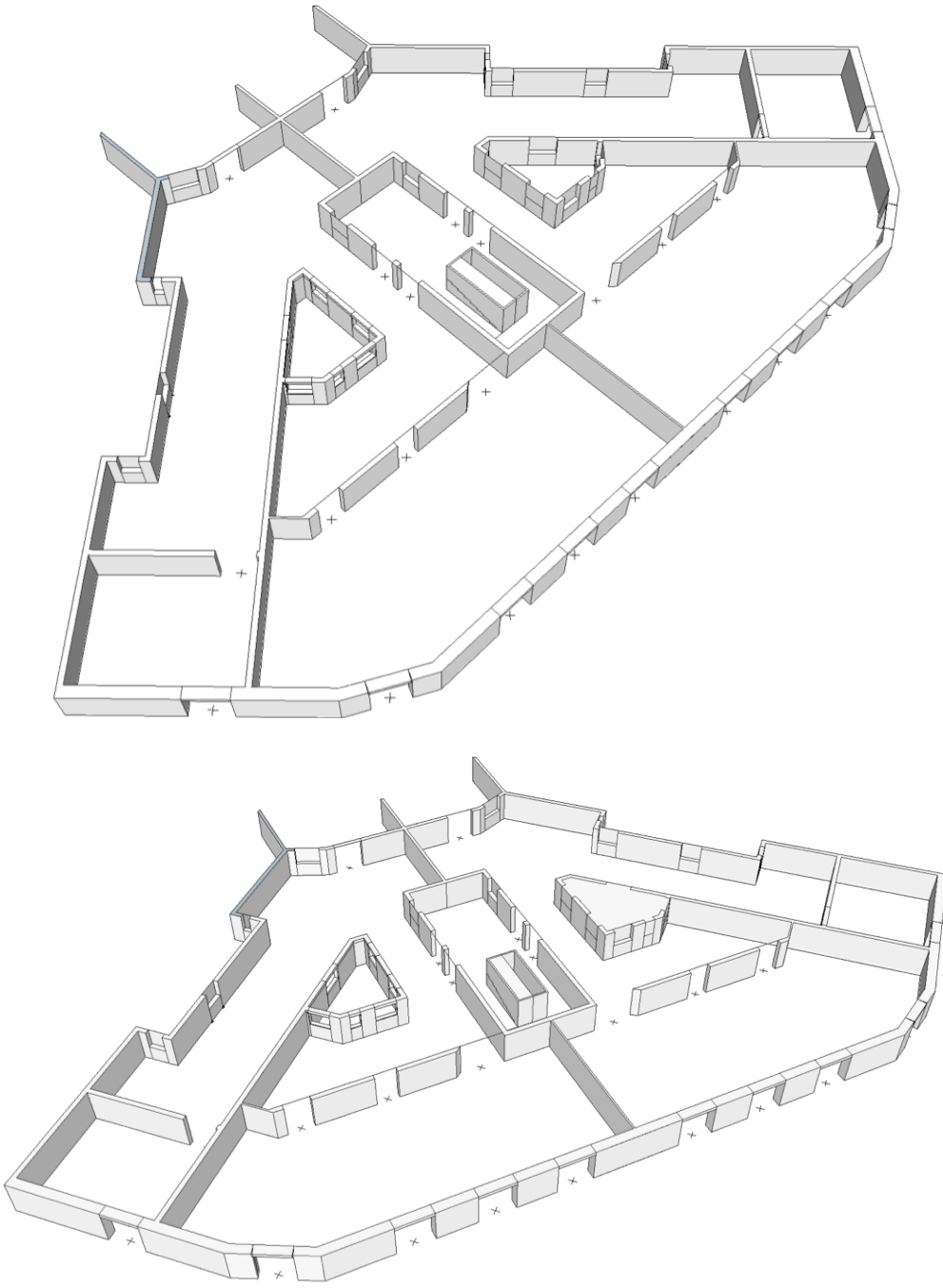
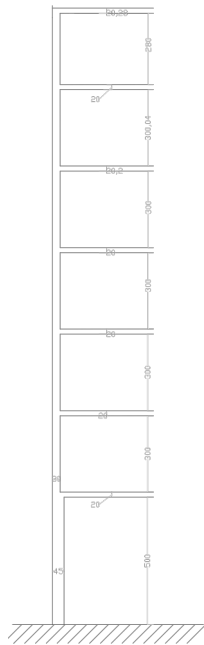


Fig. 2-59 Vistas isométricas de planta tipo del edificio ED-04 (fuente: elaborado por el autor)

Planos y datos generales



Parámetro	Valor	Unidades
Edificio	ED-04	—
Número de plantas	7	—
Altura total	24,2	m
Altura planta baja	5,00	m
Altura plantas tipo	3,00	m
Altura planta última	2,80	m
Espesor de forjados	0,20	m
Fachada frontal planta baja (espesor)	0,45	m
Fachada frontal plantas tipo (espesor)	0,30	m

Fig. 2-60 Vista elevada del edificio ED-04
(fuente: elaborado por el autor a partir
de planos del Archivo Histórico del
Colegio de Arquitectos de Cataluña)

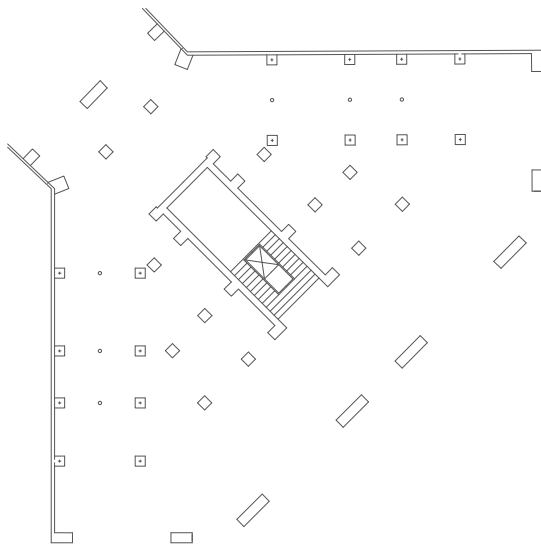


Fig. 2-61 Vista en planta de PLANTA BAJA del
edificio ED-04 (fuente: elaborado por el
autor)

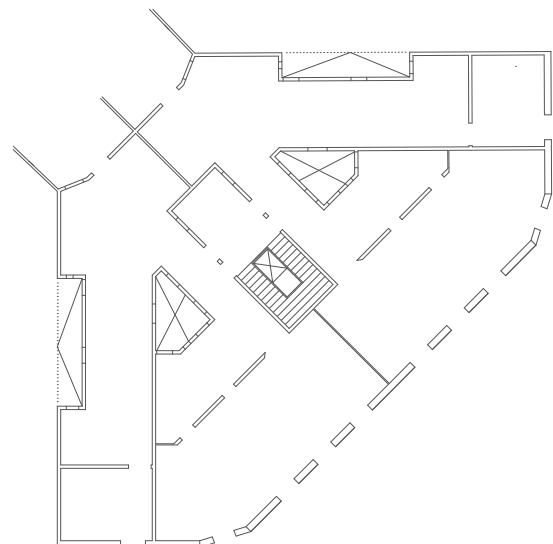


Fig. 2-62 Vista en planta de plantas tipo del
edificio ED-04 (fuente: elaborado por el
autor)

Modelo 3muri

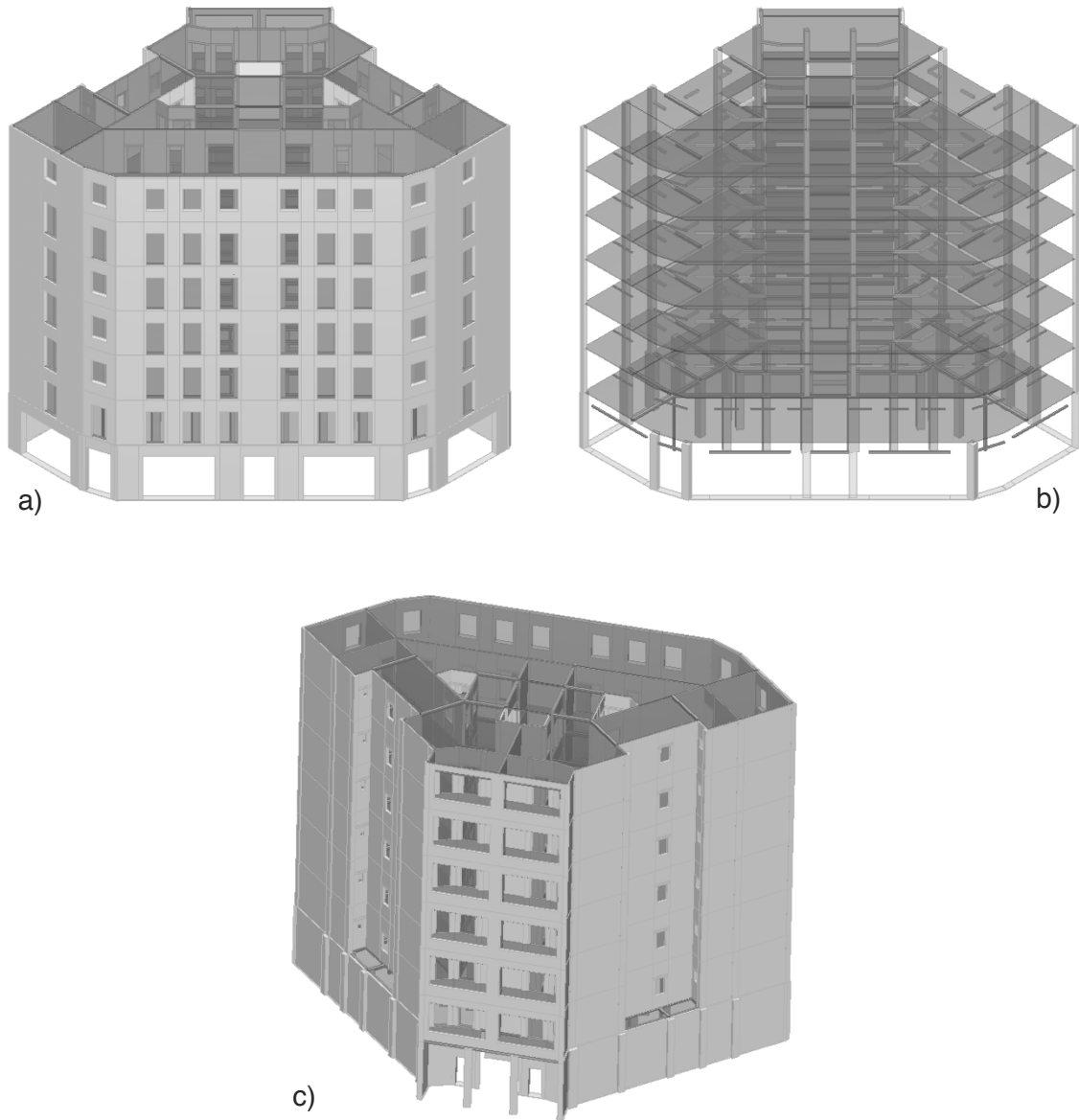


Fig. 2-63 Modelo Tremuri edificio ED-04 completo. a) Vista isométrica fachada principal. b) Vista isométrica fachada principal sin muros. c) Vista isométrica fachada trasera

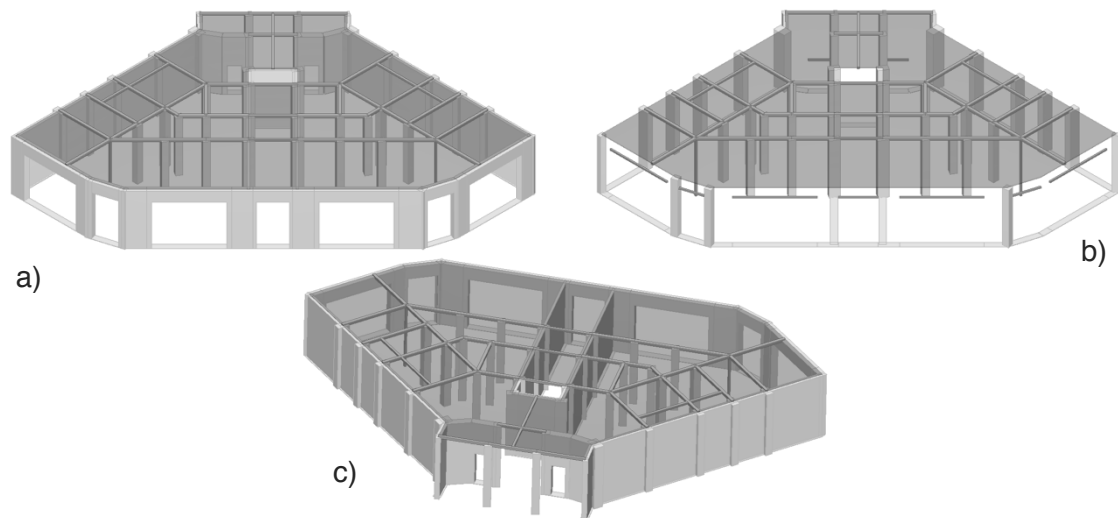


Fig. 2-64 Modelo Tremuri edificio ED-04 planta baja. a) Vista isométrica fachada principal. b) Vista isométrica fachada principal sin muros. c) Vista isométrica fachada trasera

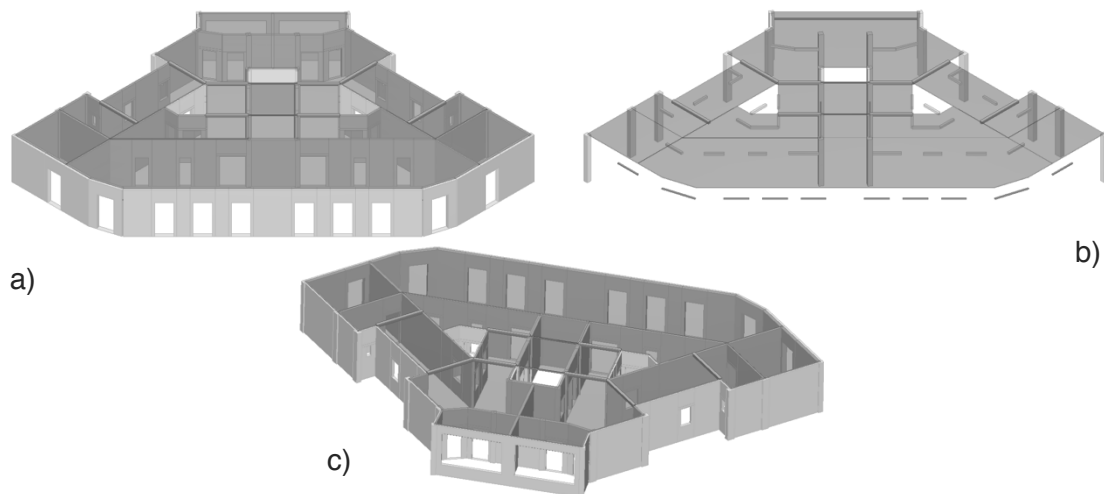


Fig. 2-65 Modelo Tremuri edificio ED-04 planta tipo. a) Vista isométrica fachada principal. b) Vista isométrica fachada principal sin muros. c) Vista isométrica fachada trasera

2.3.6 Edificios agregados

A partir de los edificios individuales presentados en el punto anterior, se conforman una serie de sistemas estructurales que constan de dos o más de dichos edificios. Según las prácticas constructivas, las paredes medianeras eran compartidas por las edificaciones aledañas, levantándose las primeras normalmente con un nervado externo de columnas que sobresale y que sirve de base para la traba de los muros de edificaciones construidas posteriormente a los costados.

Cabe mencionar que los edificios estudiados se encuentran dispuestos y agregados en la realidad de la manera en que se detalla en los siguientes puntos, permitiendo con ello incluir y analizar casos representativos y realistas que pueden encontrarse en la ciudad.

A medida que se añaden edificios para formar los distintos agregados estructurales, el número de nodos y barras de los modelos aumenta de forma similar. Lo anterior impacta directamente en la capacidad del software para realizar determinados análisis, impidiendo, con ello, la obtención de diversos resultados

para aquellos modelos compuestos por un mayor número de edificios. En el anexo correspondiente a este apartado se muestran algunos agregados adicionales que, debido a estas limitantes, no han podido ser incluidos en los cálculos finales de este trabajo.

2.3.6.1 AG-01

El agregado AG-01 está compuesto por dos edificios ED-01 idénticos. Lo anterior era común en proyectos que se llevaban a cabo por el mismo Arquitecto, permitiéndole reaprovechar su diseño inicial, economizar y agilizar con ello la edificación de los mismos.

2.3.6.2 AG-02

El agregado AG-02 está compuesto por dos edificios: un edificio del tipo ED-01 y uno del tipo ED-02, dispuestos en ese orden, de izquierda a derecha, con respecto a la fachada principal de los mismos.

2.3.6.3 AG-04

El agregado AG-04 está compuesto por tres edificios con el siguiente orden: un edificio central ED-03, un edificio de chaflán ED-04 y un edificio central ED-03 que gira con respecto al edificio de esquina, para posicionarse en el otro lateral de la manzana.

2.4 Resumen y conclusión

La ciudad de Barcelona remonta sus orígenes a hace más de 2000 años cuando fue fundada como una colonia romana. A lo largo del tiempo siempre fue considerada una plaza importante a nivel comercial, militar y estratégico, lo cual conllevó su amurallamiento a fin de protegerla durante gran parte de su existencia. Es hasta mediados del siglo XIX que, como consecuencia del gran auge industrial contemporáneo, la población en un gran número de ciudades se vio incrementada de forma importante, requiriéndose con ello soluciones para poder solventar la falta de vivienda y mejorar las condiciones de vida y salubridad de las ciudades ya existentes.

Para Barcelona, lo anterior derivaría en la demolición de las murallas, la expansión “ilimitada” de la ciudad, y el fin de su condición como emplazamiento militar, dando lugar a diversas propuestas para llevar a cabo dicha expansión. Finalmente, salvo algunas modificaciones realizadas posteriormente, la propuesta hecha por el ingeniero civil Idelfonso Cerdà sería la elegida para ser implementada en la ciudad.

El nuevo trazado urbano de la ciudad de Barcelona queda definido y segmentado en un total de 10 distritos y 73 barrios, los cuales se edificarán en diversos períodos, existiendo así, diversas tipologías asociadas a los mismos, con diversas consideraciones en cuanto a las acciones se refiere, y edades que superan incluso los 100 años de construcción.

El distrito de L'Eixample es uno de los más representativos de la ciudad, siendo el distrito que mayor población concentra. Podemos encontrar también diversas tipologías constructivas dentro del mismo, siendo la de mampostería no-reforzada una de las más extendidas.

Gracias a diversos estudios, proyectos y datos históricos, el suelo de la ciudad de Barcelona ha sido caracterizado minuciosamente, permitiendo con ello la utilización no sólo de los espectros de respuesta propuestos en las normativas locales (NCSE-02) o europeas (EC8), sino también la generación de

espectros específicos de la ciudad, los cuales permiten considerar la peligrosidad sísmica de la zona de una manera menos genérica y ante diversos escenarios (*i.e.* deterministas/probabilistas).

En este capítulo se presentan los datos referentes a la geometría, tipo de elementos y materiales constructivos utilizados, aparejos, uniones entre edificios, calidad de la mano de obra, costumbres constructivas, entre otros, los cuales se han obtenido después de diversas visitas a archivos, revisión de edificios existentes, consultas a distintas referencias bibliográficas contemporáneas, tratados de construcción, pruebas de laboratorio disponibles, y al juicio de expertos en la materia. Esto denota la gran importancia que tiene la participación de equipos con diferentes perfiles multidisciplinarios, así como de una vasta colección de fuentes de información.

Los edificios pertenecientes a la tipología de interés emplean muros de carga a manera de sistema estructural resistente, los cuales se ven sustituidos por pilares de fundición y vigas metálicas en la planta baja, con la finalidad de permitir espacios diáfanos para usos comerciales y de restauración, con mayores alturas también. Los forjados se resuelven a base de un sistema de bovedilla con viguetas metálicas, existiendo también algunos arcos y dinteles de madera o hierro sobre las diversas aperturas que se encuentran en los muros. Los espesores de muros suelen ser superiores en plantas bajas, reduciéndose hasta 15 cm en plantas superiores. Las paredes medianeras se comparten entre edificios aledaños, permitiendo con ello la existencia de agregados de edificios que pueden incluso extenderse toda la manzana.

Los diversos edificios representativos del parque urbano del distrito se han modelado tanto de forma individual como de forma agregada, permitiendo con ello representar distintas configuraciones que se pueden observar normalmente en cualquier manzana. Lo anterior se ha hecho con el programa de cálculo estructural Tremuri, que a su vez permite la realización de diversos tipos de análisis estructural (*i.e.* modal, pushover o dinámico). La variabilidad existente en la calidad de los componentes de dichos edificios será tratada en capítulos posteriores, permitiendo con ello generar una batería de modelos con diversas propiedades a fin de caracterizar ampliamente cada uno de ellos.

Es primordial que la información referente tanto a las estructuras (*e.g.* materiales, geometría, técnicas, etc.) como a la demanda a la que se verán sometidas (*e.g.* tipo de terreno, aceleración del terreno, parámetros espectrales, etc.) sea original y lo más específica posible, para así representarla (*i.e.* modelarla) de manera adecuada y completa. El grado de calidad y representatividad de la información introducida en el modelo incidirá directamente en los resultados obtenidos.



CAPÍTULO 3

Metodología

3 METODOLOGÍA

3.1 Introducción

Gracias a la observación de los efectos de terremotos importantes y a la disponibilidad de información proveniente del monitoreo sísmico, la ingeniería sísmica ha evolucionado significativamente a través del último siglo, permitiendo abarcar, no sólo la protección de vidas, si no también minimizar el daño y las interrupción de servicios (National Research Council, 2006).

Contrario a las filosofías previas de diseño, basadas en fuerzas, que fundamentaban la evaluación sísmica de estructuras en el cálculo de las tensiones causadas por las fuerzas sísmicas equivalentes en los distintos elementos, las filosofías actuales basadas en prestaciones (*PBSD*, por sus siglas en inglés), establecen dicha evaluación en función de las deformaciones inducidas en la estructura por parte del terremoto (de Almeida e Fernandes Bhatt, 2011).

Estas nuevas filosofías de diseño tienen como propósito evaluar, de manera realista, el desempeño de una estructura ante un movimiento sísmico del terreno, facilitando y mejorando, con ello, la toma de decisiones de ingenieros y otras partes interesadas, en lo que respecta al riesgo sísmico.

A diferencia de lo que ocurre en otros campos de la ingeniería, en los cuales existe la posibilidad de uso de prototipos a escala real de la estructura o la realización de multitud de pruebas con el fin de obtener la experiencia necesaria para generar “resultados idénticos”, en el diseño sísmico basado en prestaciones, esto no es viable. A pesar de ello, en los últimos años esta alternativa se ha vuelto atractiva, gracias al importante progreso relacionado con la potencia y capacidades computacionales, los avances en la evaluación del riesgo sísmico, y el desarrollo de diversas metodologías (Krawinkler, 1999).

El diseño sísmico basado en prestaciones puede utilizarse tanto en el diseño de nuevas estructuras, como en la evaluación de estructuras existentes, mediante técnicas estáticas y dinámicas, que a su vez pueden subdividirse en lineales y no lineales.

Los procedimientos basados en prestaciones se apoyan en dos elementos principales: i) el cálculo de la capacidad de la estructura, y ii) la determinación adecuada de la demanda a ser aplicada. El grado en que la capacidad estructural sea capaz de resistir la demanda impuesta, determinará si el desempeño de dicha estructura es compatible con los objetivos del diseño inicial.

3.2 Modelado de los edificios

Una estructura es un sistema compuesto por miembros finitos que se encuentran unidos entre sí por un número, también finito, de nodos (*i.e.* juntas), los cuales se encuentran dispuestos en el espacio y son capaces de resistir los esfuerzos generados, tanto por las cargas resultantes de su uso y peso propio, como de aquellas acciones externas que se aplican sobre ellos.

Con el fin de obtener la respuesta de un sistema estructural que se encuentra sometido a un estado específico de cargas, se emplea el análisis estructural, el cual se puede subdividir según los tipos de acciones específicas a las que esté sometido el sistema, teniendo, por tanto, análisis de tipo estático y de tipo dinámico. Así mismo, ambos tipos de análisis, estático y dinámico, pueden subdividirse en análisis lineales y no lineales.

El comportamiento lineal consiste en asumir una relación del mismo tipo entre causas y efectos, es decir, las propiedades de los materiales cumplen con la condición de que los esfuerzos son proporcionales a las deformaciones (*i.e.* ley de Hooke). Adicionalmente, se considera que los desplazamientos producidos son suficientemente pequeños.

En el caso de la no linealidad, ésta se puede clasificar en dos tipos: **1)** física: se debe solamente a que el material es no lineal, y **2)** geométrica: se debe a que los desplazamientos en la estructura no son pequeños.

Los análisis lineales son una aproximación conveniente que se emplea normalmente con fines de diseño. Por otro lado, el uso de criterios de modelización mediante modelos no lineales es una práctica que se ha incorporado y estandarizado progresivamente en los últimos años. Lo anterior atiende motivos diversos, como el mejor aprovechamiento de materiales, aumento en la capacidad de carga de las estructuras, o el entendimiento detallado de la evolución del daño de un sistema, entre otros.

3.2.1 El análisis modal

Un entendimiento integral de la dinámica de estructuras es esencial para la resolución de diversos problemas de vibración de edificaciones existentes, así como para el diseño y desarrollo de nuevas estructuras.

El análisis modal es una herramienta muy útil que permite describir, entender y modelar el comportamiento estructural.

En su mayoría, las estructuras se encuentran sujetas a distintas fuerzas dinámicas provocadas por ciertos procesos particulares que producen que éstas vibren. La influencia de dichas vibraciones en el comportamiento y consiguiente desempeño de las estructuras puede (debe) ser evaluada y cuantificada a partir de la información obtenida de la respuesta dinámica de las mismas.

La mayoría de los problemas asociados con vibraciones están, a su vez, relacionados con el fenómeno de resonancia, el cual ocurre cuando las fuerzas dinámicas de un determinado proceso excitan las frecuencias naturales (*i.e.* modos de vibración) de las estructuras aledañas. De ahí la importancia del estudio de los modos de vibración para obtener una caracterización dinámica completa de la estructura.

Una manera sencilla de explicar el comportamiento de una estructura es entendiéndola como la resultante de un conjunto de sistemas simplificados de un grado de libertad (*IGDL o SDOF, por sus siglas en inglés*), cuyos modos de vibración (resonancias) pueden ser identificados y evaluados de manera individual mediante el denominado *análisis modal*. En otras palabras, la complejidad del patrón de deformación que presenta una estructura al vibrar puede descomponerse en un conjunto de formas modales simplificadas, las cuales presentan parámetros de amortiguamiento y frecuencia individuales.

Las propiedades dinámicas de la estructura quedan entonces completamente descritas mediante la obtención de estos *parámetros modales* para cada sistema simplificado de *IGDL* (*i.e.* la frecuencia, la forma y el amortiguamiento modales - Fig. 3-1).

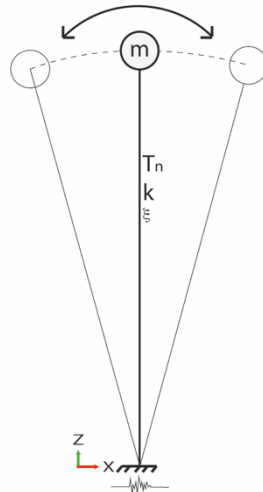


Fig. 3-1 Sistema de 1DGL (fuente: preparado por el autor)

El análisis modal de un modelo estructural (analítico-matemático) permite su ajuste y validación al contrastar los resultados de éste con aquéllos obtenidos de forma experimental o en base a lo reportado en la literatura para estructuras y/o tipologías similares. La información obtenida a partir del análisis modal de un modelo estructural y el uso que puede darse a la misma son muy amplios.

Tal como se sugiere en la literatura (Barbat, 1982; Priestley *et al.*, 1996; Barbat *et al.*, 2005; Fardis, 2009), el número de grados de libertad de una estructura se condensa en tres modos por nivel (dos traslaciones horizontales y una rotación alrededor de la componente vertical).

A modo de comprobar que el número de modos calculados es suficiente para capturar la respuesta dinámica de la estructura, se ha de verificar que la suma de masas correspondiente a los *modos fundamentales* (*i.e.* modos que activan al menos entre 1% y 3% de la masa) desplazan entre 80% y 90% del total de la masa, en cualquier dirección de análisis. La comprobación anterior y el comportamiento tipo caja que presentan las estructuras de mampostería no reforzada permitirá despreciar la influencia y participación de modos de vibración superiores.

Los análisis modales llevados a cabo en este trabajo son calculados con la versión de investigación del programa *3Muri* (Galasco *et al.*, 2002). Los resultados obtenidos a partir de estos análisis incluyen, para cada modo: el período natural (T), la frecuencia natural (f), la frecuencia circular (ω), las masas activadas en cada dirección (M), los factores de importancia en cada dirección (IF , por sus siglas en inglés), y los cocientes relativo y absoluto de masas activadas en cada dirección (RAM y AAM , por sus siglas en inglés, respectivamente), donde:

- $M_{total,i} = M_{i,x} + M_{i,y} + M_{i,z}$ es la masa total del modo i , compuesta por la sumatoria de las masas de cada dirección.
- $IF_{i,j} = M_{i,j} / M_{total,i}$ es el factor de importancia para el modo i en la dirección j .
- $RAM_{i,j} = M_{i,j} / \sum_{i=1}^n M_{i,j}$ es el cociente relativo de masas activadas del modo i en la dirección j .
- $AAM_{i,j} = M_{i,j} / (\sum_{i=1}^n M_{i,x} + \sum_{i=1}^n M_{i,y} + \sum_{i=1}^n M_{i,z})$ es el cociente absoluto de masas activadas del modo i en la dirección j .

3.2.2 El análisis estático no lineal

Con la finalidad de evaluar tanto edificaciones existentes, así como de diseñar adecuadamente estructuras sismorresistentes nuevas, es necesario contar con metodologías capaces de: **1)** estimar adecuadamente la demanda en términos estructurales (*i.e.* rigidez, resistencia, ductilidad, etc.) tomando en cuenta las incertidumbres asociadas a los datos de entrada; y **2)** que los procedimientos y métodos sean suficientemente sencillos y simples.

Anteriormente, los métodos aplicados en las normativas existentes se basaban en la suposición de comportamientos estructurales elásticos lineales, viéndose incapaces de caracterizar la demanda en los términos mencionados más arriba. Por otro lado, los análisis dinámicos no-lineales, tipo tiempo-historia (*i.e.* paso a paso) de sistemas de múltiples grados de libertad (*MGDL* o *MDOF*, por sus siglas en inglés), además de requerir información adicional, son poco prácticos para el diseño cotidiano, sin conducir necesariamente siempre a resultados más confiables debido a las incertidumbres asociadas a la información de entrada.

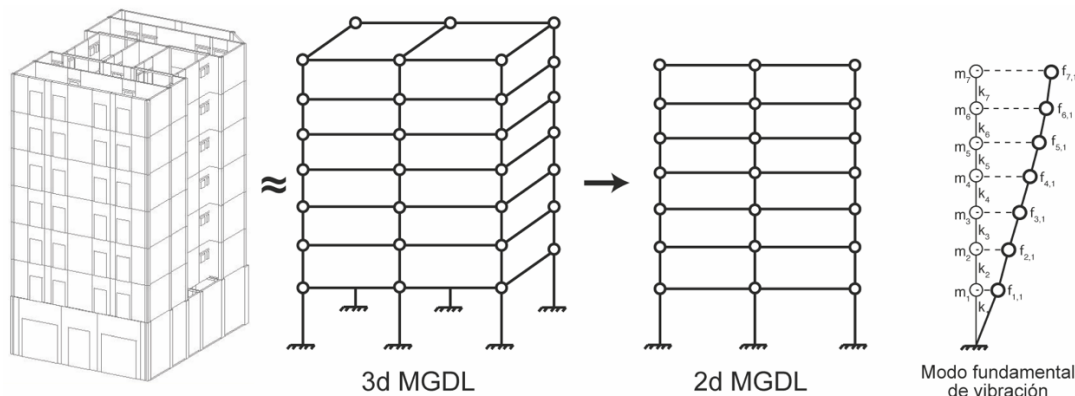


Fig. 3-2 Modo fundamental de vibración de una estructura a partir de su discretización en un sistema de múltiples grados de libertad (fuente: preparado por el autor)

De acuerdo con lo anterior, la importancia de la implementación de metodologías que permitan un correcto equilibrio entre su aplicabilidad cotidiana para el diseño y la confiabilidad de sus resultados es fundamental, siendo éstos los principales motivos para el desarrollo de los diferentes procedimientos estáticos no-lineales (*PNL* o *NSP*, por sus siglas en inglés).

Los procedimientos estáticos no-lineales tienen, por tanto, la finalidad de evaluar la respuesta no-lineal de estructuras frente a cargas horizontales incrementales, determinando el mecanismo de fallo de la estructura a partir de la formación de articulaciones plásticas (*i.e.* rótulas).

Existen diferentes métodos, los cuales han prosperado significativamente en las últimas décadas, permitiendo, además de la evaluación de estructuras existentes y el diseño de nuevas, la identificación de sus correspondientes estados de daño y la correlación de éstos con diferentes amplitudes del movimiento del terreno.

Algunos de los procedimientos estáticos no-lineales contemporáneos en uso se han concebido recientemente, mientras que algunos otros, concebidos previamente, han sufrido adaptaciones y mejoras con el tiempo. Asimismo, en la actualidad, algunos de estos métodos son referenciados en distintos códigos técnicos y guías de diseño, construcción, rehabilitación y seguridad estructural.

A pesar de tener bases y objetivos comunes, estos métodos presentan algunas características particulares que los diferencian a unos de otros y que, algunas veces, incluso limitan su utilización.

En síntesis, existen principalmente dos etapas que pueden distinguirse: **1)** el cálculo de la capacidad; y **2)** la evaluación de la demanda sísmica.

En la primera etapa, todos los métodos están basados en el *análisis de capacidad* o *pushover*, cuyo resultado es la denominada *curva de capacidad* que, una vez convertida a formato aceleración-desplazamiento (ver 3.3.1.3) con ayuda de los parámetros obtenidos a partir del análisis modal, permitirá confrontar la capacidad de la estructura con la demanda solicitada. El procedimiento anterior requiere, adicionalmente, la obtención de una representación bilineal equivalente del espectro de capacidad, la cual también está directamente relacionada con el método estático no-lineal seleccionado, como se explica más adelante (ver 3.2.2.5).

La segunda etapa, contempla la evaluación de la demanda, para lo cual cada método estático no-lineal asume un proceso diferente, obteniéndose como resultado, ya sea un espectro de respuesta elástico amortiguado, o un espectro inelástico para cada registro sísmico empleado, según sea el caso (3.3.1).

Una vez el formato de la capacidad y la demanda se ha homogeneizado, se calcula el punto de desempeño de la estructura (*i.e.* punto de capacidad por demanda – ver 3.5.1). Este proceso resulta también específico del procedimiento estático no-lineal elegido y se detallará en los apartados correspondientes a cada uno de ellos.

En el siguiente subapartado, se describen algunos de los métodos más relevantes, sus características y limitaciones principales. Se hace especial hincapié en dos procedimientos: **1)** el *Método del espectro de capacidad*, considerado pionero de este tipo de metodologías, y a partir del cual se desarrollaron la mayoría de los procedimientos en uso hoy en día, y **2)** el método *N2*, el cual ha evolucionado desde su concepción original con el objetivo de tomar en cuenta la participación de modos superiores, estructuras asimétricas, así como otros aspectos estructurales, y cuya aplicación es amplia en diversos tipos de estructuras tales como las analizadas en este trabajo. Adicionalmente, se presentan, de forma menos exhaustiva, otros métodos compatibles y de amplia utilización hoy en día, algunos de los cuales están incluidos en diversas normativas.

3.2.2.1 Métodos

Método del espectro de capacidad (ATC-40)

El método del espectro de capacidad (*MEC* o *CSM*, por sus siglas en inglés) remonta sus orígenes a inicios de la década de 1960, con los estudios desarrollados por el profesor John A. Blume, mediante la técnica de la energía de reserva, la cual comparaba la energía elástica con la energía inelástica en la estimación del desplazamiento inelástico, y que, ya desde entonces, hacía uso de conceptos tales como ductilidad o factores de reducción.

Posteriormente, en la década de 1970, el profesor Sigmund A. Freeman llevó a cabo un análisis de la vulnerabilidad sísmica de diversas estructuras navales, a partir del cual determinó que la técnica de la energía de reserva no era del todo adecuada para dicho trabajo, proponiendo una nueva aproximación un tanto más intuitiva, que consistía en comparar gráficamente la demanda con la capacidad, permitiendo así la posibilidad de realizar una evaluación visual del desempeño de la estructura ante un movimiento del terreno (Freeman, 1998, 2004).

Con el fin de poder representar la capacidad y la demanda en el mismo gráfico, Freeman propuso convertir la curva obtenida del análisis estático no-lineal (*i.e.* pushover) de su formato inicial *fuerza-desplazamiento* al formato de *aceleración-desplazamiento espectrales* (*ADRS*, por sus siglas en inglés) (Mahaney *et al.*, 1993). Adicionalmente, y con la intención de representar la incursión de la estructura en el rango inelástico, redujo el espectro de respuesta e incrementó el período, disipando dicha energía

mediante amortiguamiento histerético. El autor basó todas las formulaciones y el proceso en sí en las diversas observaciones realizadas para diferentes edificios y sus respectivas respuestas.

En el año de 1996, la Comisión de Seguridad Sísmica de California, por medio del Consejo de Tecnología Aplicada (*ATC*, por sus siglas en inglés), publicó el documento “Evaluación Sísmica y Restauración de Edificios de Concreto”, mejor conocido como *ATC-40* (*ATC-40, 1996b, 1996a*). Dicho documento proponía la utilización del método del espectro de capacidad.

En la actualidad, y a pesar de las diversas críticas y diferentes alternativas existentes, el método del espectro de capacidad sigue siendo ampliamente utilizado en la evaluación de una gran cantidad de estructuras, así como base en la formulación de otros métodos y documentos (FEMA/NIBS, 1999).

La parte de este método que ha suscitado más controversia es el uso de espectros elásticos altamente amortiguados para la definición de la demanda sísmicas. A pesar de que el método propone la modificación de los factores de reducción atendiendo a tres categorías que contemplan el comportamiento estructural histerético (K_1 – perfecto, K_2 – intermedio y K_3 – deficiente), para algunos autores suelen ser demasiado elevados y, por ende, demasiado conservadores. Consecuentemente, también se pone en entredicho la relación existente entre el período asociado a la intersección de la capacidad y la demanda altamente amortiguada, con la respuesta dinámica del sistema inelástico.

Este método contempla, a su vez, tres procedimientos iterativos: A, B y C, que difieren principalmente en la manera de obtener los resultados. Los procedimientos A y B son los más claros y convenientes para ser programados, mientras que el procedimiento C es un método puramente gráfico.

El punto de desempeño se calcula mediante un proceso iterativo en que se proponen y validan posibles puntos de desempeño. Cada iteración conlleva: **1)** el cálculo de una representación bilineal actualizada, cuya área es equivalente a aquella obtenida de la curva de capacidad original en formato aceleración-desplazamiento, manteniendo la rigidez inicial del tramo elástico; y **2)** la reducción del espectro de respuesta elástico amortiguado al 5% a través de los factores de reducción de velocidad y de aceleración, *SRV* y *SRA*, por sus siglas en inglés, respectivamente.

El proceso anterior se repite hasta cumplir con unos valores mínimos de precisión establecidos por la misma metodología.

Método N2

El método *N2* fue propuesto por los Profesores Peter Fajfar y Matej Fishinger a finales de la década de 1980 (Fajfar & Fischinger, 1987, 1988), y en las décadas posteriores fue madurado y actualizado (Gašperšič *et al.*, 1992; Fajfar & Gašperšič, 1996; Fajfar, 1999; Fajfar *et al.*, 2004; Kreslin & Fajfar, 2012).

El método *N2* (Fajfar & Gašperšič, 1996) original fue adoptado, inicialmente, por el Eurocódigo 8 (CEN, 2004), y combina el análisis estático no lineal de un sistema de *MGDL* con el análisis del espectro de respuesta de un sistema equivalente de *IGDL*. La mayor diferencia con el método del espectro de capacidad reside en el uso de un espectro de respuesta de demanda inelástico, el cual se determina indirectamente de un espectro de respuesta de demanda elástico por medio del uso de algunos factores de reducción (Fajfar, 2000).

La representación bilineal del espectro de capacidad (sistema equivalente de *IGDL*) considera el desplazamiento y aceleración espectrales correspondientes al punto máximo del cortante basal como el punto último de capacidad.

Este método no considera la posibilidad de que ocurra ningún tipo de endurecimiento o ablandamiento en el tramo inelástico.

Es importante recalcar que, ya que el método N2 es, de hecho, una variante del método del espectro de capacidad (*MEC*) basado en un espectro inelástico, ambas metodologías comparten algunos pasos idénticos, mientras que otros presentan modificaciones o cambios específicos que caracterizan al método N2.

EC8

Originalmente, el método incluido en el *Eurocódigo 8* (CEN, 2004; Eurocode-8-1, 2004; Eurocode-8-3, 2005) fue el método N2, no obstante, con el paso del tiempo sufrió modificaciones relacionadas, principalmente, con la representación elasto-plástica bilineal de la capacidad.

Las consideraciones referentes a la obtención del punto último y la ocurrencia de endurecimiento o ablandamiento en el tramo inelástico son similares a las adoptadas en el método N2.

En lo que respecta a la obtención de la demanda se emplea un espectro de respuesta inelástico.

NTC-08

Este método se incluye dentro del Código de Construcción Italiano (C.S.LL.PP., 2008). El procedimiento propone una representación bilineal elasto-plástica capaz de tomar en cuenta la pérdida de resistencia después del punto máximo de la misma.

La demanda se calcula mediante un espectro de respuesta inelástico.

La representación bilineal considera como punto último de la capacidad el desplazamiento espectral asociado al desplazamiento máximo del techo.

Este procedimiento considera la posibilidad de endurecimiento o ablandamiento del tramo inelástico.

Ajuste al 10%

Propuesto por De Luca *et al.* (2013a), este procedimiento varía principalmente con respecto a los otros métodos en el cálculo de la pendiente el tramo elástico para la representación bilineal.

Tiene como principal objetivo reducir el error introducido en los análisis estáticos no lineales convencionales mediante un ajuste lineal por tramos de la curva de capacidad.

El método pretende que la intersección entre la curva de capacidad original y el segmento elástico ajustado ocurra en el punto donde se alcanza el 10% del cortante basal máximo, con la intención de capturar la rigidez inicial de una mejor manera.

El método determina, a continuación, un segmento plástico en función del valor del esfuerzo máximo (*i.e.* cortante basal máximo), ignorando con ello el equilibrio de energías, tal como hacen otras metodologías (De Luca *et al.*, 2013b). Estas consideraciones, así como las referentes al endurecimiento o ablandamiento del tramo inelástico son las mismas que se emplean en N2 y EC8.

En cuanto al cálculo de la demanda, se emplea un espectro de respuesta inelástico.

3.2.2.2 Curvas de capacidad

Como se mencionó anteriormente, los análisis estáticos no lineales o *pushover* se han convertido en una de las herramientas más comunes en la evaluación sísmica de estructuras existentes y nuevas.

El resultado común de un análisis de este tipo es la denominada curva de capacidad (*i.e.* curva *pushover*), la cual cuantifica la fluencia secuencial a la que se ven sometidos los diferentes miembros que componen el sistema estructural sometido a un patrón de cargas monotónicamente crecientes predefinido.

La respuesta en cada incremento de carga se calcula y grafica en función de las fuerzas reactivas (*i.e.* cortante basal, V_{base}) y un parámetro de deformación (*i.e.* desplazamiento en el techo, Δ_{techo}) previamente definido. La curva queda, por tanto, descrita por una serie de puntos obtenidos en cada paso del análisis, que, a su vez, se unen por medio de segmentos de recta, resultando en una curva más o menos dentada, según sea el caso (Fig. 3-3).

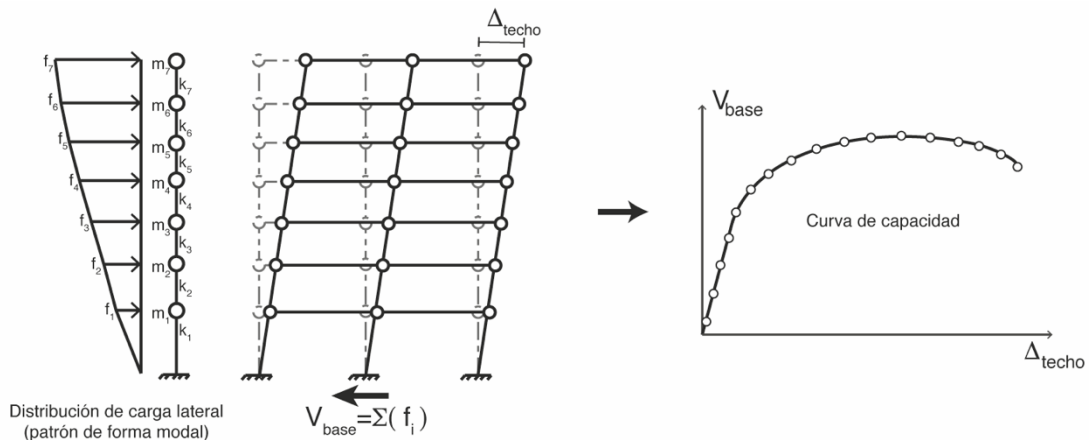


Fig. 3-3 Obtención de la curva de capacidad de una estructura sometida a una carga lateral monotónicamente creciente (fuente: elaborado por el autor)

Adicionalmente, el patrón de carga, a su vez, puede también variar en su definición y aplicación, existiendo diferentes posibilidades. Dentro de las formas de patrones de carga más comunes podemos mencionar (Fig. 3-4):

- Uniforme (*i.e.* rectangular).
- Triangular.
- Modal.

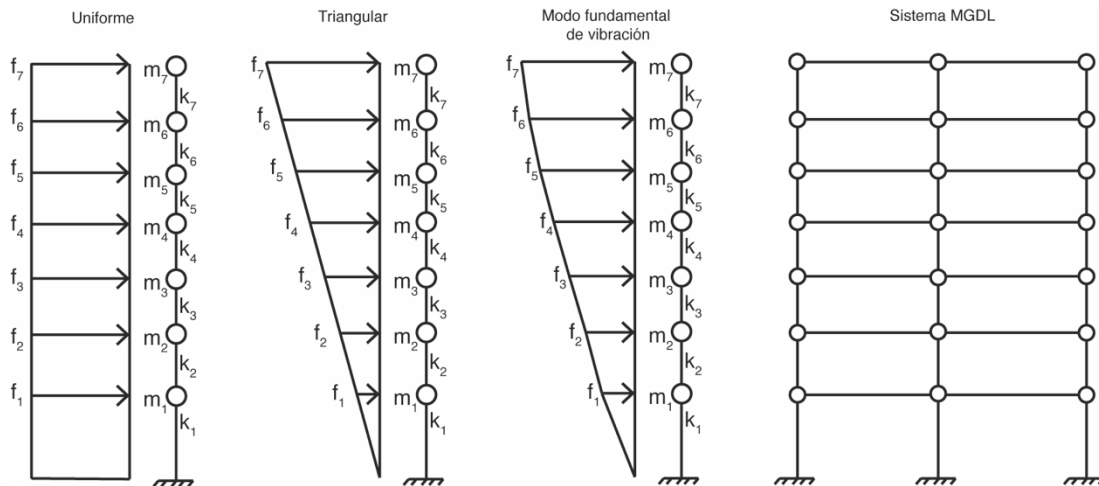


Fig. 3-4 Principales formas de patrones de carga que pueden ser aplicados a un sistema MDGL (fuente: preparada por el autor)

Por otro lado, respecto a la manera de actualizar el patrón de cargas que ha de aplicarse en la estructura en cada paso del análisis se pueden identificar tres principales grupos de procedimientos: **1)** vectores de carga invariantes; **2)** vectores multimodales invariantes; y **3)** vectores de carga adaptativos (Kalkan & Kunnath, 2008).

Los procedimientos correspondientes al primer grupo aplican patrones de carga preestablecidos y monotónicamente crecientes. Estos métodos no tienen en cuenta la contribución de modos superiores en la respuesta ni posibles efectos inelásticos en algunas estructuras.

Para superar estas desventajas, y a pesar del hecho de que los vectores de carga invariante son aún ampliamente utilizados, los procedimientos del segundo grupo consideran la combinación de distintos vectores de carga, los cuales se derivan, a su vez, de las formas modales.

Los procedimientos del tercer grupo consideran una actualización progresiva de los vectores de carga a medida que las propiedades modales del sistema cambian durante la fase inelástica en cada incremento de carga.

Para este trabajo, los análisis pushover fueron realizados para ambas direcciones de las componentes horizontales principales de la estructura, *X* e *Y*. Así mismo, se seleccionó un patrón de carga lateral invariante cuya forma modal se corresponde con el primer modo de vibración fundamental de la estructura, el cual gobierna el comportamiento de esta, al activar la mayoría de la masa en ambas direcciones de interés.

3.2.2.3 Criterios de selección del punto último

Una de las principales dificultades en el análisis de estructuras es la elección del punto último de la curva de capacidad (*i.e.* pushover), a partir del cual, se considera que el sistema estructural ha agotado su capacidad resistente (*i.e.* colapso). Después de alcanzar este punto se asume la posibilidad de algunas deformaciones posteriores sin ninguna disminución de estabilidad, sin embargo, se considera que el sistema es incapaz de proveer alguna resistencia adicional a fuerzas sísmicas laterales (FEMA/NIBS, 1999; HAZUS, 2012).

Ensayos experimentales de laboratorio e in-situ disponibles, así como diversos trabajos que pueden encontrarse en la literatura (Kappos, 1997; Dolce *et al.*, 2006; Kappos *et al.*, 2006; Bal *et al.*, 2008; Barbat *et al.*, 2012; D'Ayala *et al.*, 2015; Kappos & Papanikolaou, 2016) confirman que las incertidumbres (*i.e.* variabilidad) asociada a la definición de diferentes puntos a lo largo de la curva de capacidad (pushover) aumenta a manera que el rango no-lineal se extiende.

Para la selección del punto último de las diversas curvas de capacidad de las estructuras analizadas en este trabajo se han considerado, inicialmente, dos criterios: 1) el decaimiento del 20% del cortante basal máximo, tal como proponen y utilizan diversos códigos (CEN, 2004; C.S.LL.PP., 2008) y autores (Panagopoulos *et al.*, 2010; Allen *et al.*, 2013; Cattari & Lagomarsino, 2013; Bento *et al.*, 2016; Rossetto *et al.*, 2016), respectivamente; y 2) el procedimiento del modelo paramétrico desarrollado por Pujades *et al.*, y explicado en Pujades *et al.* (2015).

El criterio del decaimiento del 20% tiene un objetivo general, sin tomar en cuenta los diferentes materiales o tipologías constructivas. Por el contrario, el procedimiento del modelo paramétrico ha de ser adaptado y calibrado específicamente para la tipología constructiva de interés.

La calibración del modelo paramétrico para la tipología de mampostería no reforzada se llevó a cabo a partir de las observaciones realizadas en 50 de las curvas de capacidad obtenidas para las distintas estructuras analizadas en este trabajo. Lo anterior permitió determinar los valores de la diferencia de

pendientes de puntos consecutivos de las distintas curvas que, una vez sobrepasados, indican la pérdida irrecuperable de capacidad/resistencia estructural y, por ende, el colapso parcial o total de la misma.

Finalmente, la selección del punto último en este trabajo se lleva a cabo mediante la combinatoria de los dos criterios anteriores, donde el punto último se determina mediante el uso de un criterio de mínimo valor (*i.e.* primero en ocurrir – valor más bajo).

Es importante hacer hincapié en que el criterio de selección considerado contempla el comportamiento global del edificio sin tomar en cuenta el tipo, localización o participación de cada elemento individual o grupo de elementos que conforman la estructura. Lo anterior puede derivar en una sobrestimación de la capacidad remanente de toda la estructura con respecto de aquella asociada a fallos individuales o localizados. Distintas propuestas, en los que la estructura y sus componentes son analizados a menores escalas, se encuentran disponibles en la literatura (*e.g.* procedimiento multiescala - Lagomarsino & Cattari (2015a, 2015b))

3.2.2.4 El espectro de capacidad

Con la finalidad de poder comparar la capacidad con la demanda, la curva de capacidad ha de transformarse a su correspondiente espectro de capacidad.

La transformación al espectro de capacidad tiene como objetivo obtener un sistema equivalente de un grado de libertad (IGDL) a partir del análisis pushover llevado a cabo sobre el sistema original de múltiples grados de libertad (MGDL) (Fig. 3-5).

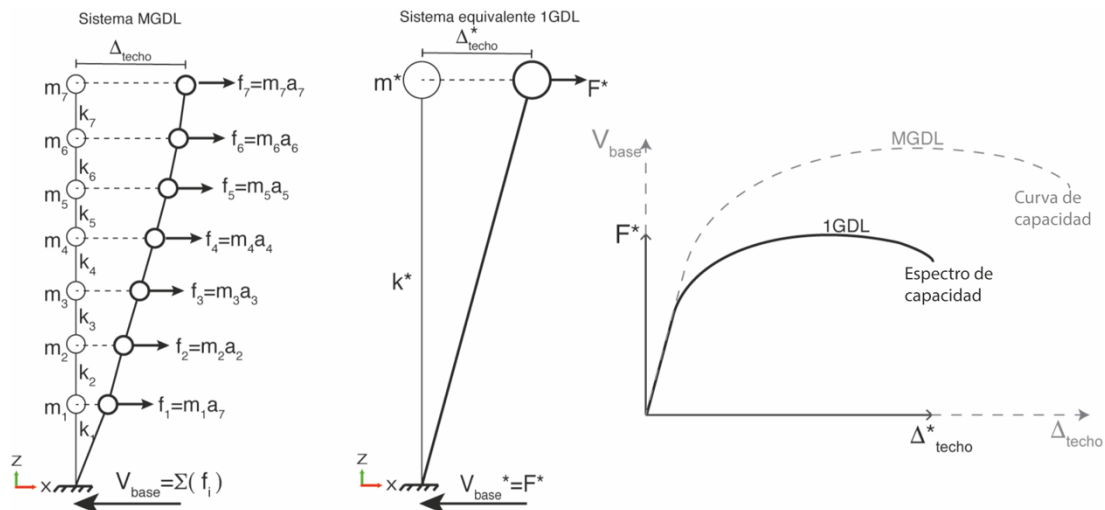


Fig. 3-5 Transformación de la curva de capacidad (sistema original de MGDL) a espectro de capacidad (sistema equivalente de 1GDL [indicado con un *]) (fuente: preparado por el autor)

Lo anterior se lleva a cabo mediante el uso de algunos coeficientes y factores relacionados con las propiedades modales y de masa de la estructura, así como de las distintas formulaciones asociadas al procedimiento estático no lineal seleccionado. No obstante, cabe resaltar que, a pesar de derivarse de formulaciones distintas según el procedimiento elegido, los espectros de capacidad resultantes son similares.

ATC-40

Los factores empleados en la transformación de la curva en el espectro de capacidad corresponden a aquellos descritos en el procedimiento A del capítulo 8 del ATC-40, y que se detallan a continuación:

$$PF_1 = \frac{\left[\frac{\sum_{i=1}^N (w_i \cdot \phi_{i1})}{g} \right]}{\left[\frac{\sum_{i=1}^N (w_i \cdot \phi_{i1}^2)}{g} \right]} \quad (3-1)$$

$$\alpha_1 = \frac{\left[\frac{\sum_{i=1}^N (w_i \cdot \phi_{i1})}{g} \right]^2}{\left[\frac{\sum_{i=1}^N w_i}{g} \right] \cdot \left[\frac{\sum_{i=1}^N (w_i \cdot \phi_{i1}^2)}{g} \right]} \quad (3-2)$$

$$S_d = \frac{\Delta_{techo}}{PF_1 \cdot \phi_{techo,1}} \quad (3-3)$$

$$S_a = \frac{V/W}{\alpha_1} \quad (3-4)$$

donde:

- PF_1 es el factor de participación modal del primer modo natural, escala unitaria.
- α_1 es el coeficiente de masa modal del primer modo natural, escala unitaria.
- w_i/g es la masa del nivel i , en toneladas.
- ϕ_{i1} es la amplitud del modo 1 en el nivel i , normalizado respecto al nivel N , escala unitaria.
- N es el nivel N , máximo nivel de la estructura.
- V es el cortante basal.
- W es la carga muerta más carga viva del edificio, en kilonewtons.
- Δ_{techo} es el desplazamiento en punto de control en el techo, en centímetros.
- S_d es el desplazamiento espectral, en centímetros.
- S_a es la aceleración espectral, en g .

Adicionalmente, cabe mencionar que el *ATC-40* considera que la respuesta predominante de la estructura es su modo fundamental de vibración (*i.e.* primer modo - Fig. 3-6 izq.) y que, por tanto, un patrón de carga lateral invariante de forma modal es aplicado monotónicamente a la estructura.

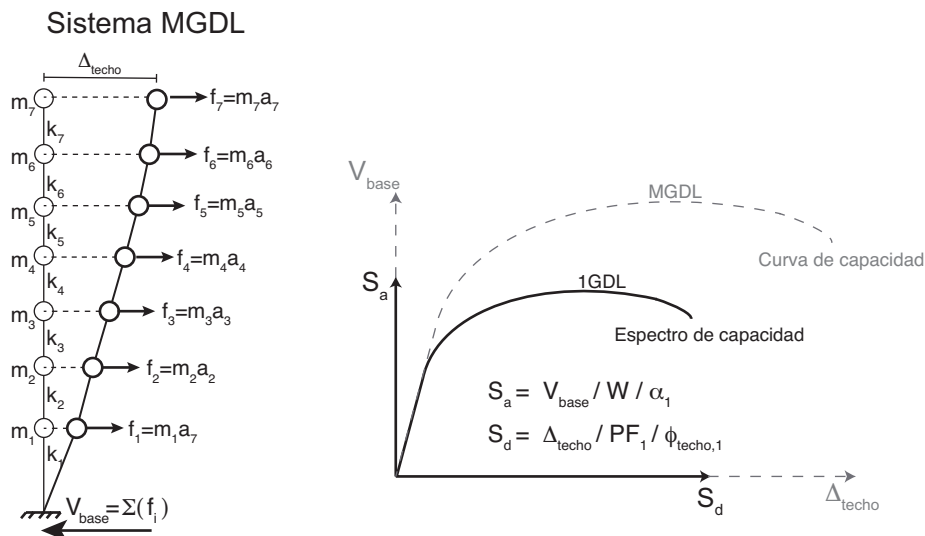


Fig. 3-6 Relaciones propuestas en el *ATC-40* para la obtención de espectros de capacidad a partir de la curva de capacidad del sistema de MGDL (fuente: preparado por el autor)

Tal como se lleva a cabo en el método del espectro de capacidad (*MEC*), las fuerzas cortantes de la base, V_{base} , y los desplazamientos en el techo, Δ_{techo} , del sistema de múltiples grados de libertad se transforman a un sistema equivalente de 1GDL. No obstante, en contraste con el *MEC*, en el cual el sistema de 1GDL se transforma directamente al formato aceleración-desplazamiento, en el resto de las metodologías se transforma primeramente el sistema de MGDL en un sistema de 1GDL con unidades de fuerza-deformación (Fig. 3-7).

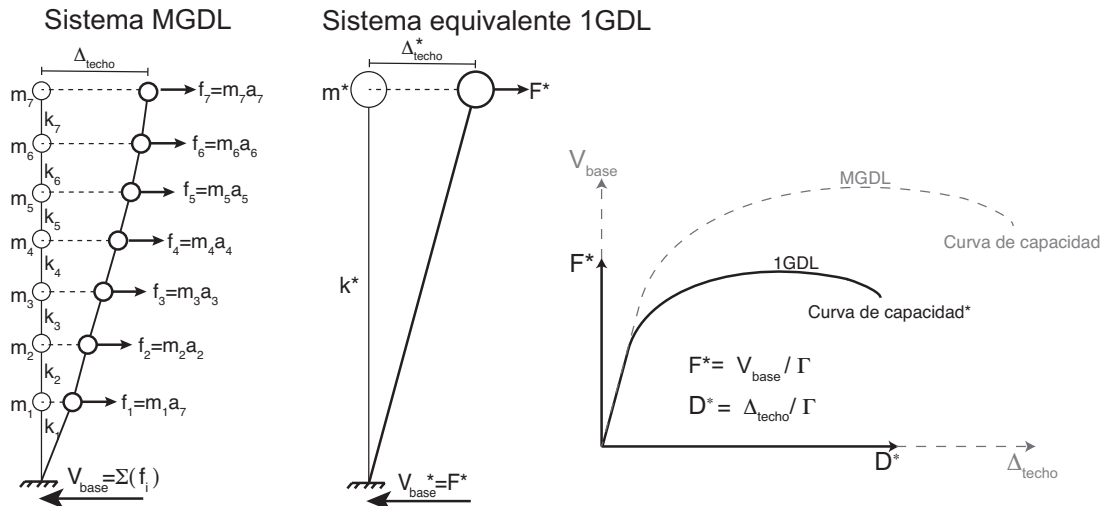


Fig. 3-7 Transformación de la curva de capacidad (sistema original de MGDL) a un sistema equivalente con unidades de fuerza-deformación (fuente: preparado por el autor)

Esto se lleva a cabo mediante las siguientes relaciones:

$$F^* = \frac{V_{base}}{\Gamma} \quad (3-5)$$

$$D^* = \frac{\Delta_{techo}}{\Gamma} \quad (3-6)$$

donde F^* y D^* son la fuerza y el desplazamiento del sistema equivalente de 1GDL, respectivamente, y Γ es el factor de participación modal (análogo al PF_I empleado en el método ATC-40), y que se define como:

$$\Gamma = \frac{\sum m_i \cdot \phi_i}{\sum m_i \cdot \phi_i^2} = \frac{m^*}{\sum m_i \cdot \phi_i^2} \quad (3-7)$$

donde m^* es la masa equivalente del sistema de 1GDL:

$$m^* = \sum m_i \cdot \phi_i \quad (3-8)$$

Finalmente, el sistema de 1GDL se transforma a unidades de aceleración-desplazamiento mediante:

$$S_d = \frac{F^*}{m^*} \quad (3-9)$$

$$S_a = D^* \quad (3-10)$$

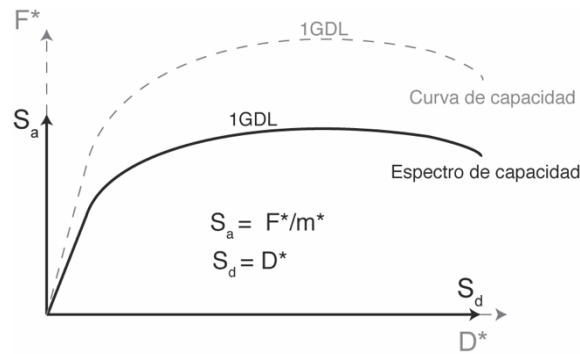


Fig. 3-8 Relaciones propuestas en el N2 para la obtención de espectros de capacidad a partir de la curva de capacidad del sistema de MGD (fuente: preparado por el autor)

3.2.2.5 La representación bilineal

El siguiente paso consiste en ajustar la curva de capacidad original del sistema mediante una aproximación lineal por partes, la cual facilitará la comparativa entre la capacidad y la demanda (*i.e.* obtención del punto de desempeño de la estructura, ver 3.5.1). Esta aproximación puede ser multilineal, siendo muy comunes las aproximaciones bilineales.

Los pasos y criterios seguidos para la obtención de esta representación dependerán directamente del procedimiento estático no lineal seleccionado, existiendo diferencias, tales como el cálculo del tramo elástico, los puntos de fluencia y últimos, el uso de procesos iterativos, la existencia o ausencia de endurecimiento y ablandamiento en los tramos inelásticos, entre otras. Sin embargo, en general la mayor parte de las metodologías siguen el criterio de equilibrio de energía (*i.e.* igualdad de áreas) entre la curva original y su representación multilineal (Fig. 3-9).

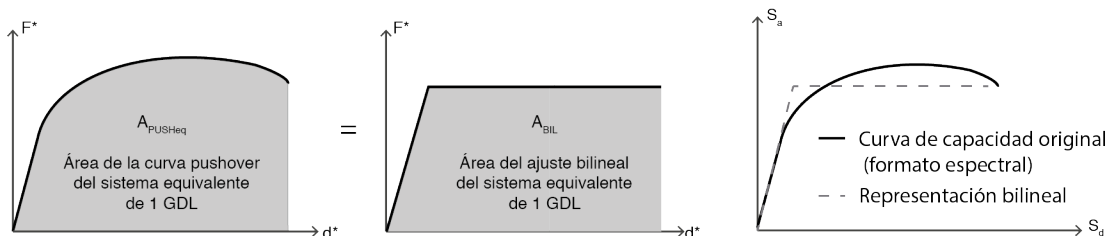


Fig. 3-9 Criterio de igualdad de áreas para la obtención de la representación bilineal de la capacidad de la estructura (fuente: preparado por el autor)

ATC-40

Esta metodología considera un procedimiento iterativo que ha de repetirse cuantas veces sea necesario hasta conseguir convergencia en los resultados según los límites previamente seleccionados.

Como paso inicial para la obtención de la representación bilineal se extiende una recta desde el origen de la curva de capacidad con la pendiente del tramo elástico. A continuación, se trazan rectas con diferente pendiente desde el punto de prueba seleccionado (PP) hasta cruzar con la recta prolongada del tramo elástico trazada previamente. Lo anterior se repite hasta encontrar la recta cuya pendiente permite obtener la igualdad de áreas (Fig. 3-10).

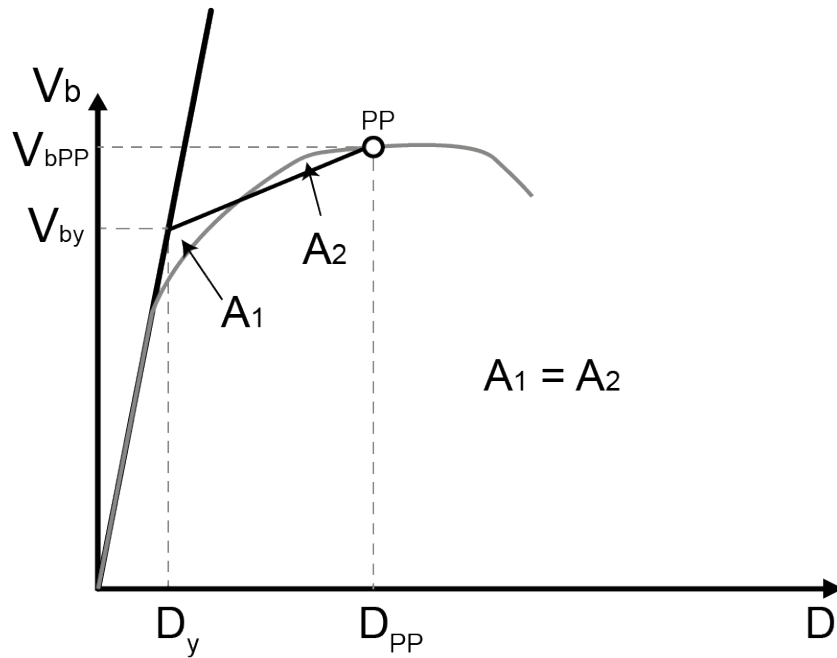


Fig. 3-10 Ajuste bilineal de la curva de capacidad según ATC-40 | EC8 (fuente: preparado por el autor)

N2 | EC8

Ambas metodologías consideran un procedimiento no iterativo para la consecución de la representación bilineal, asumiendo un comportamiento elasto-plástico perfecto para el tramo plástico del sistema equivalente de un grado de libertad, es decir, sin posibilidad de que exista ablandamiento o endurecimiento en el tramo inelástico. Lo anterior se basa en el equilibrio de áreas por encima (A1) y debajo (A2) del ajuste bilineal como se puede apreciar en la Fig. 3-11.

El ajuste bilineal se lleva a cabo hasta el punto donde ocurre la formación de un mecanismo plástico, asumiendo, como tal, al punto de máxima fuerza (F_{max}^*), que, en este caso, será igual que el punto de fluencia (F_y^*) (Dolšek, 2008).

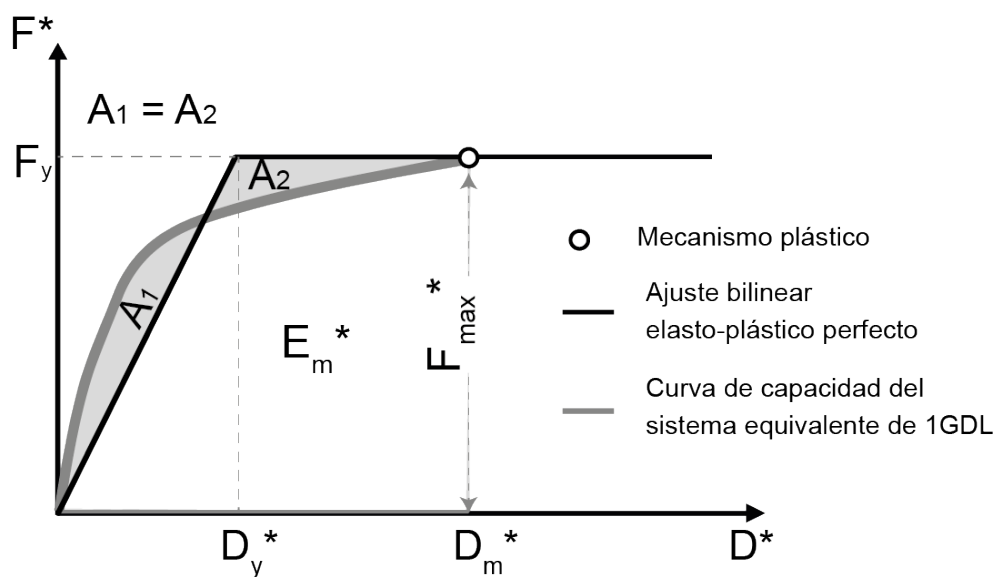


Fig. 3-11 Ajuste bilineal de la curva de capacidad según N2 | EC8 (fuente: preparado por el autor)

El desplazamiento de fluencia (D_y^*) se determina analíticamente a partir del equilibrio de áreas y la energía de deformación (E_m^*) hasta el desplazamiento donde ocurre el mecanismo plástico (D_m^*):

$$D_y^* = 2 \cdot \left(D_m^* - \frac{E_m^*}{F_y^*} \right) \quad (3-11)$$

Ajuste al 10%

Esta metodología define un comportamiento elasto-plástico perfecto y asume que la parte elástica de la representación bilineal corta a la curva de capacidad cuando se alcanza el 10% de la fuerza máxima ($0.10 \cdot F_{max}^*$). Adicionalmente, se considera que la fuerza de fluencia (F_y^*) y fuerza máxima (F_{max}^*) coinciden, calculando el tramo inelástico hasta el punto donde ocurre dicha fuerza máxima.

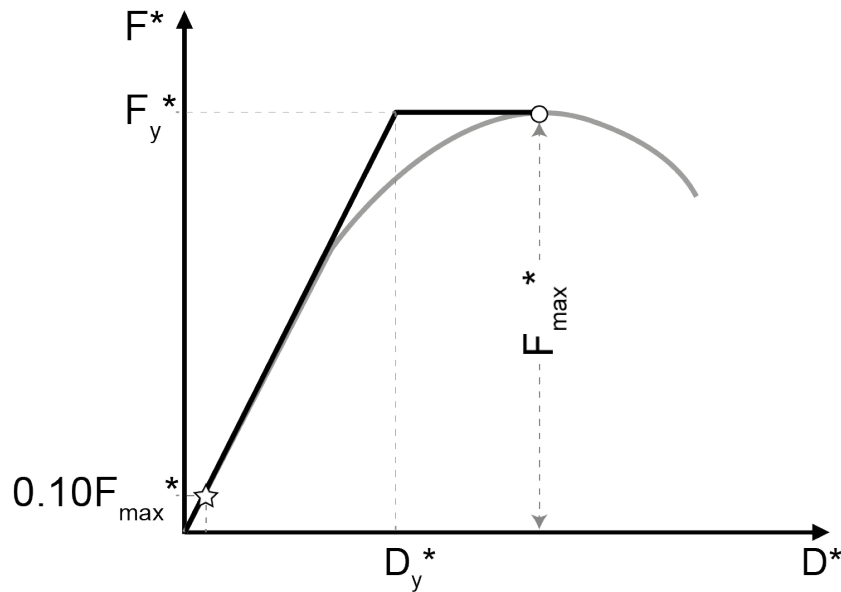


Fig. 3-12 Ajuste bilineal de la curva de capacidad según la Aproximación del 10% (fuente: preparado por el autor)

NTC-08

Similar a lo que ocurre para la metodología del Ajuste al 10%, se asume que la parte elástica de la representación bilineal corta a la curva de capacidad cuando se alcanza el 60% de la fuerza máxima (F_{max}^*). No obstante, esta metodología considera la posibilidad de ablandamiento o endurecimiento en el tramo inelástico, con lo cual el punto, a partir del cual se traza la meseta del tramo inelástico (*i.e.* punto de fluencia, F_y^*), no necesariamente coincide con el punto de fuerza máxima. El punto de desplazamiento último de la curva de capacidad se considera como el punto final del tramo inelástico.

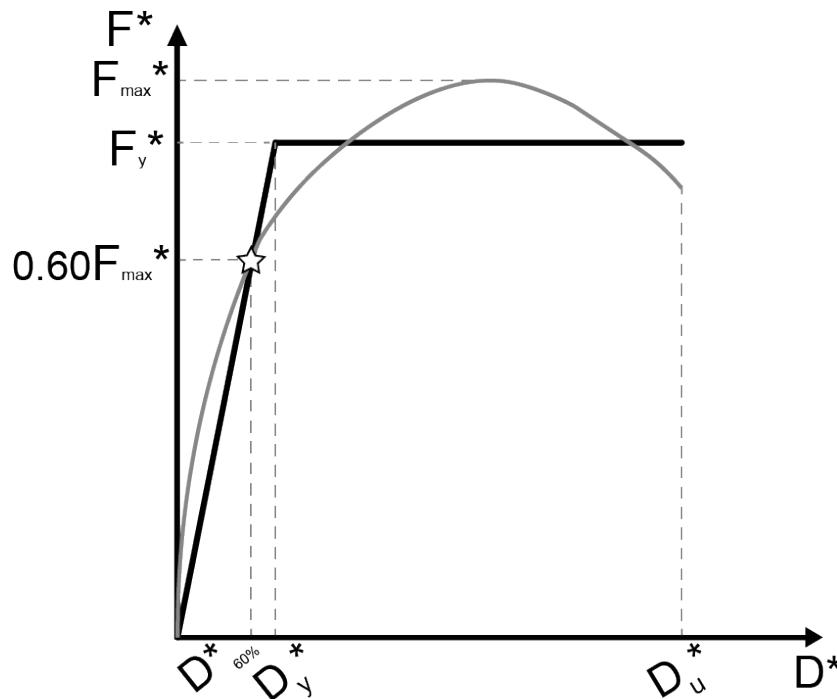


Fig. 3-13 Ajuste bilineal de la curva de capacidad según NTC-08 (fuente: preparado por el autor)

3.3 Las acciones sísmicas

Tal como se mencionó en el apartado 2.2, la selección de una demanda adecuada para la zona de interés atiende diversos criterios, con la finalidad de caracterizar adecuadamente los posibles movimientos sísmicos esperables. Los posibles espectros pueden obtenerse de códigos nacionales, regionales, normativas, así como también de estudios de microzonación más específicos llevados a cabo en dichas áreas.

3.3.1 Espectros de respuesta

De acuerdo con el procedimiento estático no-lineal empleado, el espectro de respuesta a utilizarse puede variar entre un espectro sobre amortiguado de tipo elástico o un espectro inelástico de respuesta.

En el caso del procedimiento descrito dentro del documento ATC-40, los espectros a utilizarse son de tipo elástico, los cuales habrán de ser reducidos por una serie de factores de amortiguamiento calculados de acuerdo con punto de prueba seleccionado. Algunos estudios han demostrado que dicho procedimiento deriva en el uso de espectros sobre-amortiguados, lo cual ha sido motivo para que otros procedimientos opten por el uso de espectros inelásticos obtenidos a partir de expresiones simplificadas que toman en cuenta aspectos como el periodo de vibración de la estructura o la ductilidad de la misma (Chopra & Goel, 1999; Fajfar, 1999; Freeman, 2004; Casarotti *et al.*, 2009).

3.3.1.1 Elásticos

De acuerdo con la normativa o estudio de zonación empleado, los espectros de respuesta elástica se definen en base a una serie de formulaciones (ver 2.2) que toman en cuenta diversos parámetros relacionados con el terreno, la aceleración pico de este y, el porcentaje de amortiguamiento esperado, entre otros parámetros. En base a ello, los espectros de respuesta elásticos se grafican en formato tiempo-aceleración espectral (T vs. S_{ae}).

A fin de convertirlos al formato de aceleración-deformación (*i.e.* formato espectral o ADRS – ver 3.3.1.3) se emplea la siguiente expresión (Fig. 3-14):

$$S_a = \left(\frac{T}{2 \cdot \pi} \right)^2 \cdot S_d \quad (3-12)$$

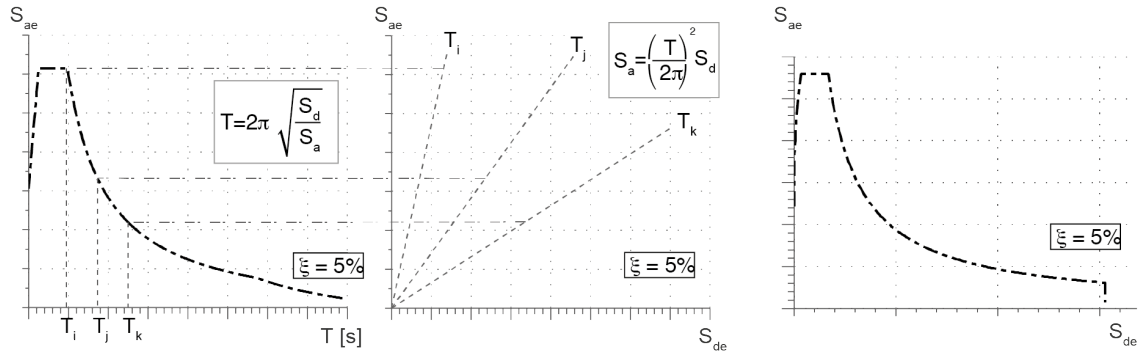


Fig. 3-14 Conversión del espectro elástico de respuesta de su formato T vs. Sa, al formato ADRS (Sd vs. Sa) (fuente: preparado por el autor)

Como se muestra en el apartado 2.2, los espectros específicos de la ciudad para la Zona II de Barcelona serán empleados para este trabajo, al ser los correspondientes a la zona de estudio (distrito de L'Eixample).

3.3.1.2 Inelásticos

Para el cálculo del espectro inelástico de respuesta se selecciona el espectro elástico de interés y se transforma al formato aceleración-desplazamiento de acuerdo con la ec. (3-12).

Con la finalidad de transformar el espectro elástico de respuesta en uno de tipo inelástico, y convertirlo a su vez al formato espectral de aceleración-desplazamiento (Fig. 3-15), han de calcularse el factor de reducción, R_μ , la ductilidad, μ , y el periodo de vibración de la estructura, T . Lo anterior se lleva a cabo mediante el uso de las siguientes expresiones (Fajfar, 1999):

$$S_a = \frac{S_{ae}}{R_\mu} \quad (3-13)$$

$$S_d = \frac{\mu}{R_\mu} \cdot S_{ae} = \frac{\mu}{R_\mu} \cdot \frac{T^2}{4 \cdot \pi^2} \cdot S_{ae} = \pi \cdot \frac{T^2}{4 \cdot \pi^2} S_a \quad (3-14)$$

$$R_\mu = (\mu - 1) \cdot \frac{T^*}{T_C} + 1 \quad \left. \begin{array}{l} T^* < T_C \\ T^* \geq T_C \end{array} \right\} \quad (3-15)$$

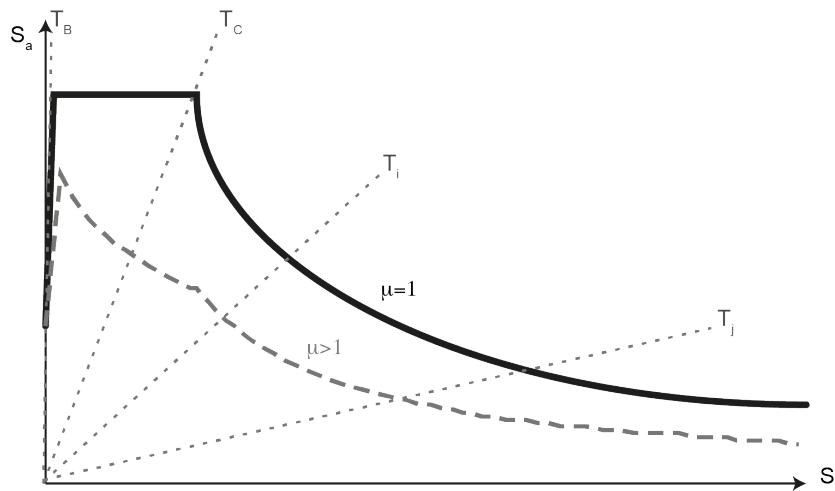


Fig. 3-15 Espectro de demanda para ductilidad constante en formato aceleración-desplazamiento (fuente: preparado por el autor)

3.3.1.3 El formato aceleración-desplazamiento (ADRS)

Como se ha mencionado anteriormente en diversos apartados, con el fin de encontrar la relación existente entre la curva correspondiente a la capacidad de la estructura y el espectro de demanda ante el cual se ve sometida dicha estructura, es necesario que dicha comparativa se lleve a cabo en el mismo formato.

Lo anterior se lleva a cabo mediante la conversión de ambas curvas en el denominado formato aceleración-desplazamiento, o, como también es conocido, por sus siglas en inglés: *ADRS* (Acceleration Displacement Response Spectra).

De acuerdo con el procedimiento estático no-lineal empleado, la conversión de la parte correspondiente a la capacidad se lleva a cabo mediante el uso de factores de conversión calculados a partir de diversos parámetros obtenidos de los análisis modales, así como de otras características de la estructura (ver 3.2.2.4).

Por el otro lado, en lo correspondiente a la componente de demanda, la conversión al formato aceleración-desplazamiento dependerá de si se trata de espectros de tipo elástico o inelástico, para los cuales habrán de calcularse una serie de factores relacionados con aspectos como la ductilidad o el amortiguamiento de la estructura (ver 3.3.1).

3.3.2 Acelerogramas y acelerogramas compatibles

3.3.2.1 El método del espectro condicional (CS)

La comparativa entre predicciones numéricas y daños estructurales observados se ve dificultada debido a la poca información disponible al respecto. Adicionalmente, la tipología y los eventos sísmicos registrados en España no se corresponden con aquellos esperados en Barcelona, teniéndose, por tanto, disponibilidad únicamente de datos recientes.

El método del espectro condicional (*CS*, por sus siglas en inglés) (Abrahamson & Al Atik, 2010; Jayaram *et al.*, 2011; NIST, 2011) permite la obtención y selección de un conjunto de registros de aceleración del terreno (en escala logarítmica) compatibles, obtenidos de la base de datos del Centro de Investigación de Ingeniería Sísmica del Pacífico (*PEER*, por sus siglas en inglés) (PEER, 2011). Lo anterior se lleva a cabo mediante una simulación de Monte-Carlo a partir de una distribución objetivo, la

cual genera un espectro de respuesta probabilista a partir del cual se seleccionan un número predefinido de registros cuyos espectros de respuesta sean compatibles.

La compatibilidad de los valores objetivos se incrementa a medida que el número de espectros simulados por el método de Monte-Carlo aumenta. La similitud del espectro objetivo con el espectro de aceleraciones del terreno seleccionado se cuantifica mediante la sumatoria de los errores al cuadrado.

En contraste con otras metodologías, el CS no sólo compatibiliza la media de los valores objetivo, si no también la varianza de estos. Así mismo, el método permite mejorar la selección de registros mediante un proceso de optimización (*“greedy” optimization*, en inglés), el cual consiste en sustituir cualquier registro de la base de datos previamente seleccionados por alguno que reduzca las diferencias en la media y varianza entre los valores muestreados y los valores objetivos.

3.3.2.2 Criterios de selección

Tal como establecen un gran número de normativas vigentes (FEMA/NIBS, 1999; Eurocode-8-1, 2004; C.S.LL.PP., 2008), el número mínimo de espectros de respuesta que han de utilizarse en cualquier evaluación sísmica varía entre tres y siete (Hancock *et al.*, 2008).

Para este trabajo, el espectro de respuesta amortiguado al 5% del terreno tipo Zona II de Barcelona (correspondiente al distrito de L’Eixample - ver 2.2.5) fue considerado como el espectro objetivo para la selección de los siete registros horizontales de aceleración no escalados que fueron obtenidos de la base de datos sísmica PEER mediante el método del espectro condicional (Fig. 3-16). Su tratamiento y posterior escalado se detalla más adelante en este capítulo.

Cabe mencionar que aquellos registros sísmicos de tipo sintético dentro de la base de datos sísmica PEER fueron excluidos dentro del procedimiento de selección.

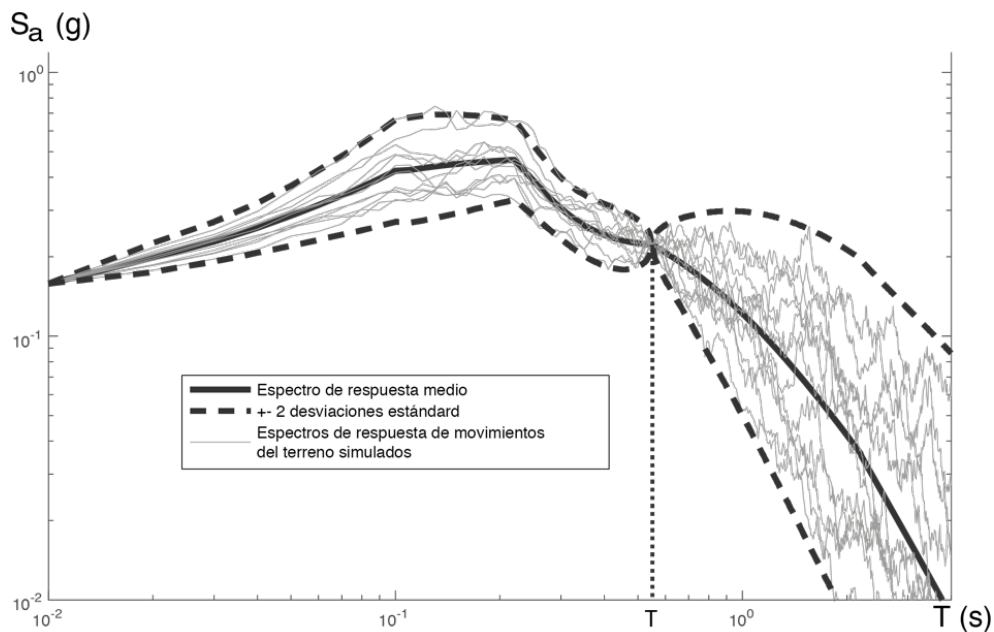


Fig. 3-16 Selección de registros de aceleración del terreno mediante el método del espectro condicional (fuente: preparado por el autor)

3.4 Amortiguamiento

Todas las estructuras presentan, en mayor o menor medida, una pérdida energética durante su movimiento. Dicha pérdida de energía puede asociarse a tres principales orígenes: **1)** la no-linealidad de sus componentes; **2)** la radiación de energía; y **3)** la amortiguación inherente.

En lo que respecta al amortiguamiento inherente, una de las principales fuentes está asociada con el amortiguamiento superficial (*i.e.* fricción interna o de Coulomb entre los miembros y/o conexiones de un sistema estructural con los miembros no estructurales) (Lazan, 1968; Nashif *et al.*, 1985; Kareem & Gurley, 1996).

A pesar de que diversos estudios y experimentos han demostrado que la mayoría de los mecanismos de disipación de energía a través de la estructura dependen, en mayor medida, de la amplitud de desplazamiento y no de su frecuencia (Ting & Crawley, 1992; Clough & Penzien, 2003), en la práctica se suelen utilizar los denominados modelos de *amortiguamiento viscoso* con la finalidad de reducir y simplificar el tiempo y los recursos necesarios al analizar la estructura, respectivamente.

El amortiguamiento viscoso depende de la velocidad y no del desplazamiento, quedando definido como:

$$f_d = c\dot{u} \quad (3-16)$$

donde:

- f_d (por sus siglas en inglés) es el amortiguamiento por fricción.
- c es el coeficiente de amortiguamiento.
- \dot{u} es la primera derivada del desplazamiento (*i.e.* velocidad).

La ecuación del movimiento para cualquier sistema elástico lineal de *MGDL* con amortiguamiento viscoso queda definida por:

$$M\ddot{u}(t) + C\dot{u}(t) + Ku(t) = 0 \quad (3-17)$$

donde:

- M es la matriz de masas.
- C es la matriz de amortiguamiento.
- K es la matriz de rigidez.
- $u(t)$ es el vector de desplazamientos.
- $\dot{u}(t)$ es el vector de velocidades.
- $\ddot{u}(t)$ es el vector de aceleraciones.

Ya que el amortiguamiento viscoso se utiliza para modelar linealmente el comportamiento estructural, el origen y las consecuencias de cualquier fuente de no linealidad se desconocen e ignoran.

La resolución de la ecuación del movimiento (ec. (3-17)) se lleva a cabo por medio del análisis modal, para el cual los coeficientes de amortiguamiento se pueden calcular a través del denominado método de Rayleigh (Rayleigh, 1877), también conocido como modelo de amortiguamiento proporcional o clásico.

El amortiguamiento de Rayleigh se expresa mediante una combinación lineal de las matrices de masa, M , y rigidez, K , como se muestra a continuación:

$$C = \alpha M + \beta K \quad (3-18)$$

donde:

- α es una constante.
- β es una constante.

La participación de la masa modal de la estructura se reduce a medida que el número de modos se incrementa (e.g. 65% en el primer modo, 15% en el segundo modo, 10% en el tercer modo, etc.). Los

modos con los que se alcanza un total del 95% de la participación de la masa se conocen como *modos significativos* y su número varía de una estructura a otra (Barbat, 1982; Priestley *et al.*, 1996; Barbat *et al.*, 2005; Fardis, 2009).

El amortiguamiento de Rayleigh es eficaz para sistemas de múltiples grados de libertad (*MGDL*), los cuales se ven reducidos a n número de ecuaciones desacopladas mediante una transformación ortogonal (Chowdhury & Dasgupta, 2003; Erduran, 2012):

$$\zeta_i = \frac{\alpha}{2\omega_i} + \frac{\beta\omega_i}{2} \quad (3-19)$$

donde:

- ζ_i es el coeficiente i de amortiguamiento.
- α es una constante.
- β es una constante.
- ω_i es la frecuencia natural i del sistema.

No es necesario ni práctico calcular el cociente de amortiguamiento para la totalidad de modos de un sistema de *MGDL* ya que solamente algunos modos contribuyen de forma significativa a su comportamiento dinámico.

Tal como puede observarse en la ec. (3-19) y la Fig. 3-17, el cociente de amortiguamiento es proporcional a las frecuencias naturales del sistema, siendo $\frac{\alpha}{2\omega}$ el término que domina cuando ω presenta valores pequeños, mientras que el término $\frac{\beta\omega}{2}$ dominará cuando se presenten valores superiores de ω , provocando, a su vez, que $\frac{\alpha}{2\omega}$ tienda a cero.

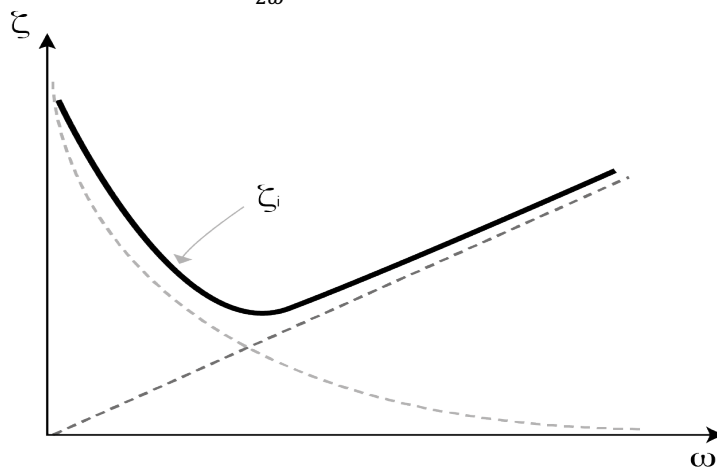


Fig. 3-17 Coeficiente de amortiguamiento vs frecuencia natural (fuente: preparada por el autor)

El amortiguamiento de Rayleigh puede definirse en una estructura de dos maneras: **1)** asumiendo que α y β no son iguales para toda la estructura, es decir, el amortiguamiento de la estructura varía para cada modo y por tanto se aplica un amortiguamiento diferente para cada uno de ellos; o **2)** los valores de α y β se asumen constantes dentro de un rango de valores adecuados y previamente definidos, aplicándose para toda la estructura.

En una gran cantidad de análisis estructurales se asume un porcentaje constante de amortiguamiento para todos los modos de la estructura, el cual se determina generalmente en base a la experiencia previa o a la literatura disponible. A pesar de que esta es una aproximación poco realista, se emplea con la

finalidad de hacer frente a la complejidad que conlleva el cálculo del porcentaje de amortiguamiento para cada modo en estructuras con un número elevado de GDL (Hall, 2006).

3.5 La respuesta sísmica

3.5.1 Punto de capacidad por demanda

La obtención del punto de capacidad por demanda -o punto de desempeño- es el objetivo final en la aplicación de los diversos métodos simplificados (*i.e.* NSP). En términos generales, el punto de desempeño se obtiene al confrontar la representación bilineal (ver 3.2.2.5) de la capacidad de la estructura obtenida a partir de un análisis estático no lineal (*i.e.* pushover) con la demanda ante la cual se ve solicitada, ambos en formato aceleración-desplazamiento.

Como se mencionó anteriormente, la utilización de los procedimientos simplificados atiende las necesidades de agilizar el proceso de análisis para estructuras de tipo normal, reduciendo la cantidad de tiempo y recursos computacionales necesarios para otros tipos de análisis más avanzados.

El procedimiento que debe seguirse para la obtención del punto de capacidad por demanda está estrechamente ligado con la metodología empleada para el análisis, teniendo así: **1)** metodologías iterativas que requieren calcular distintos parámetros y valores, consecutivamente, hasta lograr una correcta convergencia, de acuerdo con sus propios límites preestablecidos, y **2)** metodologías que se basan en una serie de formulaciones sin requerir pasos adicionales o posteriores.

El punto de desempeño obtenido para el sistema equivalente de un grado de libertad habrá de reconvertirse a su equivalente para el sistema de múltiples grados de libertad mediante el uso inverso de los factores de conversión empleados inicialmente.

El punto de desempeño suele emplearse en las curvas de fragilidad como parámetro de intensidad, IM (ver 3.6.2.1), a manera de determinar la probabilidad de ocurrencia, o curvas de fragilidad, de los distintos daños que puede sufrir, el edificio, ante determinada demanda sísmica.

ATC-40

Una vez se han obtenido el espectro de capacidad del edificio y el espectro elástico de respuesta del sismo, ambos en formato aceleración-desplazamiento, se busca intersectarlos a manera de calcular el desplazamiento objetivo (*i.e.* punto de desempeño). Este cálculo involucra una serie de sub-pasos, que resultan en un proceso iterativo, que se detalla en su totalidad en el Capítulo 8 del documento ATC-40 (1996b).

El procedimiento iterativo consiste en seleccionar un punto inicial a partir del cual se ha de generar la representación bilineal del espectro de capacidad de la estructura (ver 3.2.2.5 – ATC-40). La selección del punto inicial puede auxiliarse de criterios como el correspondiente a la aproximación lineal-equivalente (ALE), la cual consiste en prolongar el tramo elástico del espectro de capacidad hasta su cruce con el espectro elástico de demanda. Los factores de amortiguamiento y reducción resultantes de este punto de prueba han de calcularse y aplicarse al espectro de respuesta elástico de demanda (ver 3.3.1.1).

Ambas, la capacidad (en su representación bilineal) y la demanda, una vez convertidas al formato aceleración-desplazamiento, se intersectan, con la finalidad de obtener el punto de desempeño. Si el desplazamiento correspondiente al punto de cruce resultante converge dentro del rango de tolerancia preestablecido (*e.g.* $\pm 5\%$), el proceso finaliza. En caso de que la convergencia no cumpla con el rango establecido, un nuevo punto de prueba ha de establecerse y todos los pasos mencionados anteriormente habrán de repetirse hasta que el criterio de convergencia se satisfaga (Fig. 3-18).

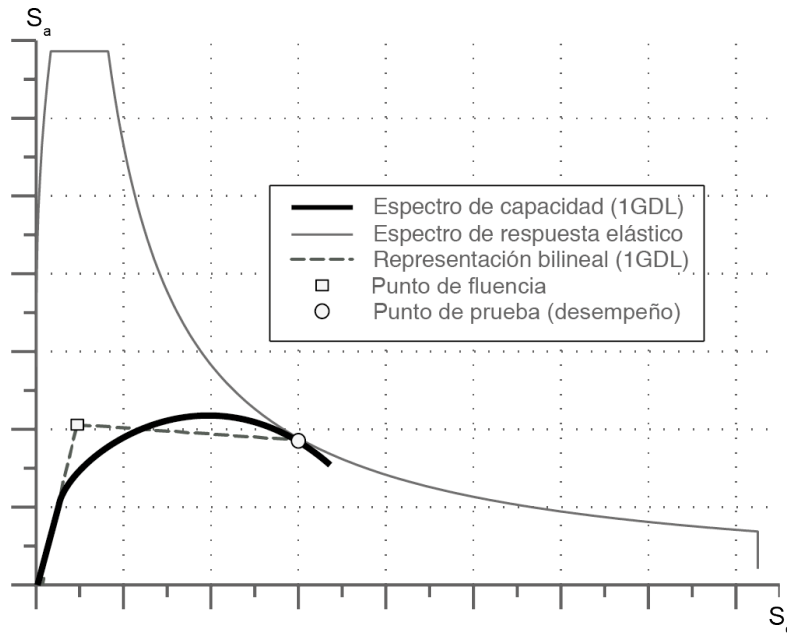


Fig. 3-18 Punto de desempeño obtenido a través del procedimiento iterativo según ATC-40 (fuente: preparado por el autor)

N2 | EC8 | Aproximación del 10% | NTC-08

La obtención de un espectro de respuesta inelástico (ver 3.3.1.2) mediante el cálculo de un factor de reducción, R_μ , permite la obtención del desplazamiento espectral asociado al desempeño de la estructura a través del uso de expresiones simplificadas que toman en cuenta la ductilidad (μ) y el periodo del sistema estructural simplificado de 1GDL (T^*):

Para rangos de periodos medianos y largos:

$$\left. \begin{aligned} \mu &= R_\mu \\ S_d &= S_{de}(T^*) \end{aligned} \right\} T^* \geq T_C \quad (3-20)$$

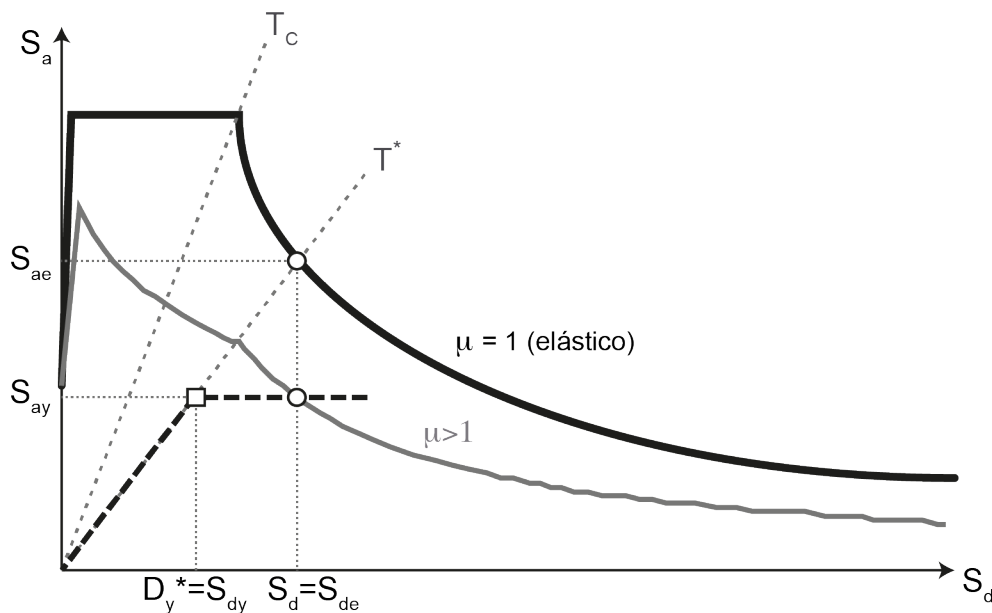


Fig. 3-19 Determinación del desplazamiento espectral objetivo para el sistema equivalente de 1GDL y rango de periodos medianos y largos (fuente: preparado por el autor)

Para rangos de periodos cortos:

$$\left. \begin{aligned} \mu &= (R_\mu - 1) \cdot \frac{T_C}{T^*} + 1 \\ S_d &= \mu \cdot D_y^* = \frac{S_{de}}{R_\mu} \cdot \left[1 + (R_\mu - 1) \cdot \frac{T_C}{T^*} \right] \end{aligned} \right\} T^* < T_C \quad (3-21)$$

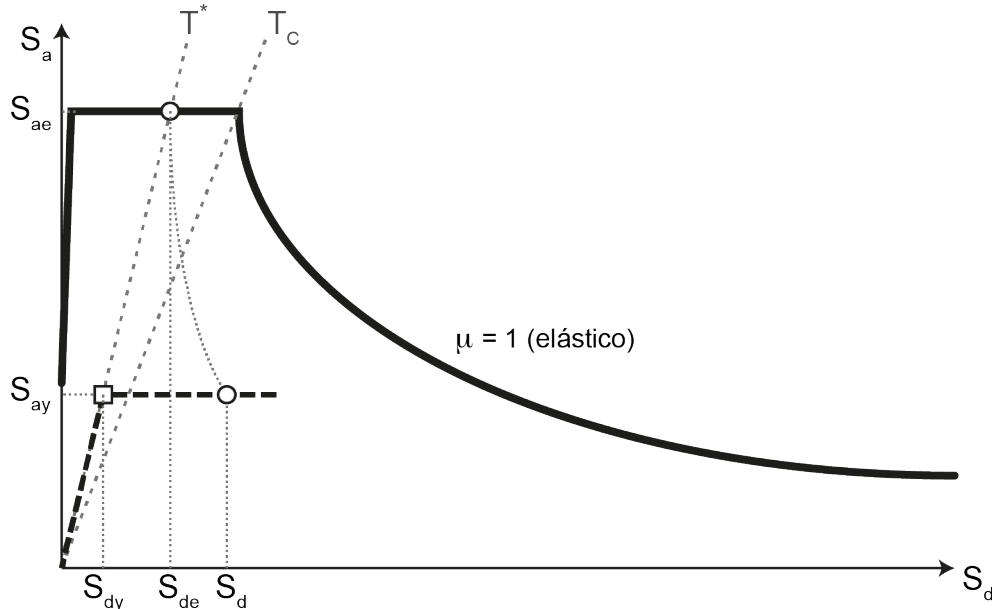


Fig. 3-20 Determinación del desplazamiento espectral objetivo para el sistema equivalente de 1GDL y rango de periodos cortos (fuente: preparado por el autor)

donde:

- μ es la ductilidad del sistema equivalente de 1GDL
- R_μ es el factor reducción por ductilidad
- T_C es el periodo que define el fin del tramo de aceleración constante del espectro elástico
- T^* es el periodo del sistema equivalente de 1GDL
- S_{de} es el desplazamiento espectral elástico

3.5.2 Análisis dinámico incremental

En años recientes, el uso de métodos de análisis más sofisticados y precisos en la evaluación del comportamiento dinámico de estructuras ha aumentado de forma importante, debido al desarrollo e incremento de la potencia y métodos computacionales, tanto en equipos (hardware) como procedimientos (software).

Propuesto por Vamvatsikos & Cornell (2002), el análisis dinámico incremental (*IDA*, por sus siglas en inglés) se ha convertido en una herramienta invaluable para la ingeniería sísmica, permitiendo la estimación del desempeño de estructuras sujetas a sollicitaciones sísmicas por medio de análisis dinámicos no-lineales, los cuales se llevan a cabo para uno o varios registros de aceleración del terreno, escalados para diferentes valores de intensidad, produciendo así resultados específicos de la respuesta dinámica de la estructura para cada uno de ellos, que posteriormente puede ser evaluada en función de un parámetro predefinido (*e.g.* desplazamiento máximo de un nodo de control en el techo de la estructura).

3.5.2.1 Cuantificación de la respuesta

Para la cuantificación de la respuesta estructural de los resultados obtenidos a partir del análisis dinámico incremental, *IDA*, se han seleccionado dos parámetros de medida de intensidad, *IM*: **1)** el desplazamiento espectral medido en un nodo de control en el techo de la estructura, S_d ; y **2)** la aceleración máxima del terreno, *PGA*.

Ambos parámetros *IM* permiten determinar la probabilidad de ocurrencia de los distintos tipos de daño esperados en una estructura ante una determinada demanda a partir de las curvas de fragilidad (ver 3.6.2.1), así como el índice de daño medio de la misma (ver 3.6.1.1). Adicionalmente, estos resultados pueden desagregarse de acuerdo con el registro sísmico de aceleraciones utilizado, permitiendo asociar los resultados obtenidos con características particulares de cada uno de estos registros.

3.6 El daño esperado

3.6.1 Grados o estados de daño

Los estados de daño, *DS* (por sus siglas en inglés), describen y clasifican el posible nivel de degradación (*i.e.* daño/destrucción) que una estructura puede presentar debido a la acción sísmica ante la cual se ve solicitada. Los estados de daño están directamente relacionados con la respuesta de los elementos estructurales y, por tanto, se pueden adoptar distintas variables de medición de acuerdo con la escala a la que se realice la evaluación (e.g. desde un elemento estructural hasta un sistema estructural complejo).

El uso de estos indicadores, y su correcta interpretación, permiten determinar el nivel de desempeño de una estructura, facilitando con ello una toma informada de decisiones y/o acciones en aspectos como el estado de ocupación, la seguridad del usuario, el costo de reparación, la posibilidad de colapso, o la capacidad residual de la estructura.

En lo que respecta a la definición de los estados límite de daño (umbrales), existe una gran variedad de opciones en la literatura (Calvi, 1999; Penelis *et al.*, 2002; Milutinovic & Trendafiloski, 2003; Kappos *et al.*, 2006; Lagomarsino & Giovinazzi, 2006; Mouyiannou *et al.*, 2014; Lagomarsino & Cattari, 2015b), las cuales pueden dividirse en dos aproximaciones principales. La primera de ellas se basa en el criterio de cuantía de desplazamientos (deformación), lo cual permite definir los diferentes estados de daño en función de los puntos de fluencia (Δ_y) y último (Δ_u) obtenidos de la representación bilineal de la curva de capacidad (pushover) en su formato aceleración-desplazamiento espectrales (ver 3.2.2.5). La segunda aproximación establece los diferentes estados de daño de acuerdo con límites de distorsión o deriva de entrepiso. A pesar de que este criterio está bien fundamentado para otros materiales constructivos y tipologías estructurales, la información y estudios referentes a estructuras de mampostería no reforzada son aún escasos.

Cada una de las opciones existentes se ha desarrollado en base a inspecciones de edificios, estudios teóricos, pruebas experimentales y juicio de expertos, tomando también en cuenta aspectos como la tipología estructural, los materiales de construcción, la localización, el año de construcción, el nivel del código de construcción y, la respuesta estructural, entre otros.

A pesar de que el daño de una estructura suele ser continuo en naturaleza (*i.e.* número ilimitado de posibles estados de daño), por simplicidad, los estados de daño suelen ser definidos como valores discretos, definidos mediante umbrales de daño. En los distintos procedimientos, guías y códigos disponibles actualmente, la formulación varía entre cuatro o cinco estados de daño (DS_1 a DS_5) y un estado nulo de daño (DS_0).

A manera de que las diferentes propuestas puedan ser comparadas entre sí se deben de definir equivalencias adecuadas. Existe un gran número de clasificaciones del daño en la literatura. Por simplicidad, se han seleccionado siete definiciones que se comparan en la Tabla 3-1.

Tabla 3-1 Definición de los estados de daño de acuerdo con diferentes criterios de definición (fuente: adaptado de Kappos & Papanikolaou (2016))

Estado de daño, DS_i	Detalle	Deriva de entrespiso		Desplazamiento de curva pushover			Resistencia a cortante	
		Calvi (1999)	Penelis <i>et al.</i> (2002)	Kappos <i>et al.</i> (2006)	Lagomarsino & Giovinazzi (2006)	Milutinovic & Trendafiloski (2003)	Mouyiannou <i>et al.</i> (2014)	Lagomarsino & Cattari (2015a) % cortante basal máximo
DS_0	Sin daño	0%	$\Delta < 0.7\Delta_y$	$\Delta < 0.7\Delta_y$	$\Delta < 0.7\Delta_y$	$\Delta < 0.7\Delta_y$		
DS_1	Daño estructural despreciable; daño no estructural ligero		$0.7\Delta_y < \Delta < 0.7\Delta_y + 0.05\Delta_{uy}$	$0.7\Delta_y \leq \Delta < \Delta_y$	$0.7\Delta_y \leq \Delta < 1.5\Delta_y$	$0.7\Delta_y \leq \Delta < \Delta_y$	Primer pilar alcanza valor de cortante máximo	≥ 50
DS_2	Daño estructural menor y/o daño no estructural moderado	0.1%	$0.7\Delta_y + 0.05\Delta_{uy} < \Delta < 0.7\Delta_y + 0.20\Delta_{uy}$	$\Delta_y \leq \Delta < 2\Delta_y$	$1.5\Delta_y \leq \Delta < 0.5(\Delta_y + \Delta_u)$	$\Delta_y \leq \Delta < (\Delta_y + \Delta_{uy})$	Deriva de entrespiso media igual a máximo cortante basal	95-100
DS_3	Daño estructural significativo y daño no estructural extenso	0.3%	$0.7\Delta_y + 0.20\Delta_{uy} < \Delta < 0.7\Delta_y + 0.50\Delta_{uy}$	$2\Delta_y \leq \Delta < 0.7\Delta_u$	$0.5(\Delta_y + \Delta_u) \leq \Delta < \Delta_u$	$(\Delta_y + \Delta_{uy}) \leq \Delta < \Delta_u$	20% de degradación del cortante basal máximo	80-90
DS_4	Daño estructural extenso y daño no estructural muy extenso	0.5%	$0.7\Delta_y + 0.50\Delta_{uy} < \Delta < 0.7\Delta_y + \Delta_{uy}$	$0.7\Delta_u \leq \Delta < \Delta_u$	$\Delta_u < \Delta$	$\Delta_u \leq \Delta$		60-70
DS_5	Colapso total o cercano a total; la reparación del edificio no es viable			$\Delta_u < \Delta$				

donde:	donde:
$\Delta_{uy} = 0.9\Delta_u - 0.7\Delta_y$	$\Delta_{uy} = 0.25(\Delta_u - \Delta_y)$

Para este trabajo, y de acuerdo al criterio de cuantía de desplazamientos y lo establecido por el proyecto RISK-UE (Milutinovic & Trendafiloski (2003) - Tabla 3-1), los estados de daño se definirán a partir de los desplazamientos espectrales de los puntos de fluencia y último, siendo estos:

- Ligero (DS_1)

$$DS_1 = 0.7Sd_y \quad (3-22)$$

- Moderado (DS_2)

$$DS_2 = Sd_y \quad (3-23)$$

- Extenso (DS_3)

$$DS_3 = Sd_y + 0.25(Sd_u - Sd_y) \quad (3-24)$$

- Colapso (DS_4)

$$DS_4 = Sd_u \quad (3-25)$$

Adicionalmente, queda implícitamente definido un quinto estado asociado al daño nulo, DS_0 .

3.6.1.1 Curvas de estado de daño medio

El procedimiento empleado para la modelización y consiguiente evaluación de la capacidad de una estructura permite también determinar el índice más adecuado para cuantificar el daño acumulado en la misma. En nuestro caso los edificios fueron modelados utilizando macro-elementos, y su capacidad fue evaluada sobre la base de un sistema equivalente de $1GDL$, por tanto, únicamente cantidades de respuesta globales y estimaciones aproximadas del daño global pueden ser calculadas (Kappos, 1997).

En consecuencia, el denominado Índice de Daño (ID o DI , por sus siglas en inglés), también conocido como daño medio (normalizado), D_m , se elige como indicador del daño global esperado en la estructura para el parámetro de medida de intensidad seleccionado, IM . Su principal característica es permitir la evaluación del comportamiento de estructuras de forma rápida y sencilla, quedando definido a partir de las probabilidades calculadas previamente en la obtención de las curvas de fragilidad (ver 3.6.2.1):

$$ID = \frac{1}{n} D_m = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n i \cdot P(DS_i) \quad (3-26)$$

donde:

- ID es el Índice de Daño.
- D_m es el daño medio (sin normalizar).
- $P(DS_i)$ es la probabilidad de que la estructura experimente un daño i .
- $i = 0, 1, 2, 3, 4, 5$ y $n = 5$, de acuerdo con los estados de daño definidos en 3.6.1.

El ID es un valor comprendido en el rango $[0, 1]$, siendo 0 el valor asociado a la ausencia de daño en la estructura, mientras que el valor 1 (100%) se asocia a un daño completo (daño total o no reparable) (Fig. 3-21).

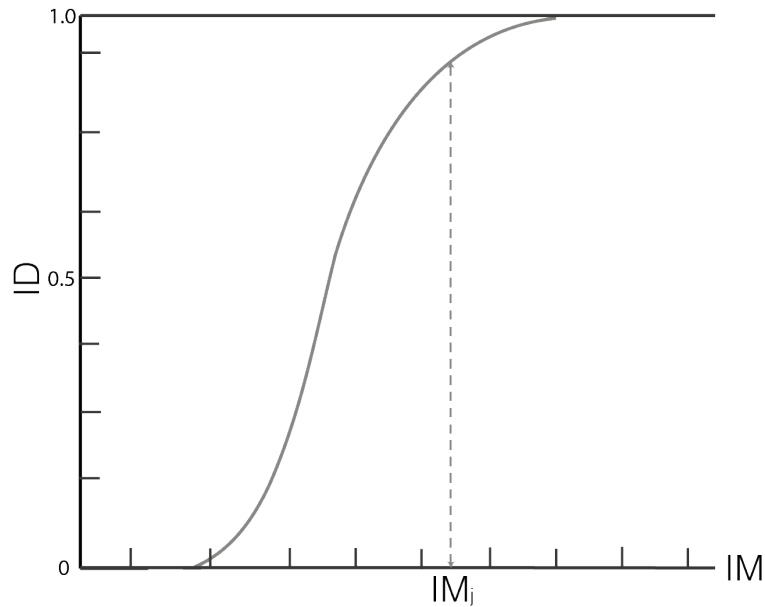


Fig. 3-21 Curva del índice de Daño (ID vs. IM) (fuente: preparado por el autor)

Adicionalmente, y de acuerdo con la tipología de los edificios estudiados en este trabajo y los estados de daño previamente definidos, en la Tabla 3-2 se definen porcentajes adecuados del costo de reparación-reposición con la finalidad de calcular un coeficiente de daño económico (ATC-13, 1985; Mouroux *et al.*, 2004; Vacareanu *et al.*, 2004; Mouroux & Brun, 2006; Hill & Rosseto, 2008; D' Ayala *et al.*, 2015).

Tabla 3-2 Valores para los factores de daño general

Estado de daño, DS_i	Nulo DS_0	Ligero DS_1	Moderado DS_2	Extenso DS_3	Colapso DS_4
% daño	0	2	10	50	100

3.6.2 Fragilidad

El análisis de la vulnerabilidad de una estructura parte del uso de hipótesis de simplificación que, una vez desarrolladas y validadas individualmente para los distintos componentes que conforman dicha estructura, habrán de calibrarse a manera de asegurar que se aproximen a las observaciones y/o datos de los que se dispone inicialmente. A pesar de la inclusión de diversas incertidumbres durante el proceso de calibración, éstas no deberán mermar la validez y confiabilidad del modelo en ningún momento.

La consideración de la posible existencia de un único valor que sea capaz de indicar, con absoluta certeza, la cantidad de daño (o pérdidas) que una sollicitación pueda ocasionar en una determinada estructura, no sólo es poco realista, sino que también es poco práctico. Lo anterior deriva en la necesidad de utilizar *funciones de fragilidad* capaces de considerar la gran complejidad y variabilidad que existen, tanto en la representación del fenómeno natural (*i.e.* el terremoto), como de los diversos errores, simplificaciones e incertidumbres asociadas al modelo estructural.

Las funciones de fragilidad pueden clasificarse en dos principales tipos: **1)** aquellas que se abordan de forma estadística a partir de la información disponible para una determinada tipología estructural; y **2)** aquellas que se abordan desde una perspectiva conceptual teórica, debido a falta de información.

En una etapa inicial, la estimación de las funciones de fragilidad se lleva a cabo a partir de publicaciones, análisis, o sondeos de daño y pérdidas disponibles en determinado momento. A medida

que la información para una región o tipología en particular se incrementa y actualiza, sus funciones habrán de evaluarse y actualizarse consecuentemente.

3.6.2.1 Curvas de fragilidad

Las curvas de fragilidad representan la probabilidad de alcanzar o exceder un estado límite de daño determinado en términos de un parámetro de medida de intensidad (IM , por sus siglas en inglés) previamente seleccionado (e.g. S_d o pga), y, si aplica, de la resolución utilizada para calcular la respuesta del sistema (e.g. Δ_{pga}).

A pesar de que las curvas de fragilidad se obtienen para una tipología constructiva en particular, existen importantes diferencias en las curvas desarrolladas en diferentes regiones o países.

La obtención de estas curvas obedece, no solo a aspectos relacionados con la respuesta estructural, sino también a otros, como los materiales y técnicas constructivas utilizadas, la tipología estructural, su localización, la severidad o laxitud de las normativas de la época, mantenimiento durante su vida útil, entre otros. Lo anterior se refleja de forma clara en los distintos tipos y niveles de daños que pueden observarse en estas estructuras, a pesar de formar parte de una misma tipología estructural y ser expuestas a una demanda similar.

En caso de los estados de daño nulos, las curvas de fragilidad son trivialmente iguales a uno, mientras que para el resto de los estados de daño se asume que éstas siguen una distribución log-normal acumulativa, lo cual se corresponde con las condiciones que conlleva el proceso de degradación asociado, según se ha demostrado (Kennedy *et al.*, 1980).

$$P(DS_i|IM) = \Phi\left(\frac{1}{\beta_{DS_i}} \cdot \ln\left[\frac{IM}{\overline{IM}_{DS_i}}\right]\right) \quad (3-27)$$

donde:

- $P(DS_i|IM)$ es la probabilidad de que un determinado parámetro de intensidad, IM , provoque que la estructura alcance el estado de daño DS_i
- \overline{IM}_{DS_i} es el valor medio de la función de fragilidad
- β_{DS_i} es la desviación estándar de $\ln(IM)$

Las curvas de fragilidad evolucionan constantemente a medida que aumentan la calidad y disponibilidad de la información y los modelos, así como de las herramientas empleadas para su análisis. Su renovación e incorporación en normativas y códigos también suele seguir la misma tendencia.

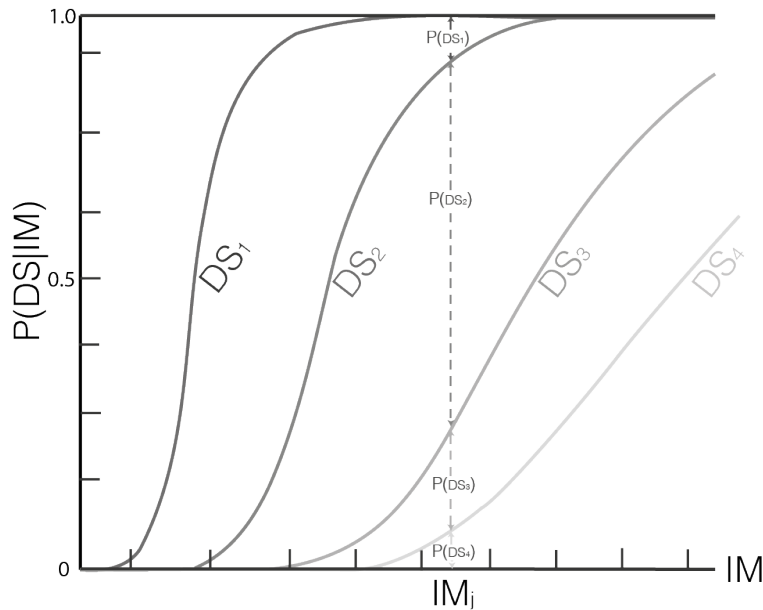


Fig. 3-22 Curvas de fragilidad (Prob. Vs. IM) para estados de daño no-nulo ($i=1, 2, 3, 4$) (fuente: preparada por el autor)

3.6.2.2 Matrices de probabilidad de daño

A partir de las curvas de fragilidad obtenidas tal como se indica en el punto anterior, y conocido el parámetro de medida de intensidad, IM (*e.g.* desplazamiento espectral de la estructura en el punto de desempeño de esta), se pueden determinar las probabilidades de excedencia asociadas a cada uno de los estados de daño previamente definidos, pudiendo expresarse a través de la denominada matriz de probabilidad de daño.

Lo anterior se obtiene ya sea a través de los valores de probabilidad obtenidos a partir de la ec. (3-27), o haciendo uso de valores de probabilidad correspondientes a daños sísmicos que siguen una distribución binomial de probabilidad o una distribución beta equivalente (ver Tabla 3-3) y mediante la ec. (2-1), la cual permite obtener la probabilidad correspondiente a un determinado estado de daño, i , conociendo los distintos puntos de cruce del IM sobre las curvas de fragilidad, según sea el caso (Fig. 3-22).

Tabla 3-3 Distribución de probabilidad binomial de diferentes estados de daño de acuerdo con lo propuesto en el documento RISK-UE (fuente: Milutinovic & Trendafiloski (2003), Giovinazzi & Lagomarsino (2002))

	$P(DS_1 IM)$	$P(DS_2 IM)$	$P(DS_3 IM)$	$P(DS_4 IM)$
$P(DS_1 IM) = 0,50$	0,50	0,896	0,992	1,00
$P(DS_2 IM) = 0,50$	0,896	0,50	0,866	0,988
$P(DS_3 IM) = 0,50$	0,992	0,866	0,50	0,881
$P(DS_4 IM) = 0,50$	1,00	0,988	0,881	0,50

$$P(DS = DS_i|IM) = [P(DS \geq DS_{i+1}|IM) - P(DS > DS_i|IM)] \Big|_{i=1}^{n-1} \quad (3-28)$$

donde:

- $P(DS = DS_i|IM)$ es la probabilidad de que un determinado parámetro de intensidad, IM , provoque que la estructura alcance el estado de daño $DS = DS_i$.
- $i = 1, 2, 3, 4, 5$ y $n = 5$, de acuerdo con los estados de daño definidos en 3.6.1.

3.7 El enfoque probabilista

3.7.1 En los edificios

Los efectos de las diversas fuentes de incertidumbre, inherente y/o epistémica, han de ser tomados en cuenta en la evaluación probabilista de cualquier estructura por medio de variables aleatorias. A este respecto, las propiedades mecánicas de los materiales son consideradas una de las fuentes más comunes de incertidumbres epistémicas, las cuales pueden variar significativamente para cada estructura en número, tipo y grado de influencia, dependiendo de diferentes aspectos tales como la localización, las técnicas de construcción y producción de la época, los materiales constructivos, los códigos y ordenanzas constructivas, entre otros (Paricio, 2001).

Algunas propiedades mecánicas son de particular interés para la tipología constructiva analizada en este trabajo, lo cual queda justificado por la extensa variabilidad en la calidad y, por tanto, características de las unidades constructivas (*i.e.* ladrillos cerámicos macizos), las cuales, a su vez, se encuentran estrechamente ligadas con el proceso constructivo de la época.

El periodo constructivo de la tipología estudiada en este trabajo comprende los años 1890 a 1940, en los cuales la manufactura de productos cerámicos con fines constructivos como ladrillos, bloques, tejas para techos o baldosas para suelos, se llevaba a cabo principalmente a mano, con el uso de materiales locales y herramientas rudimentarias. Adicionalmente, el proceso de cocción era llevado a cabo en hornos de ladrillo alimentados por madera o carbón, en los cuales diversos factores tales como la localización de las piezas dentro del horno, la falta de control en la cocción una vez ésta iniciaba, o la susceptibilidad a agentes externos, producía una extensa heterogeneidad con fluctuaciones importantes en las características y la calidad del producto finalizado (Jones, 1996).

3.7.1.1 Variables aleatorias de interés

La resistencia a compresión, f_m , el módulo de Young, E , el módulo de cortante, G , y la resistencia a cortante, τ_0 , de la mampostería cerámica sólida se consideran como variables aleatorias para efectos de esta investigación. En base a valores y relaciones reportadas en diferentes fuentes disponibles, numerosas visitas de inspección y la opinión de expertos, se han determinado un conjunto de valores adecuados y fiables de las propiedades mecánicas de interés (Lahuerta & Rodríguez, 1962; PIET-70, 1971; Arredondo, 1980; Harris, 1986; Hendry *et al.*, 1987; Hendry, 1990; Drougkas *et al.*, 2015, 2016). Dadas las particularidades del proceso de producción de la época, se ha prestado especial atención en asegurar que las características de los materiales de la tipología estudiada (*i.e.* mampostería cerámica no reforzada) queden representadas adecuadamente.

Además de haber determinado cuidadosamente el valor medio de la resistencia a compresión, f_m , se selecciona un intervalo de confianza de 90% (0,90) debido a que sus valores críticos correspondientes (*i.e.* regiones de rechazo) se asemejan bastante a los límites inferior (Lim_{inf}) y superior (Lim_{sup}) establecidos para esta variable (ver Fig. 3-23 y ec. (3-30)).

En base a la información anterior y a los valores p (ec. (3-29)) y Z_{score} correspondientes a una distribución normal de dos colas con un $\alpha = 10\%$ (0,10), la desviación estándar de la variable de interés es calculada según la ec. (3-31):

$$p = 1 - \frac{(1 - \text{nivel de confianza})}{2} = 0.95 \quad (3-29)$$

$$P\left(\bar{X} - Z \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq \bar{X} + Z \cdot \frac{s}{\sqrt{n}}\right) = 90\% \quad (3-30)$$

$$\frac{\sigma}{\sqrt{N}} = \sigma_{\mu} = \frac{(\mu - Lim_{inf})}{Z_{\alpha/2}} = \frac{(Lim_{sup} - \mu)}{Z_{\alpha/2}} \quad (3-31)$$

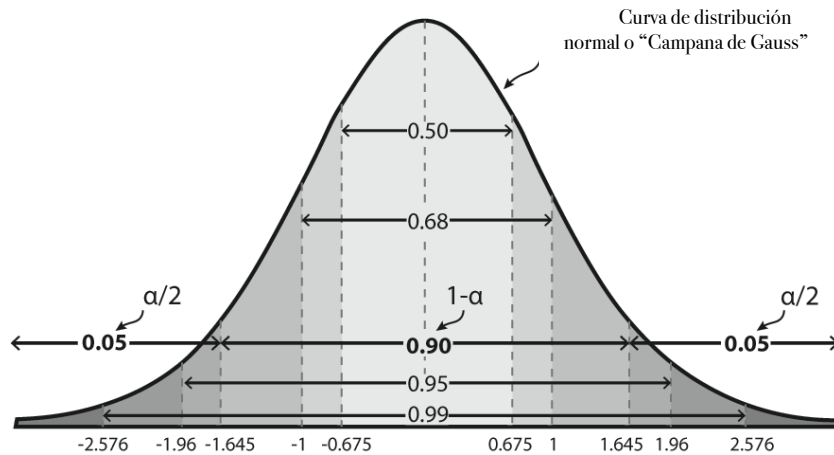


Fig. 3-23 Curva de distribución normal de dos colas con puntuaciones Z para diferentes intervalos de confianza (fuente: preparado por el autor)

Tal como se mencionó anteriormente, el rango de posibles relaciones entre las variables de interés (ecs. (3-32) a (3-34)) está delimitado en base a diferentes reportes técnicos, algunos ensayos de laboratorio, y mayoritariamente manuales y tratados de construcción de la época. Dada la particularidad de la tipología constructiva, la calidad de los materiales y la heterogeneidad producida por los procesos constructivos, la opinión de expertos fue fundamental al momento de acotar las opciones disponibles.

$$E = 500 \cdot f_m \quad (3-32)$$

$$G = \frac{E}{3} \quad (3-33)$$

$$\tau_0 = 0,03 \cdot f_m \quad (3-34)$$

3.7.1.2 Tratamiento estadístico de las variables de interés

Se asume una correlación lineal positiva como hipótesis para las relaciones entre f_m y el resto de las variables aleatorias: $E = E(f_m, \varepsilon)$; $G = G(f_m, \varepsilon)$; $\tau_0 = \tau_0(f_m, \varepsilon)$. Una variable normalmente distribuida, ε , con media igual a cero ($\mu_{\varepsilon} = 0$) y una varianza normalizada ($var(\varepsilon) = 1$), se introduce con la finalidad de incluir la incertidumbre en las relaciones anteriores.

Adicionalmente, un parámetro a se añade, con el objetivo de ajustar la correlación en las relaciones entre variables. Esto hace posible que, al variar dicho parámetro, se generen diferentes muestras de cada una de las variables consideradas, E , G , τ_0 , en términos de f_m . A manera de ejemplificar lo anterior, la primera relación queda descrita por:

$$E = 500 \cdot f_m + a \cdot \varepsilon \quad (3-35)$$

En esta relación, el coeficiente de correlación entre E y f_m queda definido por ρ :

$$\rho = \frac{cov(E, f_m)}{\sqrt{var(E) \cdot var(f_m)}} \quad (3-36)$$

donde:

- $cov(E, f_m)$ es la covarianza entre E y f_m .
- $var(E)$ es la varianza de E .
- $var(f_m)$ es la varianza de f_m .

Para una muestra cualquiera de f_m , la varianza de E puede calcularse como:

$$\begin{aligned} var(E) &= var(500 \cdot f_m + a \cdot \varepsilon) \\ var(E) &= 500^2 \cdot var(f_m) + a^2 \cdot var(\varepsilon) \end{aligned} \quad (3-37)$$

Por otra parte, la covarianza entre E y f_m se obtiene de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} cov(E, f_m) &= cov[(500f_m + a\varepsilon), f_m] \\ cov(E, f_m) &= 500 \cdot var(f_m) + a \cdot cov(\varepsilon, f_m) = 500 \cdot var(f_m) \end{aligned} \quad (3-38)$$

Por consiguiente, el coeficiente de correlación puede escribirse en términos del parámetro a y, al revertir la relación, a puede escribirse en términos del coeficiente de correlación, ρ , como:

$$a = \frac{500 \cdot \sqrt{var(f_m)}}{\sqrt{var(\varepsilon)}} \cdot \sqrt{\frac{1}{\rho^2} - 1} \quad (3-39)$$

Siguiendo el procedimiento mostrado anteriormente para el módulo de Young, E , es también posible generar análogamente los valores correspondientes para G y τ_0 , basados en las siguientes relaciones:

$$G = \frac{1}{3} \cdot E + b \cdot \varepsilon \quad (3-40)$$

$$\tau_0 = 0,03 \cdot f_m + c \cdot \varepsilon \quad (3-41)$$

Donde los parámetros b y c son utilizados para ajustar las correlaciones entre G y E , y τ_0 y f_m , respectivamente.

Lo anterior se ha implementado con la finalidad de generar una población compuesta de un total de 1000 unidades generadas aleatoriamente y con una distribución normal para cada variable de interés, conformando, a su vez, entre todas ellas 1000 conjuntos aleatorios de propiedades mecánicas de los materiales.

La Tabla 3-4 presenta las medias y desviaciones estándar de los valores iniciales (*i.e.* objetivo) y los valores generados de las diversas variables de interés después de haber sido tratadas estadísticamente. Asimismo, la Fig. 3-24 contiene los histogramas y funciones de distribución de cada variable, así como la regresión lineal y valores de correlación entre las posibles combinatorias.

Tabla 3-4 Media y desviación estándar de las variables de interés (todas las unidades en megapascales, MPa
(fuente: preparado por el autor)

Variable de interés	Valores objetivo		Valores generados	
	μ	σ	μ	σ
f_m	3,00	0,515	2,982	0,492
E	1500	257,58	1494,71	267,81
G	500	85,86	500,18	101,44
τ_0	0,09	0,016	0,0897	0,016

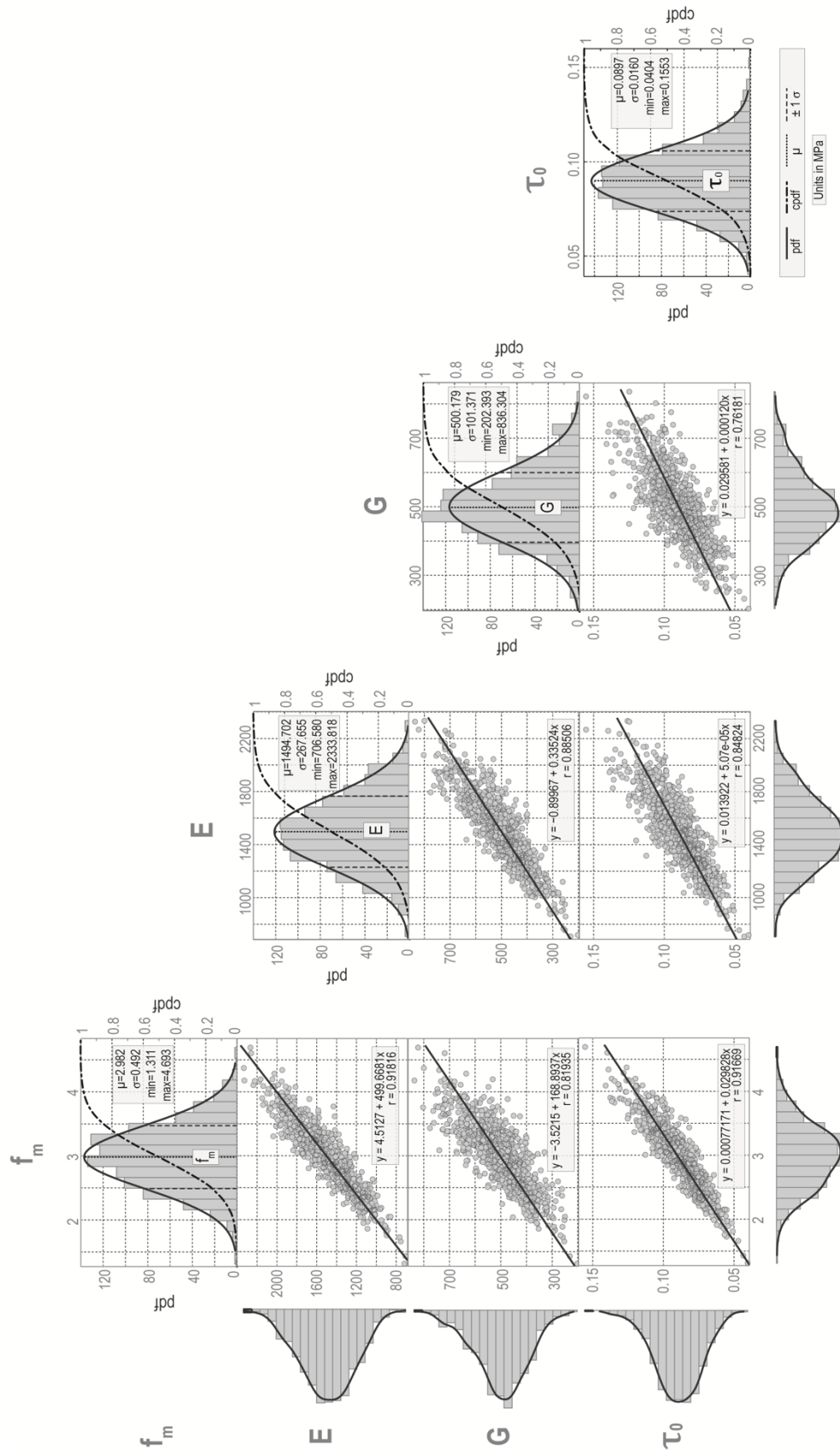


Fig. 3-24 Matriz de conjuntos de propiedades mecánicas para la población analizada, que incluye: (a) histograma y funciones de densidad de probabilidad ajustada y acumulativa para cada variable de interés; y (b) regresión lineal y coeficiente correlación para cada combinatoria de las propiedades mecánicas analizadas (fuente: preparado por el autor)

3.7.1.3 Muestreo

El estudio de poblaciones grandes es común, y cada día más, en diferentes campos de la ingeniería, ciencia, tecnología o matemáticas. La naturaleza inherente y el tamaño de estas poblaciones normalmente impide que se estudie cada una de las unidades que las componen, siendo algo impráctico, poco realista o incluso imposible. Por tanto, el estudio de muestras de la población de interés es una aproximación más factible.

Una muestra es una parte o un subconjunto de una población, utilizada con el propósito de optimizar la carga de trabajo y recursos, permitiendo llegar a afirmaciones o conclusiones acerca de todo el conjunto con una precisión conocida.

Una (o más) muestra adecuada, suficientemente representativa y propiamente diseñada, determinará, de manera substancial, los resultados y la calidad correspondiente de cualquier estudio, previniendo cualquier resultado falso o erróneo.

Distintos métodos de muestreo pueden encontrarse en la literatura (Kish, 1965; Cochran, 1977; Taherdoost, 2016). Su idoneidad dependerá en gran medida de los objetivos del estudio a ser desarrollado, del tamaño y la calidad de los datos disponibles, y del comportamiento de dicha información, entre otros parámetros.

Tamaño de la población (N)

Con la finalidad de cubrir, de forma extensa y suficiente, la posible variabilidad (*i.e.* incertidumbre epistémica) de las propiedades mecánicas materiales consideradas en este estudio, los parámetros iniciales (*i.e.* media, desviación estándar, límites superior e inferior, y coeficientes de correlación) fueron definidos y tratados tal como se explica en 0, generando un total de 1000 conjuntos (*i.e.* sets) de propiedades mecánicas materiales, cada uno de los cuales, está compuesto por valores seleccionados aleatoriamente para cada una de las variables de interés.

Margen de error o intervalos de confianza

El margen de error representa la desviación de los resultados de la muestra (*i.e.* rango de valores más probables), expresada como una proporción positiva y negativa (\pm). El margen de error estándar elegido para este trabajo es del 5% (0,05).

Nivel de confianza

El nivel de confianza, normalmente expresado como $1-\alpha$, es la probabilidad (*i.e.* nivel de certeza) de que determinado parámetro de la población se encuentre verdaderamente entre los intervalos de confianza. Los valores típicamente utilizados para α son 10% (0,10), 5% (0,05) o 1% (0,01). Por tanto, los niveles de confianza a utilizarse serían de 90% (0,90), 95% (0,95) o 99% (0,99), respectivamente.

Para este estudio se ha elegido un nivel de confianza del 95% (0,95) con $\alpha = 5\%$ (0,05), $\rho = 0,975$ y $Z = 1,96$, el cual es considerado un valor estándar para investigaciones cualitativas.

Tamaño de la muestra (n)

Como se ha dicho anteriormente, la definición del tamaño de una muestra, apropiada y suficientemente representativa, es uno de los dos aspectos clave que caracteriza la calidad del muestreo. Lo anterior normalmente requiere cálculos estadísticos extensos y la determinación de los parámetros de muestreo mencionados en apartados anteriores.

El cálculo para este trabajo del tamaño inicial de la muestra, n_0 , asociado con una población finita de 1000 unidades se llevó a cabo considerando una proporción de la muestra del 50% (0,50) (*i.e.* distribución con sesgo equitativo – ver ec. (3-42)).

Debido a que algunas de las formulaciones utilizadas para el cálculo del tamaño de una muestra están basadas en la idea de que las muestras son seleccionadas de una población infinita o con técnicas de reemplazo, es necesario hacer uso del denominado factor de corrección de población finita (*FPC*, por sus siglas en inglés), con la finalidad de obtener una estimación más precisa del tamaño de muestra (Kish, 1965; Cochran, 1977; Hamburg, 1985; Roderer, 1998; Rea & Parker, 2014). Por tanto, el FPC es aplicado en el resultado obtenido inicialmente, n_0 , para así tener en cuenta que la muestra se selecciona a partir de una población finita, sin reemplazo y con una fracción de muestreo, n/N , mayor o igual al 5% (0,05) (ecs. (3-43) a (3-46)). Finalmente, el tamaño de muestra calculado para la población finita con $N = 1000$ unidades resulta de $n = 278$ (Fig. 3-25).

$$n_0 = \frac{(\text{proporción de la muestra} \cdot (1 - \text{proporción de la muestra}))}{(\text{margen de error}/Z)^2} \quad (3-42)$$

$$n_0 \approx 384$$

$$\sqrt{n} = \sqrt{n_0} \cdot FPC \quad (3-43)$$

$$FPC = \sqrt{N - n/N - 1} \quad (3-44)$$

$$n = \frac{n_0 \cdot N}{(N - 1) + n_0} \quad (3-45)$$

$$n \approx 278$$

$$n/N = 0.278 \geq 0.05 \quad (3-46)$$

donde:

- N es el tamaño de la población
- FPC es el factor de corrección de población finita
- n_0 es el tamaño de muestra sin considerar el FPC
- n es el tamaño de muestra corregido
- n/N es la fracción de muestreo

Selección de sujetos u observaciones

El segundo aspecto fundamental que caracteriza la calidad del muestreo es la selección de sujetos u observaciones adecuados dentro de las unidades que componen a la población de interés. Dependiendo de las necesidades del estudio de investigación y de las características de la población, diferentes mecanismos de selección pueden ser utilizados en la elección de los miembros de la muestra.

Para el propósito de este trabajo, el método elegido es el denominado del muestreo aleatorio simple (SRS, por sus siglas en inglés). Este método considera que cada unidad de la población tiene una probabilidad igual de ser seleccionada (Fig. 3-25).

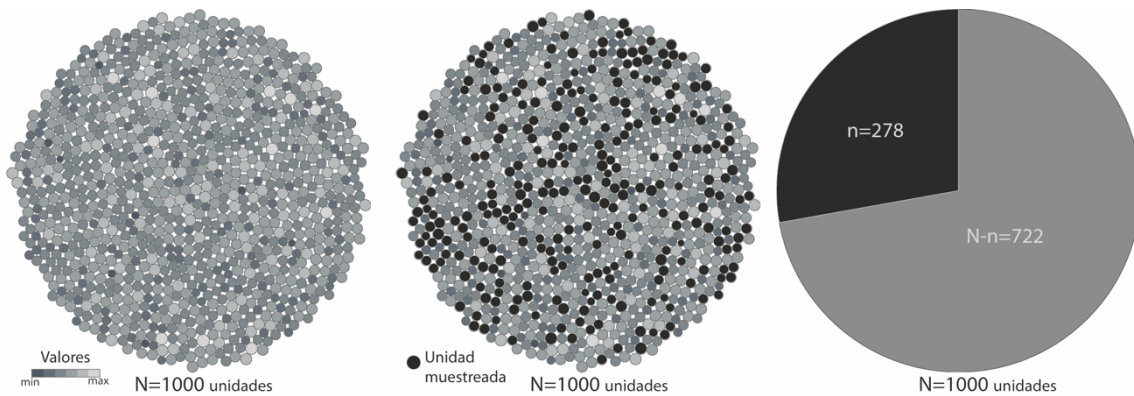


Fig. 3-25 Proceso de obtención del número de unidades requeridas para la obtención de una muestra suficientemente representativa ($n = 278$) a partir de una población inicial ($N = 1000$) (fuente: preparado por el autor)

3.7.1.4 Representatividad de la muestra

Con la finalidad de verificar que la muestra seleccionada para la resistencia a compresión, f_m , proviene de una distribución normal con parámetros poblacionales $\mu = 2,982 \text{ MPa}$ y $\sigma = 0,492 \text{ MPa}$, se lleva a cabo la prueba de Kolmogorov-Smirnov para una muestra con un nivel significativo del 5%.

De acuerdo con los resultados obtenidos, la representatividad de la muestra se verifica, ya que la prueba falla en rechazar la hipótesis nula ($h = 0$) al nivel significativo seleccionado. Lo anterior puede verificarse al realizar la comparación visual entre la función de distribución acumulada (CDF, por sus siglas en inglés) empírica y la estándar (Fig. 3-26).

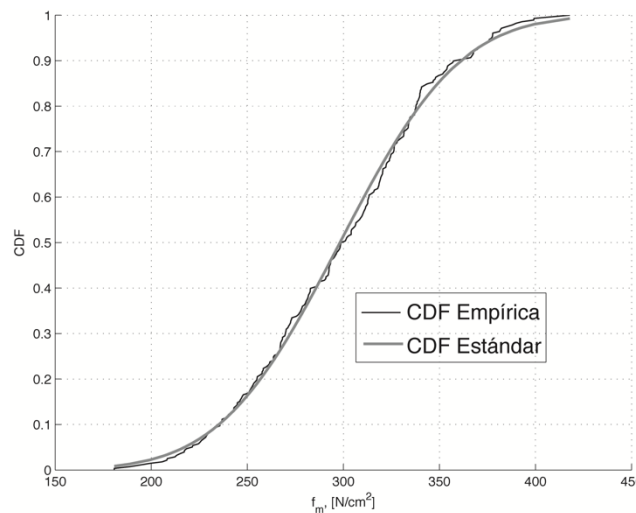


Fig. 3-26 Test de Kolmogorov-Smirnov para una muestra. Funciones de distribución acumulada (CDF) empírica y estándar (fuente: preparado por el autor)

3.7.2 En la acción

Una vez seleccionados los siete registros sísmicos con el método del espectro de capacidad (ver 3.3.2.1 y 3.3.2.2), se escalan adecuadamente para diversos valores de intensidad (i.e. aceleración pico del terreno - pga). Se utilizan un total de cinco valores para escalar los registros, los cuales comprenden aceleraciones del terreno entre 0.01 y $0.20 g$.

El límite superior utilizado para escalar los registros fue seleccionado en base al valor máximo de la aceleración pico del terreno esperado en Barcelona para la Zona II (*i.e.* distrito de L'Eixample), el cual equivale a $0.141 g$ para el escenario determinista, y $0.194 g$ para el escenario probabilista, de acuerdo con lo propuesto por el Instituto Cartográfico de Cataluña (Irizarry *et al.*, 2003) y basado en los estudios de microzonación de la ciudad (Cid, 1998) (ver 2.2.5).

Con ello se generan cinco variantes escaladas para cada uno de los registros de aceleración del terreno seleccionados, teniendo con ello un total de 35 acelerogramas utilizables en los análisis dinámicos correspondientes para cada estructura.

3.7.3 En los resultados esperados

Tal como se hizo en el muestreo correspondiente al conjunto de propiedades mecánicas de los materiales, se asume que cada unidad de la población de resultados tendrá una probabilidad idéntica de ser seleccionada, permitiendo, con ello, el uso de un muestreo aleatorio (*SRS*), a fin de seleccionar el número de análisis dinámicos por realizarse para cada estructura.

Partiendo de la base de 278 posibles conjuntos de propiedades mecánicas de los materiales, el uso de 7 acelerogramas y 5 *pga* para su escalado, tenemos un total de $278 \cdot 7 \cdot 5 = 9.730$ unidades. Así mismo, si aplicamos valores estándar para el margen de error (*i.e.* 5%), el nivel de confianza (*i.e.* 95%) y la proporción de la muestra (*i.e.* 50%), además del correspondiente factor de corrección de población infinita, PFC, obtenemos una muestra suficientemente representativa de $n = 370$ análisis dinámicos a realizar por dirección en cada estructura.

3.8 El software 3Muri

Las principales características estructurales y arquitectónicas de los edificios de este trabajo han sido recogidas a partir de planos originales, lineamientos de la época, el juicio de expertos, reportes técnicos y de laboratorio, así como diferentes bases de datos.

Los modelos tridimensionales de las diferentes configuraciones estructurales de este trabajo han sido desarrollados y analizados mediante el uso del programa de cómputo TreMuri | 3Muri (Galasco *et al.*, 2002), el cual es ampliamente utilizado y reconocido para el análisis y la simulación del comportamiento no lineal de estructuras de mampostería.

3Muri fue desarrollado por S.T.A. DATA en colaboración con equipos de investigación de las universidades de Pavía y Génova en Italia, dirigidos por el Profesor Sergio Lagomarsino (Galasco *et al.*, 2002; Lagomarsino *et al.*, 2002; Lagomarsino *et al.*, 2013).

El programa modela los marcos a través del método de macroelementos (*FME*, por sus siglas en inglés), el cual se deriva de la observación del comportamiento real de edificios dañados por terremotos, tomando en cuenta los mecanismos principales de fallo de la mampostería y leyes constitutivas derivadas de pruebas experimentales.

La ley histerética aplicada en los distintos modelos (Fig. 3-27) considera una degradación de rigidez (*SD*, por sus siglas en inglés) con un nivel bajo de disipación asociada a una fuerza plástica interna, $f_y = 0.2$, y a un parámetro de ablandamiento $\beta = 0$. El modelo considera solamente el comportamiento en el plano, para las paredes (Gambrotta & Lagomarsino, 1997; Penna, 2002).

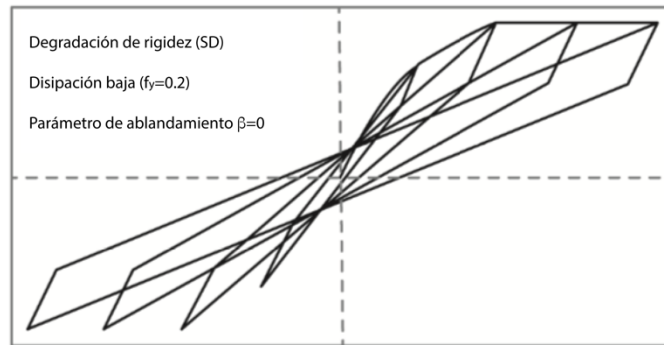


Fig. 3-27 Modelo histérico no lineal (fuente: adaptada de Gambarotta & Lagomarsino (1997))

El proceso del modelado consiste en una serie de pasos ordenados, los cuales comienzan con la definición de la geometría de los diferentes niveles y elementos como una serie de líneas y nodos, que posteriormente son definidos de forma individual, asignando el tipo de material y sus características correspondientes. Dentro de los posibles elementos que pueden ser definidos encontramos columnas, vigas, muros, etc.

De forma simultánea, los datos referentes al nivel de conocimiento y las propiedades materiales se definen en el modelo a manera de poder asignarlas adecuadamente a los elementos correspondientes.

En caso de existir puertas o ventanas, han de definirse de acuerdo con sus propiedades geométricas. Similarmente y, en caso de existir dinteles por encima de dichas aperturas, ha de definirse su longitud y posición. El uso de nodos auxiliares es común, para definir, de forma más sencilla este tipo de elementos.

A continuación, se definen los forjados. Las propiedades geométricas y materiales del sistema de piso adoptado han de definirse, así como la dirección de los elementos que los soportan (*e.g.* sistemas de piso unidireccionales). Es también en este punto donde han de definirse las cargas vivas y muertas que afectan a la estructura.

El proceso mencionado en puntos anteriores se lleva a cabo para cada uno de los niveles (pisos) que integran la estructura. Distintas revisiones automáticas pueden llevarse a cabo para verificar que no existen errores en el modelo estructural.

Una vez que el modelo ha sido introducido al programa, se pueden realizar los diferentes tipos de análisis modal, estático y dinámico, generando, con ello, el archivo de texto con toda la información correspondiente. Estos análisis pueden llevarse a cabo tanto en la versión comercial del modelo como en la versión de investigación.

La versión de investigación del programa facilita la automatización de los distintos análisis, siendo de gran utilidad para estudios de tipo probabilista o incrementales. Esta versión es la empleada en el desarrollo de este trabajo para la realización de los distintos tipos de análisis.

3.9 Recursos computacionales actuales

Con la finalidad de agilizar el gran número de cálculos por realizar en este trabajo se emplearon recursos de cómputo avanzado como son el Parallel Computing Toolbox de MATLAB (The MathWorks, 2018a). Esta herramienta permite hacer uso de la potencia de procesamiento de los diversos núcleos con los que cuentan en día de hoy los ordenadores, agilizando con ello el cálculo y reduciendo los tiempos para la obtención de resultados.

La preparación de los archivos y ejecutables necesarios para los diversos análisis se llevó a cabo también a partir de scripts específicos que permitieron generar los distintos conjuntos de datos a emplearse “en batch” para la ejecución de los cálculos por parte del programa 3Muri en su versión de investigación, la cual permite, sin ningún interfaz gráfico y mediante el uso de archivos de texto de entrada con los modelos de interés, el cálculo tanto de los análisis modales, pushover y dinámicos.

Una vez obtenidos, los resultados fueron, a su vez, almacenados en distintas carpetas que posteriormente fueron post-procesadas y analizadas también con el uso de scripts automatizados para agilizar el proceso, dada la gran cantidad de información obtenida.

Se presentan más detalles, así como algunos de los scripts mencionados en el Anexo correspondiente.

3.10 Resumen y discusión

El estudio del desempeño de una estructura es el eje fundamental de las filosofías de diseño vigentes en lo que respecta a la evaluación estructural. Su consecución se puede llevar a cabo por medio del uso de técnicas avanzadas y análisis detallados, cuyo empleo no suele ser cotidiano, debido a los altos recursos computacionales y de tiempo que requieren, derivando así en el uso de técnicas simplificadas que permiten reducir dichos inconvenientes sin sacrificar de forma considerable la fiabilidad y calidad de sus resultados.

Así mismo, la incorporación de enfoques probabilistas en los diversos componentes que comprenden una evaluación estructural permite tomar en cuenta la posible variabilidad en los mismos y cubrir el rango de posibles valores tanto de entrada (*i.e.* datos) como de salida (*i.e.* resultados) que pudiesen presentarse.

Dentro de los posibles tipos de análisis simplificados que pueden llevarse a cabo para la obtención y evaluación de la respuesta estructural, se encuentran los análisis estáticos no lineales, los cuales permiten calcular el desempeño de una estructura al confrontar la capacidad de esta con la demanda ante la cual se puede ver sometida, obteniendo así el denominado punto de capacidad por demanda o punto de desempeño.

Existe una gran diversidad de procedimientos estáticos no lineales, los cuales han evolucionado durante las últimas décadas, existiendo así algunos que se adaptan mejor a ciertas tipologías constructivas, que consideran la participación de modos superiores, la regularidad de las estructuras, etc.

La elección de uno u otro procedimiento estático no lineal incidirá directamente en el proceso que conlleva la evaluación de la estructura, así como en los resultados que se obtienen de la misma, y es por ello por lo que ha de llevarse a cabo rigurosamente, atendiendo las necesidades reales del proyecto en cuestión y tomando en cuenta los distintos pros y contras de cada uno de dichos procedimientos.

En términos generales, el componente relacionado con la capacidad se obtiene como resultado del propio análisis estático no lineal, también conocido como análisis pushover. El resultado de ello es la denominada curva de capacidad, la cual, con el uso de ciertas expresiones y parámetros obtenidos del análisis modal, habrá de transformarse en su correspondiente espectro de capacidad, para así poder ser confrontado con el espectro asociado a la demanda.

Existen una serie de sub-pasos para la obtención del denominado espectro de capacidad, que involucran representar el mismo mediante una aproximación bilineal, cuyas características también estarán relacionadas con el procedimiento estático no lineal seleccionado.

Una vez obtenido lo correspondiente a la capacidad, se ha de obtener el espectro que representará la posible demanda ante la cual dicha estructura puede enfrentarse. La selección del espectro se realizará

en base a estudios específicos de peligrosidad y zonación del área de interés o datos obtenidos a partir de normativas locales o regionales. Todo ello, estará también relacionado con el procedimiento seleccionado, el tipo de espectro (elástico o inelástico), los factores de reducción o amortiguamiento, así como los pasos y formulaciones necesarios.

Finalmente se habrán de confrontar ambos componentes con la finalidad de encontrar el punto de cruce, coordenadas del punto de capacidad por demanda, el cual, posteriormente, servirá como parámetro de medida de intensidad para determinar las distintas probabilidades de los posibles estados de daño que dicha estructura puede presentar.

Las mencionadas probabilidades de excedencia de determinados estados de daño se obtienen a partir del cálculo de las denominadas curvas de fragilidad, las cuales permiten determinar la evolución del daño en función de un parámetro previamente elegido. Los estados de daño, a su vez, se definen previamente de acuerdo a distintos posibles criterios.

Para este trabajo, el criterio de desplazamiento de la curva pushover propuesto por el documento RISK-UE es seleccionado, permitiendo, así, definir cuatro estados de daño y un estado de daño nulo, los cuales quedarán definidos en función de los desplazamientos de fluencia y últimos. Adicionalmente, una curva de daño medio basada en las probabilidades obtenidas para los estados de daño no-nulos, permite determinar el comportamiento de la estructura de forma generalizada.

En cuanto a los análisis de tipo dinámico, se llevan a cabo a través del procedimiento denominado Análisis Dinámico Incremental, el cual consiste en escalar el espectro de respuesta para diferentes aceleraciones del terreno y medir la evolución del daño. Lo anterior también permite determinar la respuesta estructural en función de la aceleración del terreno o de un parámetro de medida, previamente seleccionado, como lo es el desplazamiento sufrido por un nodo en la parte superior de la estructura.

Por otro lado, el enfoque probabilista puede llevarse a cabo tanto a nivel de los modelos estructurales por analizarse, como a nivel de la demanda a emplearse, así como también a nivel de los resultados a utilizar en las conclusiones y evaluación final de la estructura.

En el primer caso, algunas de las propiedades mecánicas de los materiales más relevantes han sido seleccionadas como variables aleatorias para este trabajo, permitiendo, con ello, generar un conjunto de propiedades (*i.e.* población), que contiene los límites superiores e inferiores, así como valores medios y distribuciones tipo de la tipología de interés. La información que ha servido como base para caracterizar lo anterior proviene de distintas fuentes correspondientes a la época constructiva de interés, incluyendo así archivos históricos, referencias bibliográficas, manuales de construcción, visitas in situ, pruebas de laboratorios y el juicio de expertos, entre otros.

En cuanto a la demanda, además de utilizar espectros característicos de la zona de interés, los cuales derivan de estudios de microzonación que toman en cuenta también las distintas fuentes históricas, se han empleado un número suficiente y representativo de registros sísmicos reales (*i.e.* no sintéticos) con tal de tomar en cuenta la variabilidad real en la demanda. Estos, a su vez, se han escalado un determinado número de veces, con la finalidad de cubrir un espectro mayor de posibilidades.

A fin de permitir poder llevar a cabo el análisis estructural de los distintos modelos en sus diferentes direcciones principales, se han obtenido muestras, suficientemente representativas de la población, mediante técnicas de muestreo acordes. Esto permite reducir en gran parte el número de análisis necesarios, sin necesidad de sacrificar precisión o incurrir en errores importantes. La correcta elección de la técnica de muestreo, la suficiencia y representatividad de la muestra, y la correcta combinatoria de ello, determinarán directamente la calidad de los resultados obtenidos, además de reducir, de forma óptima, el número de análisis necesarios para conseguir dicho objetivo.

Aunado a lo anterior, el empleo de técnicas modernas y recursos computacionales que agilicen aún más la obtención de resultados, debe de ser considerado e implementado, a fin de acercarnos cada día más al uso de estas herramientas y técnicas avanzadas en más análisis de tipo cotidiano, dejando atrás su uso sólo para proyectos de gran envergadura.



CAPÍTULO 4

Aplicación a edificios aislados

4 APLICACIÓN A EDIFICIOS AISLADOS

Los resultados obtenidos a partir de las distintas metodologías y análisis expuestos en los capítulos anteriores, se detallan a continuación, para ambas direcciones principales (*i.e.* +X, +Y) de los edificios aislados, los cuales, a su vez, conforman también los distintos edificios agregados modelados en este trabajo, cuyos resultados son expuestos en el siguiente capítulo.

Los diversos análisis (*i.e.* modal, estático no lineal y dinámico) se llevaron a cabo con el programa 3muri para los distintos conjuntos de propiedades mecánicas materiales, registros sísmicos y/o aceleraciones pico del terreno, según el tipo de análisis en cuestión.

La preparación de los datos y archivos de entrada, así como el procesamiento de los resultados obtenidos se llevaron a cabo con rutinas propias desarrolladas para estos fines mediante el uso de cómputo paralelo a través del programa MATLAB (The MathWorks, 2018a).

Este capítulo pretende agrupar los resultados más relevantes para los distintos edificios aislados. Se hace una explicación detallada sobre los distintos resultados y figuras para el edificio ED-01, mientras que, para el resto de los edificios aislados, solamente se presentan los resultados más relevantes con la finalidad de permitir una fácil lectura y comparación de estos. Los resultados se condensan en cuatro apartados principales: 1) Análisis modal; 2) Análisis de capacidad; 3) Fragilidad y daño esperado; y 4) Análisis dinámico incremental.

La totalidad de resultados, tablas, figuras y otros datos de cada estructura, se exponen en el Anejo correspondiente. Por otro lado, la discusión de los resultados, principales observaciones, conclusiones y recomendaciones se presentan en el capítulo 6.

4.1 Análisis modal

Los resultados del análisis modal, obtenidos a partir del programa 3muri, para los 278 conjuntos (*i.e.* sets) de propiedades mecánicas materiales de cada una de las estructuras de este estudio, fueron previamente procesados, con la finalidad de obtener los valores característicos de las diversas propiedades utilizadas en este apartado.

Los resultados del análisis modal correspondientes al edificio aislado ED-01 se muestran en la Tabla 4-1. En ella podemos observar los 21 modos solicitados que, de acuerdo con lo explicado en el capítulo 3 (*ver 3.2.1*), se corresponden con los tres modos por cada nivel de la estructura.

Tabla 4-1 Resultados del análisis modal para el edificio aislado ED-01 (fuente: preparado por el autor)

# Modo	T [s]	f [rad/s]	ω [Hz]	Mx [kg]	My [kg]	Mz [kg]	ΣM [kg]
1	0,630	1,59	9,98	45,52	1876380,39	0,12	1876426,03
2	0,615	1,63	10,22	2140253,20	43,54	4,20	2140300,94
3	0,534	1,87	11,78	70179,83	1,70	6,50	70188,03
4	0,218	4,58	28,77	234750,94	10,89	3,35	234765,18
5	0,214	4,68	29,39	17453,56	2327,37	2,46	19783,39
6	0,210	4,76	29,93	99,42	360876,64	6,86	360982,92
7	0,184	5,44	34,16	19274,49	0,36	19,31	19294,16
8	0,141	7,11	44,68	861,30	25,31	317,50	1204,11
9	0,138	7,25	45,52	12,69	245,36	1988391,26	1988649,31
10	0,130	7,67	48,20	31,73	8087,21	114463,63	122582,57
11	0,122	8,23	51,68	6,22	21685,12	33522,25	55213,58
12	0,119	8,39	52,74	25,58	95090,19	207,51	95323,28
13	0,117	8,52	53,52	28048,85	6,68	59,76	28115,28
14	0,110	9,08	57,06	2497,16	17,64	119,34	2634,15

15	0,109	9,14	57,45	45,29	16,31	224,17	285,76
16	0,106	9,40	59,07	726,64	3,16	15,75	745,56
17	0,104	9,64	60,56	25,17	138,60	500,55	664,32
18	0,103	9,72	61,07	884,29	1,94	194,04	1080,27
19	0,101	9,88	62,05	347,24	216,76	871,04	1435,05
20	0,101	9,94	62,45	6225,29	5,26	48,99	6279,54
21	0,098	10,25	64,37	0,86	19,50	16261,94	16282,30

Se puede observar que los modos #2 y #1 corresponden, respectivamente, a los primeros modos fundamentales de las direcciones principales de la estructura X e Y , siendo aquellos modos que mayor masa activan en sus direcciones correspondientes.

Adicionalmente, en la Tabla 4-2 se pueden observar los factores de importancia, IF , la masa relativa activada, RAM , y la masa absoluta activada, AAM , para cada uno de los 21 modos solicitados, de las distintas direcciones de interés.

Tabla 4-2 Resultados del análisis modal para el edificio aislado ED-01 (continuación) (fuente: preparado por el autor)

# Modo	T [s]	IF _x [%]	IF _y [%]	IF _z [%]	RAM _x [%]	RAM _y [%]	RAM _z [%]	AAM _x [%]	AAM _y [%]	AAM _z [%]
1	0,630	0,002	99,998	0,000	0,002	79,333	0,000	0,002	69,390	0,000
2	0,615	99,998	0,002	0,000	84,870	0,002	0,000	79,148	0,002	0,000
3	0,534	99,988	0,002	0,009	2,783	0,000	0,000	2,595	0,000	0,000
4	0,218	99,994	0,005	0,001	9,309	0,000	0,000	8,681	0,000	0,000
5	0,214	88,223	11,764	0,012	0,692	0,098	0,000	0,645	0,086	0,000
6	0,210	0,028	99,971	0,002	0,004	15,258	0,000	0,004	13,345	0,000
7	0,184	99,898	0,002	0,100	0,764	0,000	0,001	0,713	0,000	0,001
8	0,141	71,531	2,102	26,368	0,034	0,001	0,015	0,032	0,001	0,012
9	0,138	0,001	0,012	99,987	0,001	0,010	92,258	0,000	0,009	73,532
10	0,130	0,026	6,597	93,377	0,001	0,342	5,311	0,001	0,299	4,233
11	0,122	0,011	39,275	60,714	0,000	0,917	1,555	0,000	0,802	1,240
12	0,119	0,027	99,755	0,218	0,001	4,020	0,010	0,001	3,516	0,008
13	0,117	99,764	0,024	0,213	1,112	0,000	0,003	1,037	0,000	0,002
14	0,110	94,800	0,670	4,531	0,099	0,001	0,006	0,092	0,001	0,004
15	0,109	15,847	5,706	78,447	0,002	0,001	0,010	0,002	0,001	0,008
16	0,106	97,463	0,424	2,113	0,029	0,000	0,001	0,027	0,000	0,001
17	0,104	3,789	20,863	75,347	0,001	0,006	0,023	0,001	0,005	0,019
18	0,103	81,858	0,180	17,962	0,035	0,000	0,009	0,033	0,000	0,007
19	0,101	24,197	15,105	60,698	0,014	0,009	0,040	0,013	0,008	0,032
20	0,101	99,136	0,084	0,780	0,247	0,000	0,002	0,230	0,000	0,002
21	0,098	0,005	0,120	99,875	0,000	0,001	0,755	0,000	0,001	0,601

Es posible observar, nuevamente, que los modos #2 y #1 activan la mayor cantidad de masa de la estructura (IF , RAM , AAM), en las direcciones X e Y , respectivamente, con lo cual podemos confirmar que el comportamiento de la estructura se encuentra principalmente influenciado por el primer modo fundamental en cada una de sus direcciones principales.

Podemos confirmar que, para cada dirección principal del edificio ED-01, los modos fundamentales (*i.e.* aquellos que movilizan al menos un 1% de la masa de la estructura) activan más del 80% de la misma.

Por otra parte, los períodos obtenidos para los primeros modos fundamentales de cada dirección principal de la estructura, se encuentran dentro del rango de períodos esperables para una estructura de siete plantas y que, orientativamente, puede calcularse como 1/10 del número de plantas de esta.

Por último, las correlaciones existentes entre los modos fundamentales del edificio ED-01 y las variables de interés de este estudio se presentan en la Tabla 4-3.

Tabla 4-3 Coeficientes de correlación entre los períodos fundamentales de vibración y las variables aleatorias de interés para ambas direcciones del edificio ED-01 (fuente: preparado por el autor)

	f_m	E	G	τ_0
T_{1x}	-0,88	-0,96	-0,95	-0,83
T_{1y}	-0,87	-0,94	-0,96	-0,81

Se puede observar que, primeramente, todas las correlaciones existentes entre los períodos de las direcciones de interés y las variables aleatorias de este estudio son negativas. Así mismo, en general, las correlaciones no son despreciables, teniendo los valores más elevados para los casos de E y G .

Los resultados correspondientes a los edificios aislados se resumen en Tabla 4-4 y Tabla 4-5. La completitud de resultados se puede encontrar en el Anejo correspondiente.

Tabla 4-4 Resultados del análisis modal para los distintos edificios aislados (fuente: preparado por el autor)

Edificio	# Modo	T [s]	f [rad/s]	ω [Hz]	Mx [kg]	My [kg]	Mz [kg]	ΣM [kg]
ED-01	1	0,630	1,59	9,98	45,52	1876380,39	0,12	1876426,03
	2	0,615	1,63	10,22	2140253,20	43,54	4,20	2140300,94
ED-02	1	0,752	1,33	8,35	1128291,12	4,76	1,95	1128297,82
	2	0,619	1,62	10,15	36,16	1130244,38	81,69	1130362,23
ED-03	1	0,723	1,38	8,69	1083369,88	2986,08	7,87	1086363,83
	2	0,591	1,69	10,63	6784,02	947867,44	69,03	954720,49
ED-04	1	0,712	1,40	8,82	812155,56	762957,03	0,58	1575113,18
	2	0,655	1,53	9,59	777062,36	777389,46	86,87	1554538,69

Tabla 4-5 Resultados del análisis modal para los distintos edificios aislados (continuación) (fuente: preparado por el autor)

Edificio	# Modo	T [s]	IFx [%]	IFy [%]	IFz [%]	RAMx [%]	RAMy [%]	RAMz [%]	AAMx [%]	AAMy [%]	AAMz [%]
ED-01	1	0,630	0,002	99,998	0,000	0,002	79,333	0,000	0,002	69,390	0,000
	2	0,615	99,998	0,002	0,000	84,870	0,002	0,000	79,148	0,002	0,000
ED-02	1	0,752	99,999	0,000	0,000	72,641	0,000	0,000	67,943	0,000	0,000
	2	0,619	0,003	99,990	0,007	0,002	76,504	0,006	0,002	68,061	0,005
ED-03	1	0,723	99,724	0,275	0,001	81,852	0,231	0,001	75,924	0,209	0,001
	2	0,591	0,711	99,282	0,007	0,513	73,214	0,006	0,475	66,428	0,005
ED-04	1	0,712	51,562	48,438	0,000	38,207	35,883	0,000	34,347	32,267	0,000
	2	0,655	49,987	50,008	0,006	36,556	36,562	0,005	32,863	32,877	0,004

Se observa que para los edificios ED-02, ED-03 y ED-04, los modos #1 y #2 corresponden a los primeros modos fundamentales de las direcciones principales de la estructura X e Y , respectivamente. También se puede observar que, para todos los edificios, excepto el edificio ED-04, los modos #1 y #2, activan la mayor cantidad de masa de la estructura (IF , RAM , AAM), confirmándose así que el comportamiento de la estructura se encuentra mayormente influenciado por el primer modo fundamental en cada una de sus direcciones principales.

En el caso del edificio ED-04, los modos #1 y #2, sólo superan ligeramente al porcentaje de la otra dirección principal, respectivamente. Lo anterior se debe a la configuración en planta del edificio ED-04, el cual es un edificio de esquina (*i.e.* chaflán), cuyos ejes principales de análisis no coinciden con los ejes principales de elementos estructurales (*i.e.* muros) como en el caso del resto de estructuras. No obstante, la estructura se ha modelado respetando su posición y orientación dentro del agregado de la manzana, por lo que sus resultados habrán de ser interpretados teniendo en cuenta dicho giro.

También es posible confirmar que, para cada dirección principal de las distintas estructuras, los modos fundamentales (*i.e.* aquellos que movilizan al menos un 1% de la masa de la estructura) activan más del 80% de la misma. A diferencia de los edificios ED-01, ED-02 y ED-03, en los que el primer modo fundamental activaba, con diferencia, la mayor cantidad de masa, en el edificio ED-04, esta masa se activa de forma casi equitativa entre los dos primeros períodos fundamentales para cada una de las direcciones principales de la estructura.

Finalmente, la Tabla 4-6 presentan los distintos coeficientes de correlación existentes entre los datos de los análisis modales y las variables de interés del este trabajo para todos los edificios aislados.

Tabla 4-6 Coeficientes de correlación entre los periodos fundamentales para cada dirección y las variables aleatorias de interés de los diferentes edificios aislados (fuente: preparado por el autor)

Edificio		f_m	E	G	τ_0
ED-01	T _{1x}	-0,88	-0,96	-0,95	-0,83
	T _{1y}	-0,87	-0,94	-0,96	-0,81
ED-02	T _{1x}	-0,89	-0,96	-0,95	-0,83
	T _{1y}	-0,88	-0,95	-0,96	-0,82
ED-03	T _{1x}	-0,89	-0,96	-0,95	-0,83
	T _{1y}	-0,88	-0,95	-0,96	-0,82
ED-04	T _{1x}	-0,89	-0,96	-0,95	-0,83
	T _{1y}	-0,88	-0,95	-0,94	-0,83

Tal como ocurrió para el edificio ED-01, el resto de los edificios aislados presentan una correlación elevada y negativa con respecto a las variables de interés de este estudio, siendo E y G, las que presentan los valores más elevados.

4.2 Análisis de capacidad

Los distintos resultados que conlleva el análisis estático no-lineal, expuesto en el capítulo 3 (*ver* 3.2.2), se presentan a continuación para los edificios aislados. Tal como se hizo en el apartado anterior, los resultados se presentan de forma detallada para el edificio ED-01 y, posteriormente, se muestran los resultados principales para el resto de los edificios aislados de manera resumida. La completitud de resultados y figuras puede encontrarse en el Anejo correspondiente.

4.2.1 Curva de capacidad

Mediante el programa de 3muri se llevan a cabo los distintos análisis estáticos no-lineales o pushover para cada una de las direcciones principales de análisis (*i.e.* +X e +Y) de los distintos edificios aislados de este estudio, para la totalidad de 278 conjuntos (*i.e.* sets) de propiedades mecánicas de cada uno.

Como se mencionó en el capítulo 3, la ejecución de los diversos análisis estáticos no-lineales requiere la previa elección del tipo de análisis pushover a llevarse a cabo y, por ende, del patrón de cargas a emplear en cada una de las direcciones de análisis principales.

Para las estructuras analizadas en este trabajo, el tipo de análisis pushover se corresponde con uno de primer modo, en el cual el patrón de cargas es triangular y se escala de forma monotónica-creciente para cada iteración del análisis, y sin perder su forma inicial, como sucedería en el caso de elegir un pushover de tipo adaptativo.

El análisis pushover arroja como resultado la denominada curva de capacidad o pushover, la cual presenta la relación existente entre el desplazamiento de un nodo localizado en el centro del nivel superior de la estructura y el cortante basal. Estas curvas suelen estar representadas por unos cuantos

puntos (*i.e.* pasos del análisis) y presentar valores incluso después de que la estructura haya sobrepasado su capacidad máxima.

La Fig. 4-1 presenta las curvas de capacidad obtenidas mediante el programa 3muri para el edificio ED-01 y en ambas direcciones principales de análisis.

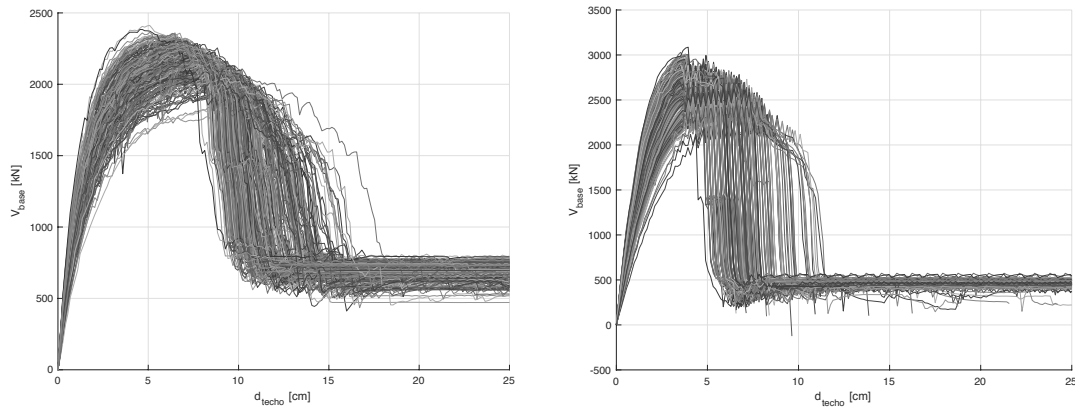


Fig. 4-1 Curvas de capacidad para las direcciones de análisis +X (*izq.*) y +Y (*der.*) del edificio ED-01 (fuente: preparado por el autor)

4.2.2 Punto de fluencia y punto último

Los métodos simplificados (*i.e.* procedimientos estáticos no-lineales, *NSP*) requieren la obtención previa de los puntos de fluencia y último de las curvas de capacidad. Lo anterior se puede llevar a cabo mediante diversos procedimientos, tal como se explica en el capítulo 3 (*ver 3.2.2.3*). La selección del punto último permite acortar las curvas de capacidad originales, tal como se puede observar en la Fig. 4-2.

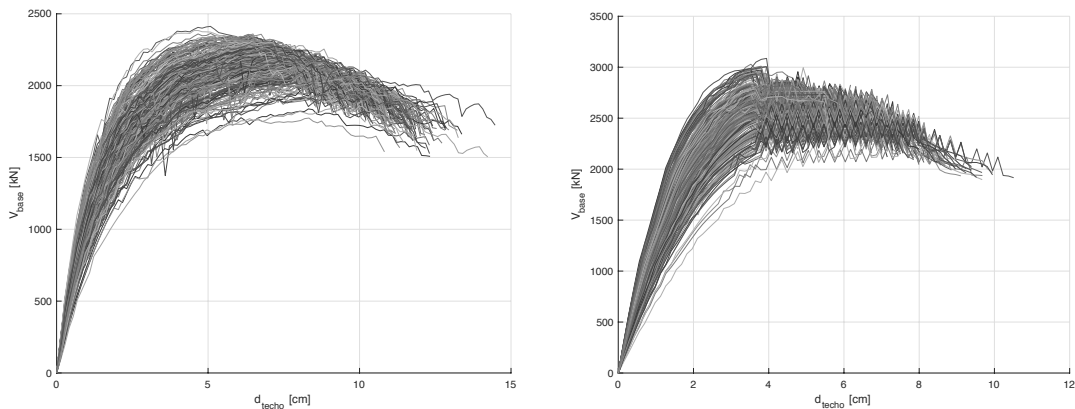


Fig. 4-2 Selección del punto último en las curvas de capacidad para las direcciones de análisis +X (*izq.*) y +Y (*der.*) del edificio ED-01 (fuente: preparado por el autor)

Las estadísticas básicas de los puntos de fluencia y último resultantes después de aplicar el criterio de corte seleccionado en este trabajo, se pueden observar en la Tabla 4-7. Adicionalmente, también podemos observar la información correspondiente al cortante basal máximo de las distintas curvas procesadas.

Tabla 4-7 Estadísticas básicas de los puntos de fluencia, último y cortante basal máximo de las curvas de capacidad en ambas direcciones del edificio ED-01 (fuente: preparado por el autor)

	Dir.	min	max	mean	median	std
$d_{\text{techo-yield}}$ [cm]	+X	0,12	0,84	0,37	0,34	0,15
	+Y	0,28	1,05	0,53	0,50	0,14
$V_{\text{base-yield}}$ [kN]	+X	207,65	769,71	450,15	446,23	126,25
	+Y	310,80	1132,30	715,85	725,39	204,42
$d_{\text{techo-ult}}$ [cm]	+X	6,48	14,23	10,24	10,07	1,29
	+Y	3,66	10,51	6,40	6,24	1,41
$V_{\text{base-ult}}$ [kN]	+X	1504,22	2351,97	1837,25	1838,65	123,49
	+Y	1897,36	3086,58	2474,52	2585,13	263,56
$V_{\text{base-max}}$ [kN]	+X	1774,37	2412,54	2200,57	2220,57	99,57
	+Y	2335,45	3086,58	2747,57	2776,57	145,17

A partir de los resultados anteriores, podemos observar que la curva correspondiente a la dirección +X presenta un desplazamiento último considerablemente más elevado que aquél obtenido para la dirección +Y. No obstante, en lo que se refiere al cortante basal, podemos observar que la dirección +Y presenta los valores más elevados, permitiéndonos concluir, por tanto, que la dirección +X presentará un comportamiento más dúctil que la dirección +Y, cuyo comportamiento habría de interpretarse como frágil.

Las distintas correlaciones existentes entre los resultados anteriores, con respecto a las variables de interés, se presentan en la Tabla 4-8 y la Tabla 4-9.

Tabla 4-8 Coeficientes de correlación entre los puntos de fluencia, último y cortante basal máximo y las variables aleatorias de interés en la dirección +X del edificio ED-01 (fuente: preparado por el autor)

	f_m	E	G	τ_0
$d_{\text{techo-yield}}$	-0,62	-0,65	-0,66	-0,55
$V_{\text{base-yield}}$	-0,29	-0,33	-0,36	-0,20
$d_{\text{techo-ult}}$	-0,85	-0,88	-0,79	-0,88
$V_{\text{base-ult}}$	0,76	0,73	0,70	0,76
$V_{\text{base-max}}$	0,93	0,87	0,78	0,93

Tabla 4-9 Coeficientes de correlación entre los puntos de fluencia, último y cortante basal máximo y las variables aleatorias de interés en la dirección +Y del edificio ED-01 (fuente: preparado por el autor)

	f_m	E	G	τ_0
$d_{\text{techo-yield}}$	0,07	0,03	-0,01	0,08
$V_{\text{base-yield}}$	0,59	0,58	0,54	0,58
$d_{\text{techo-ult}}$	-0,89	-0,89	-0,78	-0,89
$V_{\text{base-ult}}$	0,78	0,75	0,67	0,81
$V_{\text{base-max}}$	0,90	0,86	0,79	0,94

Las correlaciones obtenidas, en ambas direcciones, para los distintos parámetros de interés del edificio ED-01, permiten identificar coeficientes muy bajos para el caso del punto de fluencia, mientras que, por el contrario, para el punto último de la curva de capacidad, se tienen coeficientes elevados. En el caso del cortante basal máximo también se pueden observar coeficientes de correlación elevados con respecto a todas las propiedades aleatorias de interés.

Las estadísticas básicas de los resultados más relevantes, para cada uno de los edificios aislados, se muestran contenidos entre la Tabla 4-10 y la Tabla 4-12, cada una de las cuales se corresponde con uno de los parámetros de interés.

Tabla 4-10 Estadísticas básicas del desplazamiento en el techo de los puntos de últimos, $d_{techo-ult}$, de las curvas de capacidad de los diferentes edificios aislados [cm] (fuente: preparado por el autor)

	Dir.	min	max	mean	median	std
ED-01	+X	6,48	14,23	10,24	10,07	1,29
	+Y	3,66	10,51	6,40	6,24	1,41
ED-02	+X	7,27	18,30	13,12	13,28	1,74
	+Y	2,95	8,79	5,19	5,08	0,90
ED-03	+X	6,00	9,47	7,97	8,04	0,55
	+Y	5,22	9,43	7,21	7,21	0,74
ED-04	+X	6,34	12,51	8,48	8,31	0,89
	+Y	6,31	14,89	9,22	9,09	1,22

Tabla 4-11 Estadísticas básicas del cortante basal de los puntos últimos, $V_{base-ult}$, de las curvas de capacidad de los diferentes edificios aislados [kN] (fuente: preparado por el autor)

	Dir.	min	max	mean	median	std
ED-01	+X	1504,22	2351,97	1837,25	1838,65	123,49
	+Y	1897,36	3086,58	2474,52	2585,13	263,56
ED-02	+X	750,45	1202,57	936,70	924,16	82,06
	+Y	1318,13	1932,48	1743,52	1752,49	77,27
ED-03	+X	597,15	1001,02	799,70	799,20	57,80
	+Y	1139,13	1819,95	1464,46	1404,24	159,94
ED-04	+X	1689,95	2961,96	2546,66	2578,32	202,04
	+Y	1769,20	2851,29	2380,11	2382,57	162,34

Tabla 4-12 Estadísticas básicas del cortante basal máximo, $V_{base-max}$, de las curvas de capacidad de los diferentes edificios aislados [kN] (fuente: preparado por el autor)

	Dir.	min	max	mean	median	std
ED-01	+X	1774,37	2412,54	2200,57	2220,57	99,57
	+Y	2335,45	3086,58	2747,57	2776,57	145,17
ED-02	+X	897,24	1271,73	1133,23	1136,38	66,68
	+Y	1478,86	2065,65	1833,37	1848,20	100,96
ED-03	+X	724,28	1126,05	976,56	979,52	71,54
	+Y	1301,58	1882,16	1625,15	1636,20	97,58
ED-04	+X	1969,11	3095,25	2688,36	2704,90	171,14
	+Y	2058,07	2912,63	2602,99	2616,33	148,62

De forma análoga, los distintos coeficientes de correlación de los parámetros correspondientes a los puntos de fluencia y último, así como el cortante basal máximo, se presentan a continuación.

Tabla 4-13 Coeficientes de correlación entre los puntos de fluencia, último y cortante basal máximo y las variables aleatorias de interés para la dirección +X de los diferentes edificios aislados (fuente: preparado por el autor)

Edificio		f_m	E	G	τ_0
ED-01	$d_{techo-yield}$	-0,62	-0,65	-0,66	-0,55
	$d_{techo-ult}$	-0,85	-0,88	-0,79	-0,88
	$V_{base-max}$	0,93	0,87	0,78	0,93
ED-02	$d_{techo-yield}$	-0,26	-0,29	-0,31	-0,26
	$d_{techo-ult}$	-0,06	-0,07	-0,05	-0,09
	$V_{base-max}$	0,96	0,91	0,82	0,95
ED-03	$d_{techo-yield}$	-0,88	-0,89	-0,85	-0,89
	$d_{techo-ult}$	-0,15	-0,23	-0,23	-0,30
	$V_{base-max}$	0,98	0,93	0,83	0,96
ED-04	$d_{techo-yield}$	0,30	0,22	0,21	0,30
	$d_{techo-ult}$	-0,73	-0,74	-0,67	-0,75
	$V_{base-max}$	0,96	0,92	0,82	0,96

Tabla 4-14 Coeficientes de correlación entre los puntos de fluencia, último y cortante basal máximo y las variables aleatorias de interés para la dirección +Y de los diferentes edificios aislados (fuente: preparado por el autor)

Edificio		f_m	E	G	τ_0
ED-01	$d_{techo-icld}$	0,07	0,03	-0,01	0,08
	$d_{techo-ult}$	-0,89	-0,89	-0,78	-0,89
	$V_{base-max}$	0,90	0,86	0,79	0,94
ED-02	$d_{techo-icld}$	-0,47	-0,49	-0,55	-0,40
	$d_{techo-ult}$	-0,87	-0,92	-0,85	-0,87
	$V_{base-max}$	0,93	0,87	0,79	0,97
ED-03	$d_{techo-icld}$	-0,49	-0,56	-0,65	-0,43
	$d_{techo-ult}$	-0,89	-0,90	-0,80	-0,94
	$V_{base-max}$	0,93	0,87	0,77	0,98
ED-04	$d_{techo-icld}$	-0,45	-0,47	-0,52	-0,38
	$d_{techo-ult}$	-0,90	-0,88	-0,77	-0,92
	$V_{base-max}$	0,96	0,91	0,81	0,97

Se puede observar que, para el caso del cortante basal máximo, existen coeficientes de correlación positiva elevados para todas las propiedades mecánicas materiales, tanto para todas las estructuras, como en ambas direcciones.

4.2.3 Obtención del sistema equivalente de 1GDL

El siguiente paso del proceso establecido por el procedimiento estático no-lineal consiste en la conversión de la curva de capacidad (*i.e.* sistema de múltiples grados de libertad) a un sistema de fuerzas equivalente de un grado de libertad, *1GDL*. Este proceso conlleva la utilización de una serie de parámetros de reducción, calculados a partir de características intrínsecas de la estructura y otros datos obtenidos como resultado de los análisis modales realizados previamente. Como resultado se obtienen las curvas de capacidad escaladas con respecto a los valores de desplazamiento y fuerza equivalente obtenidos.

La Fig. 4-3 muestra la curva de capacidad del sistema equivalente de 1GDL del edificio aislado ED-01 en las dos direcciones de análisis principales.

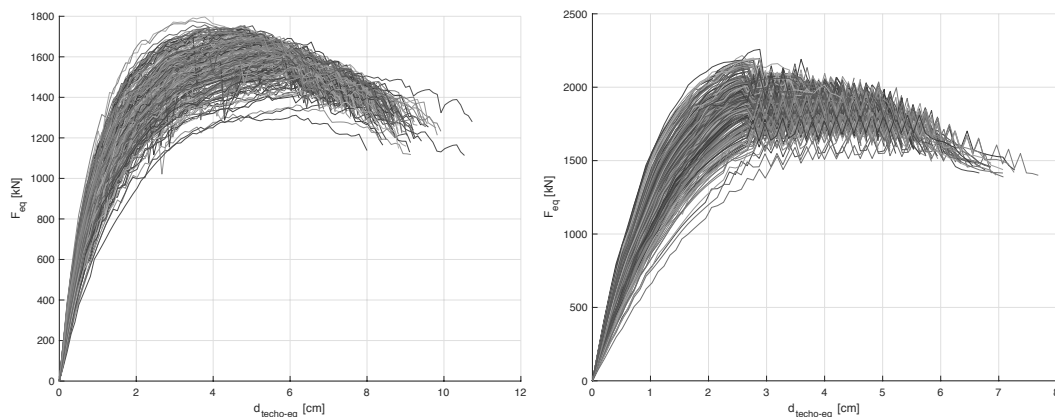


Fig. 4-3 Curvas de capacidad de los sistemas equivalentes de 1GDL para el edificio ED-01 de acuerdo con lo establecido en el procedimiento N2 para las direcciones de análisis +X (*izq.*) y +Y (*der.*) (fuente: preparado por el autor)

4.2.4 Curva de capacidad en formato aceleración-desplazamiento (ADRS)

A fin de poder confrontar la curva de capacidad de la estructura con el espectro de demanda sísmica, se ha de llevar a cabo una conversión de la primera a un formato espectral compatible con la segunda. Como resultado se obtienen las curvas de capacidad en formato aceleración-desplazamiento o ADRS,

cuyos ejes de abscisas y ordenadas, corresponderán al desplazamiento espectral, S_d , y a la aceleración espectral, S_a , respectivamente.

La Fig. 4-4 muestra las curvas en formato espectral para el edificio ED-01 en sus dos direcciones de análisis principales.

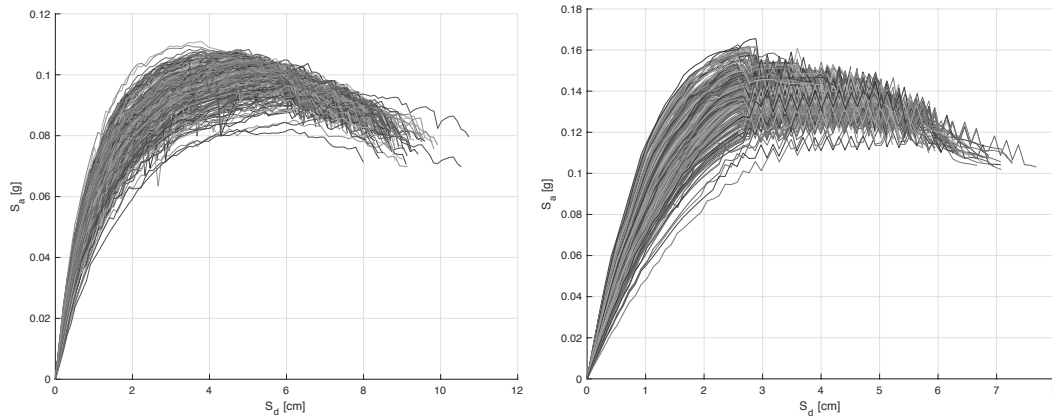


Fig. 4-4 Curvas de capacidad en formato desplazamiento-aceleración (ADRS) del edificio ED-01 de acuerdo con lo establecido en el procedimiento N2 para las direcciones de análisis +X (izq.) y +Y (der.) (fuente: preparado por el autor)

4.2.5 Representación bilineal

A continuación, se obtiene la representación bilineal de cada una de las curvas de capacidad en formato ADRS, a fin facilitar su cruce con el espectro de demanda sísmica, y la posterior obtención del punto de desempeño correspondiente.

Los criterios, pasos y resultados obtenidos en esta etapa son específicos de cada procedimiento estático no lineal y, por tanto, se ha de realizar una selección adecuada del procedimiento a emplear, ya que su selección incide en el resto de los resultados esperados para cada estructura.

A manera de facilitar su lectura, y evitar saturar la figura con la totalidad de representaciones bilineales, la Fig. 4-5 muestra la representación bilineal promedio del total de representaciones bilineales obtenidas a partir de las distintas curvas en formato espectral. Así mismo, se observan, a manera de nubes de puntos, los valores correspondientes a los puntos de fluencia y último de las representaciones bilineales obtenidas para la totalidad de curvas.

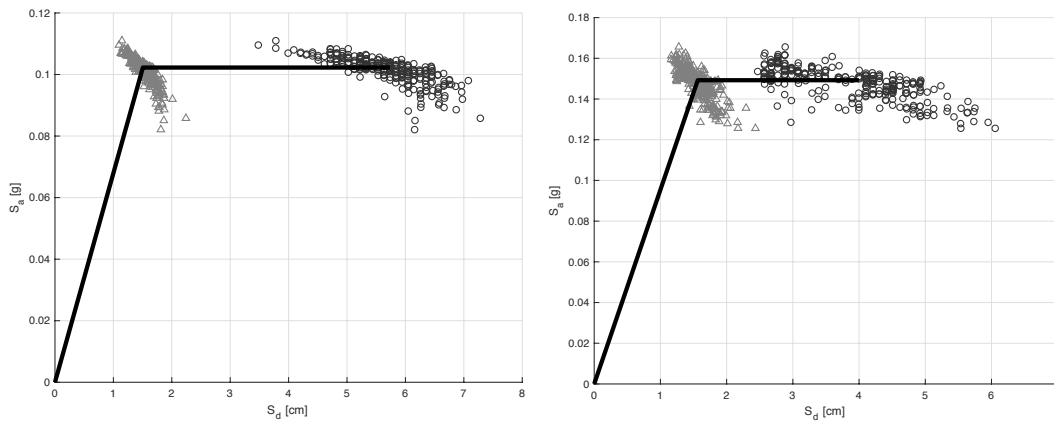


Fig. 4-5 Representación bilineal promedio y nubes de valores de los puntos de fluencia y último del edificio ED-01 de acuerdo con lo establecido en el procedimiento N2 para las direcciones de análisis +X (izq.) y +Y (der.) (fuente: preparado por el autor)

Como primera observación, podemos apreciar que los valores relacionados con el punto último tienen una mayor dispersión con respecto a aquellos relacionados con el punto de fluencia, que parecieran estar agrupados de una forma más compacta. Lo anterior confirma que la elección y dispersión del punto último, incide directamente en los resultados esperables para los distintos sistemas estructurales.

En la Tabla 4-15 se muestran las estadísticas básicas relacionadas con los puntos de fluencia y último de las distintas representaciones bilineales, para el edificio aislado ED-01 y en ambas direcciones.

Tabla 4-15 Estadísticas básicas de los puntos de fluencia y último de las representaciones bilineales en ambas direcciones del edificio ED-01, de acuerdo con lo establecido en el procedimiento N2 (fuente: preparado por el autor)

	Dir.	min	max	mean	median	std
S _{d-yield} [cm]	+X	1,10	2,24	1,51	1,51	0,18
	+Y	1,16	2,44	1,57	1,56	0,22
S _{a-yield} [g]	+X	0,08	0,11	0,10	0,10	0,00
	+Y	0,13	0,17	0,15	0,15	0,01
S _{d-ult} [cm]	+X	3,48	7,28	5,68	5,73	0,67
	+Y	2,47	6,06	3,84	4,00	0,90
S _{a-ult} [g]	+X	0,08	0,11	0,10	0,10	0,00
	+Y	0,13	0,17	0,15	0,15	0,01

Se puede observar la repetición de valores para las aceleraciones espectrales de ambos puntos. Lo anterior, se debe a las particularidades propias del método N2 al momento de definir los puntos que conforman la representación bilineal, asumiendo la representación bilineal como una curva elasto-plástica perfecta, donde la pendiente del tramo inelástico es nula, es decir, la meseta del tramo inelástico permanece horizontal.

Los coeficientes de correlación de los parámetros más relevantes de las distintas representaciones bilineales del edificio aislado, con respecto a las variables aleatorias de interés, se presentan en la Tabla 4-16 y la Tabla 4-17 para el edificio aislado ED-01.

Tabla 4-16 Coeficientes de correlación de las representaciones bilineales, entre los puntos de fluencia y último, y las variables aleatorias de interés, para la dirección +X del edificio ED-01 (fuente: preparado por el autor)

	f _m	E	G	τ ₀
S _{d-yield}	-0,89	-0,91	-0,85	-0,94
S _{a-yield}	0,93	0,86	0,76	0,93
S _{d-ult}	-0,81	-0,84	-0,73	-0,89
S _{a-ult}	0,93	0,86	0,76	0,93

Tabla 4-17 Coeficientes de correlación de las representaciones bilineales, entre los puntos de fluencia y último, y las variables aleatorias de interés, para la dirección +Y del edificio ED-01 (fuente: preparado por el autor)

	f _m	E	G	τ ₀
S _{d-yield}	-0,85	-0,93	-0,94	-0,79
S _{a-yield}	0,90	0,86	0,80	0,94
S _{d-ult}	-0,80	-0,81	-0,72	-0,78
S _{a-ult}	0,90	0,86	0,80	0,94

Una vez más, puede apreciarse que los valores correspondientes a las aceleraciones espectrales de los puntos de fluencia y último son idénticos, debido a la forma en que el método N2 define dichos valores. Es posible observar correlaciones con valores elevados para todas variables de interés, siendo G, la que presenta los valores más bajos en términos generales.

Las estadísticas básicas de los puntos de fluencia y último, para cada uno de los edificios aislados, se encuentran contenidos en la Tabla 4-18 y la Tabla 4-19, respectivamente.

Tabla 4-18 Estadísticas básicas del punto de fluencia, $S_{d-yield}$, de las representaciones bilineales en ambas direcciones de los edificios aislados, de acuerdo con lo establecido en el procedimiento N2 [cm] (fuente: preparado por el autor)

	Dir.	min	max	mean	median	std
ED-01	+X	1,10	2,24	1,51	1,51	0,18
	+Y	1,16	2,44	1,57	1,56	0,22
ED-02	+X	1,24	2,20	1,58	1,57	0,16
	+Y	1,15	2,61	1,68	1,66	0,25
ED-03	+X	1,24	2,23	1,57	1,55	0,17
	+Y	1,17	2,45	1,56	1,53	0,21
ED-04	+X	1,39	2,93	1,88	1,86	0,25
	+Y	1,49	3,13	1,99	1,93	0,28

Tabla 4-19 Estadísticas básicas del punto último, S_{d-ult} , de las representaciones bilineales en ambas direcciones de los edificios aislados, de acuerdo con lo establecido en el procedimiento N2 [cm] (fuente: preparado por el autor)

	Dir.	min	max	mean	median	std
ED-01	+X	3,48	7,28	5,68	5,73	0,67
	+Y	2,47	6,06	3,84	4,00	0,90
ED-02	+X	4,10	8,40	5,65	5,41	0,78
	+Y	1,83	5,03	2,99	2,95	0,62
ED-03	+X	3,15	4,77	3,72	3,72	0,20
	+Y	2,74	5,74	4,73	4,77	0,42
ED-04	+X	4,14	7,67	5,48	5,47	0,50
	+Y	3,73	7,55	5,20	4,62	0,91

Como puede observarse a partir de las tablas anteriores, los valores correspondientes a los desplazamientos del punto de fluencia presentan desviaciones estándar inferiores a aquellos relacionados con los puntos últimos, indicando con ello la gran variabilidad (*i.e.* dispersión) que presenta el punto último.

Adicionalmente, los datos recopilados en las tablas anteriores son de gran utilidad, ya que sirven de indicadores acerca de los rangos de valores esperables para ambos puntos, de fluencia y último, así como de la desviación estándar asociada. Lo anterior, permite, por tanto, emplear dichos datos, tanto en la definición de estados de daño, como en la creación de las curvas de fragilidad, ya que, en ocasiones, al no disponer de información específica de ciertas tipologías, se establecen rangos y desviaciones de forma genérica, que pueden no ser del todo adecuados para la tipología estructural estudiada.

Tabla 4-20 Coeficientes de correlación de las representaciones bilineales, entre los puntos de fluencia y último, y las variables aleatorias de interés, para la dirección +X de los diferentes edificios aislados (fuente: preparado por el autor)

		f_m	E	G	τ_0
ED-01	$S_{d-yield}$	-0,89	-0,91	-0,85	-0,94
	S_{d-ult}	-0,81	-0,84	-0,73	-0,89
ED-02	$S_{d-yield}$	-0,84	-0,91	-0,87	-0,86
	S_{d-ult}	-0,10	-0,16	-0,15	-0,17
ED-03	$S_{d-yield}$	-0,84	-0,94	-0,95	-0,80
	S_{d-ult}	-0,56	-0,62	-0,63	-0,67
ED-04	$S_{d-yield}$	-0,85	-0,94	-0,95	-0,79
	S_{d-ult}	-0,79	-0,83	-0,75	-0,82

Tabla 4-21 Coeficientes de correlación de las representaciones bilineales, entre los puntos de fluencia y último, y las variables aleatorias de interés, para la dirección +Y de los diferentes edificios aislados (fuente: preparado por el autor)

		f_m	E	G	τ_0
ED-01	$S_{d-yield}$	-0,85	-0,93	-0,94	-0,79
	S_{d-ult}	-0,80	-0,81	-0,72	-0,78
ED-02	$S_{d-yield}$	-0,88	-0,96	-0,96	-0,82
	S_{d-ult}	-0,89	-0,95	-0,88	-0,87
ED-03	$S_{d-yield}$	-0,83	-0,93	-0,95	-0,75
	S_{d-ult}	-0,78	-0,81	-0,76	-0,78
ED-04	$S_{d-yield}$	-0,85	-0,93	-0,91	-0,84
	S_{d-ult}	-0,70	-0,78	-0,73	-0,72

En general, puede observarse una correlación más elevada con respecto de los desplazamientos del punto de fluencia, siendo E y G , las variables con valores más elevados, al contrario de τ_0 , que presenta los valores más bajos.

4.3 Fragilidad y daño esperado

4.3.1 Curvas de fragilidad

Los estados de daño empleados en este trabajo (*i.e.* ligero, moderado, extenso, colapso - *ver 3.6.1*), quedan definidos a partir de los puntos de fluencia y último, obtenidos de las representaciones bilineales del punto anterior. Lo anterior, tal como se explica en el capítulo 3 (*ver 3.6.2.1*), permite la obtención de las curvas de fragilidad propias de la estructura analizada. Dichas curvas quedan definidas en función de un parámetro de intensidad, IM , previamente elegido que, para nuestro caso, será el desplazamiento espectral, S_d .

A continuación, se presentan las curvas de fragilidad obtenidas para ambas direcciones de interés del edificio aislado ED-01. Las curvas correspondientes al resto de edificios aislados pueden encontrarse en el Anejo correspondiente.

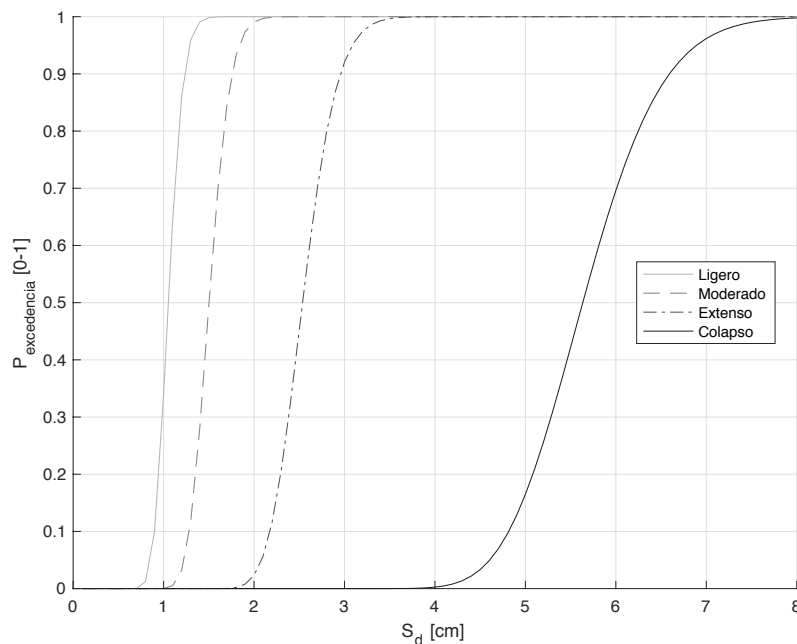


Fig. 4-6 Curvas de fragilidad para la dirección +X del edificio ED-01 (fuente: preparado por el autor)

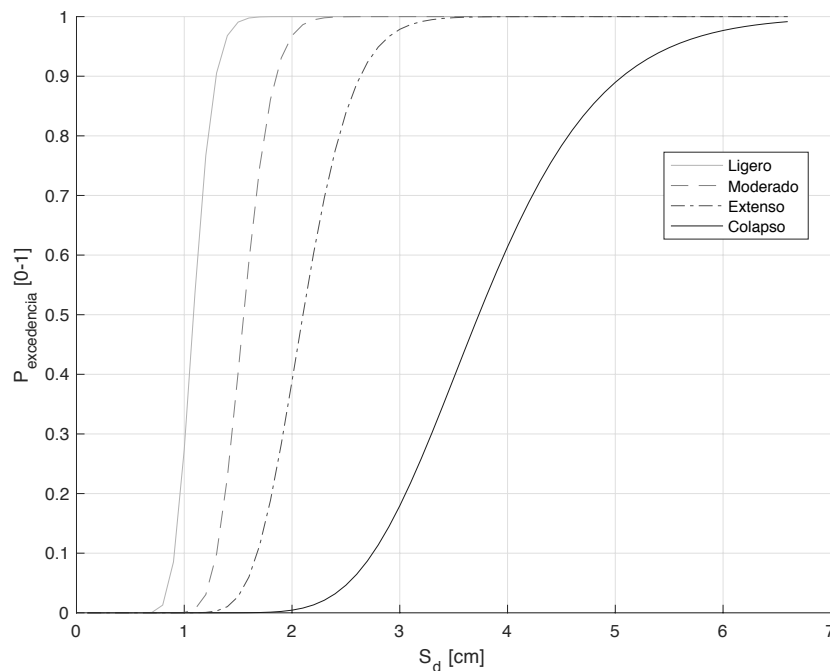


Fig. 4-7 Curvas de fragilidad para la dirección +Y del edificio ED-01 (fuente: preparado por el autor)

La utilidad última de las curvas de fragilidad es permitir determinar, de manera cuantitativa, el tipo de daño esperable en una estructura, a partir de las probabilidades de pertenencia que pueda tener con respecto a cada uno de los estados de daño previamente definidos para este propósito.

4.3.2 Estados de daño

Tal como se indicará más adelante en este capítulo, una vez obtenido el punto de cruce entre la capacidad y la demanda (*i.e.* punto de desempeño, P_p), se localiza dicho punto en las curvas de fragilidad y se hace la lectura de las probabilidades asociadas a cada uno de los estados de daño definidos en ellas.

Es importante recordar que, a pesar de no estar definido como tal, el estado de daño nulo puede obtenerse al restar la sumatoria del resto de probabilidades del 100% (*i.e.* 1) de probabilidad.

Una vez obtenidas las probabilidades correspondientes a un punto de desempeño en particular, P_p , para cada uno de los estados de daño, nulo y no-nulos, éstas pueden ser expresadas en forma de histograma, a fin de poder determinar de forma sencilla, cuáles son los estados de daño más y menos probables para dicho punto.

La Fig. 4-8 y Fig. 4-9 muestran las distintas probabilidades de ocurrencia del rango de desplazamientos espectrales (*i.e.* IM) que conforman la totalidad de las curvas de fragilidad mostradas anteriormente para el edificio ED-01, permitiendo con ello, observar la evolución de cada uno de los estados de daño conforme nos desplazamos a lo largo de las curvas de fragilidad. Se puede observar, por ejemplo, que la probabilidad de que el estado de daño sea nulo es del 100% (*i.e.* 1) para desplazamientos muy pequeños, mientras que, para desplazamientos superiores, el estado de daño nulo no tiene ninguna probabilidad de ocurrir.

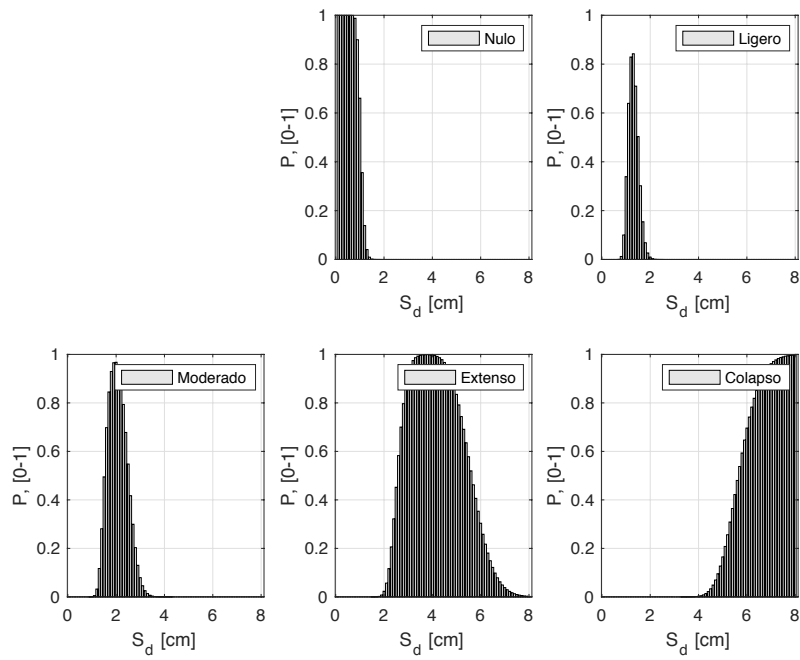


Fig. 4-8 Probabilidades de ocurrencia de los distintos estados de daño para diversos desplazamientos espectrales posibles obtenidos a partir de las curvas de fragilidad en la dirección +X del edificio ED-01 (fuente: preparado por el autor)

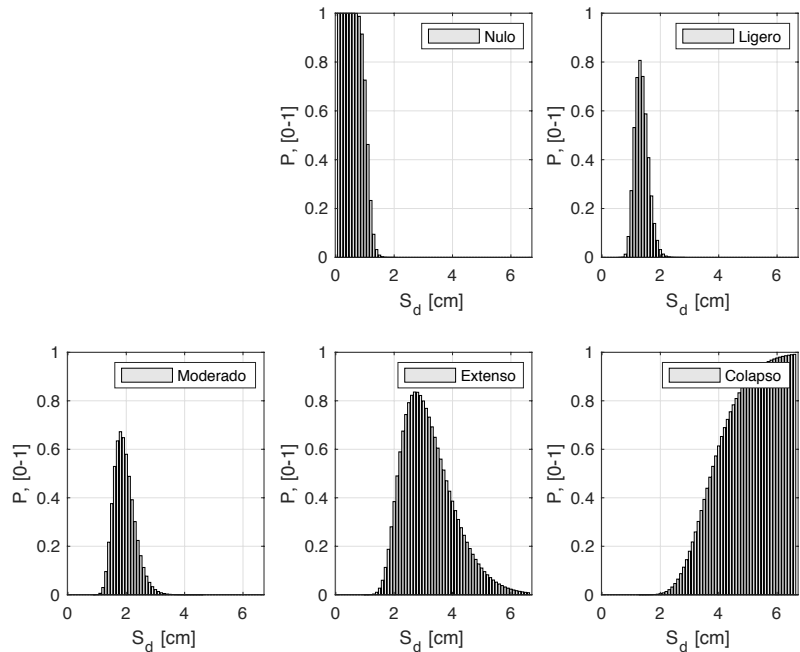


Fig. 4-9 Probabilidades de ocurrencia de los distintos estados de daño para diversos desplazamientos espectrales posibles obtenidos a partir de las curvas de fragilidad en la dirección +Y del edificio ED-01 (fuente: preparado por el autor)

Las figuras anteriores permiten, de manera muy simple, observar la entrada y salida a los distintos estados de daño, conforme los desplazamientos espectrales cambian, permitiendo generar un histograma con los distintos estados de daño para cualquier P_p de interés.

Es posible observar, por ejemplo, que, para la dirección +X del edificio ED-01, el estado de daño *Extenso* tendrá una mayor participación, en términos generales, que en la dirección +Y, en la cual el estado de daño de *Colapso* tendrá una participación más elevada.

Las figuras correspondientes al resto de edificios aislados pueden encontrarse en el Anejo correspondiente.

4.3.3 Punto de desempeño

El resultado de confrontar la capacidad de la estructura con la demanda solicitada es el denominado punto de capacidad por demanda o punto de desempeño. El punto de desempeño nos permite, a partir de las curvas de fragilidad y estados de daño previamente definidos, determinar las probabilidades de ocurrencia de dichos estados de daño y, por tanto, la toma de decisiones relacionadas con, primeramente, salvaguardar la vida y, posteriormente, mantener o elevar las condiciones estructurales del edificio estudiado.

En este apartado, los resultados se presentan para tres aceleraciones pico del terreno, *pga*, de interés. Estas aceleraciones, con valores de *0.04 g*, *0.141 g* y *0.194 g*, corresponden a los valores de referencia para la zona y tipo de terreno en que se encuentran las estructuras de este trabajo (*ver 2.2.2*), siendo el primero de ellos el propuesto en la Norma de Construcción Sismorresistente (NCSE-02, 2002), mientras que los otros dos valores se corresponden, respectivamente, con aquellos propuestos para los escenarios determinista y probabilista en el estudio llevado a cabo por el Instituto Cartográfico de Cataluña (Irizarry *et al.* (2003)).

A pesar de que en 2012 se llevó a cabo la actualización de los mapas de peligrosidad sísmica de España (Instituto Geográfico Nacional, 2013), a raíz de lo cual, para Barcelona, se incrementó el valor de *pga* de *0.04 g* a *0.09 g* y, a manera de demostrar la importancia de una correcta caracterización del tipo del terreno y la selección de una demanda adecuada, los resultados se presentan en función del valor que fue definido inicialmente en la norma, es decir, *0.04 g*.

El cálculo del punto de desempeño está directamente asociado con el procedimiento estático no-lineal seleccionado, así como con la aceleración pico del terreno para la cual se escalan los distintos espectros de respuesta empleados para ello. Los resultados obtenidos para los 278 conjuntos (*i.e.* sets) de propiedades mecánicas materiales del edificio ED-01, y su correspondiente distribución se muestran en la Fig. 4-10, para cada una de las direcciones de interés y el *pga* = *0.04 g*. Análogamente, los resultados para *pga* = *0.141 g* y *pga* = *0.194 g*, se muestran en la Fig. 4-11 y en la Fig. 4-12, respectivamente.

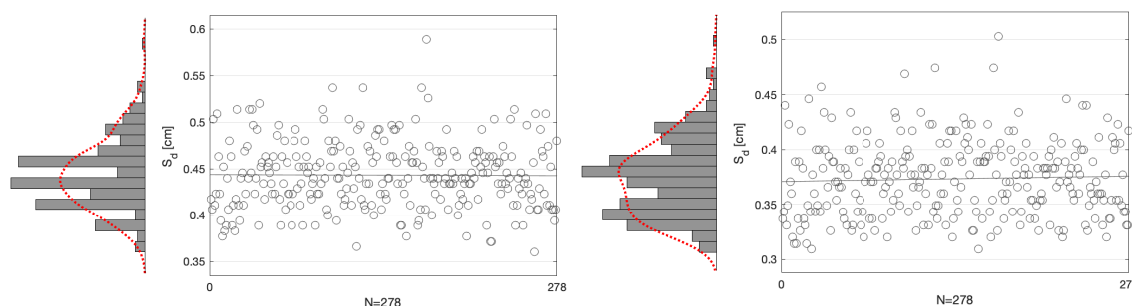


Fig. 4-10 Desplazamientos espectrales, S_d , de los puntos de desempeño, P_p , obtenidos para $pga = 0.04 g$ del edificio ED-01 en las direcciones +X (izq.) y +Y (der.), de acuerdo con lo establecido en el procedimiento N2 (fuente: preparado por el autor)

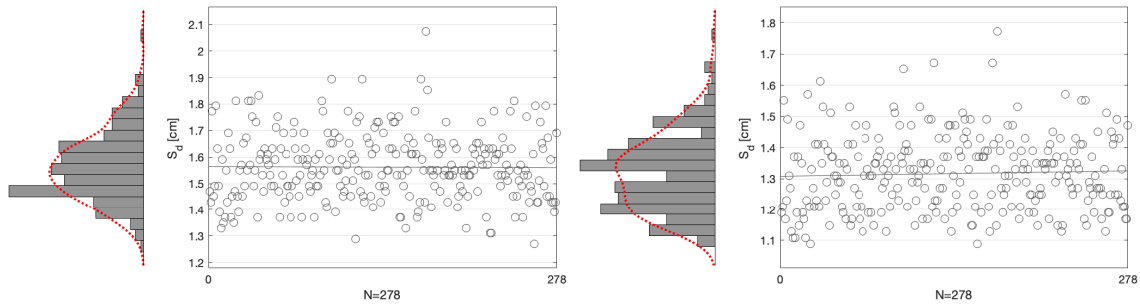


Fig. 4-11 Desplazamientos espectrales, S_d , de los puntos de desempeño, P_p , obtenidos para $pga = 0.141 g$ del edificio ED-01 en las direcciones +X (izq.) y +Y (der.), de acuerdo con lo establecido en el procedimiento N2 (fuente: preparado por el autor)

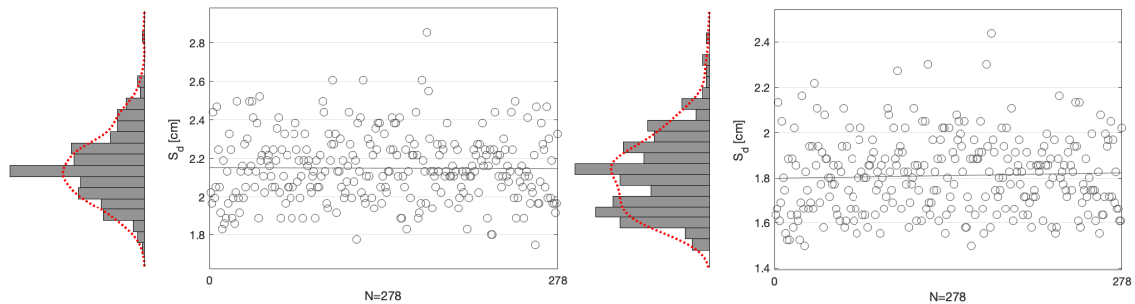


Fig. 4-12 Desplazamientos espectrales, S_d , de los puntos de desempeño, P_p , obtenidos para $pga = 0.194 g$ del edificio ED-01 en las direcciones +X (izq.) y +Y (der.), de acuerdo con lo establecido en el procedimiento N2 (fuente: preparado por el autor)

Puede observarse, como era de esperar, que a menor aceleración pico del terreno (*i.e.* pga), los valores de desplazamiento espectral de los diversos puntos de desempeño son inferiores y, que a medida que el pga aumenta, también lo hacen dichos desplazamientos espectrales.

Las estadísticas básicas para los puntos de desempeño encontrados para cada uno de los pga de interés, en cada dirección de análisis, se muestran para el edificio ED-01 en la Tabla 4-22.

Tabla 4-22 Estadísticas básicas de los puntos de desempeño para cada pga en ambas direcciones del edificio ED-01 [cm] (fuente: preparado por el autor)

	Dir.	min	max	mean	median	std
$S_{d-PP-0.04g}$	+X	0,36	0,59	0,44	0,44	0,04
	+Y	0,31	0,50	0,37	0,37	0,03
$S_{d-PP-0.141g}$	+X	1,27	2,08	1,56	1,55	0,13
	+Y	1,09	1,77	1,32	1,31	0,12
$S_{d-PP-0.194g}$	+X	1,75	2,86	2,15	2,13	0,18
	+Y	1,50	2,44	1,81	1,80	0,17

La Tabla 4-23 muestra los coeficientes de correlación existentes de los puntos de desempeño obtenidos para el edificio ED-01 en las dos direcciones principales de análisis. Ya que los puntos de desempeño se calculan a partir de escalar el mismo espectro de demanda para uno u otro pga , las correlaciones entre distintos valores de pga son idénticas.

Tabla 4-23 Coeficientes de correlación de los puntos de desempeño y las variables aleatorias de interés del edificio ED-01 (fuente: preparado por el autor)

	Dir.	f_m	E	G	τ_0
S_{d-PP}	+X	-0,92	-0,92	-0,85	-0,96
	+Y	-0,90	-0,95	-0,94	-0,86

A continuación, se presentan las estadísticas básicas para los puntos de desempeño de cada pga de interés, así como para ambas direcciones de análisis de todos los edificios aislados.

Tabla 4-24 Estadísticas básicas de los puntos de desempeño, S_{d-pp} , para $pga=0.04 g$, para todos los edificios aislados en ambas direcciones principales (fuente: preparado por el autor)

	Dir.	min	max	mean	median	std
ED-01	+X	0,36	0,59	0,44	0,44	0,04
	+Y	0,31	0,50	0,37	0,37	0,03
ED-02	+X	0,41	0,64	0,49	0,49	0,04
	+Y	0,29	0,50	0,37	0,37	0,04
ED-03	+X	0,40	0,65	0,48	0,48	0,04
	+Y	0,29	0,49	0,35	0,35	0,03
ED-04	+X	0,34	0,57	0,41	0,41	0,04
	+Y	0,35	0,59	0,43	0,42	0,04

Tabla 4-25 Estadísticas básicas de los puntos de desempeño, S_{d-pp} , para $pga=0.141 g$, para todos los edificios aislados en ambas direcciones principales (fuente: preparado por el autor)

	Dir.	min	max	mean	median	std
ED-01	+X	1,27	2,08	1,56	1,55	0,13
	+Y	1,09	1,77	1,32	1,31	0,12
ED-02	+X	1,45	2,26	1,73	1,73	0,13
	+Y	1,03	1,75	1,30	1,29	0,13
ED-03	+X	1,41	2,28	1,70	1,69	0,15
	+Y	1,01	1,71	1,23	1,22	0,12
ED-04	+X	1,19	1,99	1,43	1,43	0,14
	+Y	1,25	2,08	1,50	1,47	0,15

Tabla 4-26 Estadísticas básicas de los puntos de desempeño, S_{d-pp} , para $pga=0.194 g$, para todos los edificios aislados en ambas direcciones principales (fuente: preparado por el autor)

	Dir.	min	max	mean	median	std
ED-01	+X	1,75	2,86	2,15	2,13	0,18
	+Y	1,50	2,44	1,81	1,80	0,17
ED-02	+X	2,00	3,10	2,39	2,38	0,18
	+Y	1,41	2,41	1,79	1,77	0,18
ED-03	+X	1,94	3,13	2,34	2,33	0,21
	+Y	1,39	2,36	1,69	1,68	0,16
ED-04	+X	1,64	2,74	1,97	1,97	0,19
	+Y	1,72	2,86	2,06	2,02	0,20

A partir de estos resultados, podemos confirmar una vez más que, conforme se incursiona en estados de daño superiores (*i.e.* S_{d-pp} mayores), la variabilidad de los resultados también aumenta, lo cual está estrechamente relacionado con la definición de los estados de daño superiores, para los cuales, se considera, parcial o totalmente, la participación del desplazamiento correspondiente al punto último obtenido de las representaciones bilineales.

La Tabla 4-27 muestra los coeficientes de correlación existentes entre los puntos de desempeño y las variables aleatorias de interés, para cada uno de los edificios en sus dos direcciones principales de análisis.

Tabla 4-27 Coeficientes de correlación de los puntos de desempeño y las variables aleatorias de interés para todos los edificios (fuente: preparado por el autor)

	Dir.	f_m	E	G	τ_0
ED-01	+X	-0,92	-0,92	-0,85	-0,96
	+Y	-0,90	-0,95	-0,94	-0,86
ED-02	+X	-0,92	-0,95	-0,88	-0,93
	+Y	-0,91	-0,96	-0,95	-0,88
	+X	-0,92	-0,97	-0,92	-0,89

ED-03	+Y	-0,90	-0,96	-0,94	-0,86
ED-04	+X	-0,91	-0,96	-0,94	-0,87
	+Y	-0,90	-0,94	-0,90	-0,89

Se pueden observar coeficientes de correlación elevados para todos los edificios en sus dos direcciones, siendo *E* y *G*, las variables que presentan las mayores correlaciones.

Las estadísticas básicas de las probabilidades de pertenencia a cada uno de los estados de daño que tienen los diversos puntos de desempeño del edificio ED-01 se presentan en las tablas Tabla 4-28 y Tabla 4-29.

Tabla 4-28 Estadísticas básicas de las probabilidades de pertenencia a los distintos estados de daño de los puntos de desempeño obtenidos para cada *pga* en la dirección +X del edificio ED-01 [%] (fuente: preparado por el autor)

	Daño	min	max	mean	median	std
P(S _{d-PP-0.04g})	<i>Nulo</i>	100,00	100,00	100,00	100,00	0,00
	<i>Ligero</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	<i>Moderado</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	<i>Extenso</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	<i>Colapso</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P(S _{d-PP-0.141g})	<i>Nulo</i>	0,00	7,07	0,38	0,10	0,80
	<i>Ligero</i>	0,45	84,10	40,28	39,99	20,67
	<i>Moderado</i>	9,10	96,34	59,28	59,90	21,15
	<i>Extenso</i>	0,00	4,83	0,05	0,00	0,30
	<i>Colapso</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P(S _{d-PP-0.194g})	<i>Nulo</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	<i>Ligero</i>	0,00	11,46	0,74	0,22	1,40
	<i>Moderado</i>	16,30	96,75	86,99	92,05	12,42
	<i>Extenso</i>	0,11	83,70	12,27	7,72	12,95
	<i>Colapso</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabla 4-29 Estadísticas básicas de las probabilidades de pertenencia a los distintos estados de daño de los puntos de desempeño obtenidos para cada *pga* en la dirección +Y del edificio ED-01 [%] (fuente: preparado por el autor)

	Daño	min	max	mean	median	std
P(S _{d-PP-0.04g})	<i>Nulo</i>	100,00	100,00	100,00	100,00	0,00
	<i>Ligero</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	<i>Moderado</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	<i>Extenso</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	<i>Colapso</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P(S _{d-PP-0.141g})	<i>Nulo</i>	0,02	49,43	13,15	8,86	11,71
	<i>Ligero</i>	16,94	80,05	71,08	74,75	9,67
	<i>Moderado</i>	0,53	66,22	14,82	10,71	13,08
	<i>Extenso</i>	0,01	16,72	0,94	0,38	1,66
	<i>Colapso</i>	0,00	0,09	0,00	0,00	0,01
P(S _{d-PP-0.194g})	<i>Nulo</i>	0,00	0,99	0,08	0,01	0,16
	<i>Ligero</i>	0,05	59,24	18,27	13,76	14,57
	<i>Moderado</i>	19,94	67,21	59,57	62,50	7,87
	<i>Extenso</i>	2,67	76,25	21,84	18,91	14,14
	<i>Colapso</i>	0,01	3,76	0,23	0,11	0,37

En las tablas anteriores, se puede apreciar la distribución de los estados de daño correspondientes a cada uno de los valores de *pga* de interés, pudiendo observar que, para el caso de *pga* = 0.04g, la totalidad de puntos se concentra en el estado de daño *Nulo*. En el caso del *pga* = 0.141g, para las direcciones +X e +Y, los estados *Moderado* y *Ligero*, dominan, respectivamente. En lo que respecta al *pga* = 0.194g, se observa que, en ambas direcciones, el estado de daño *Moderado* es el que presenta mayor concentración de porcentaje.

Es importante prestar atención a la distribución de porcentajes asignada al resto de estados de daño, con la finalidad de poder determinar la tendencia del daño para la estructura analizada, detectando así, si la mayoría de porcentaje se presenta en estados de daño inferiores o superiores.

Tal como se presentó para el edificio ED-01, las estadísticas básicas de las probabilidades de pertenencia a cada uno de los estados de daño que tienen los diversos puntos de desempeño de los distintos edificios, se presentan a continuación para cada una de sus direcciones.

Tabla 4-30 Estadísticas básicas de las probabilidades de pertenencia a los distintos estados de daño de los puntos de desempeño obtenidos para cada *pga* en la dirección +X del edificio ED-02 [%] (fuente: preparado por el autor)

	Daño	min	max	mean	median	std
P(S _{d-PP-0,04g})	<i>Nulo</i>	100,00	100,00	100,00	100,00	0,00
	<i>Ligero</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	<i>Moderado</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	<i>Extenso</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	<i>Colapso</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P(S _{d-PP-0,141g})	<i>Nulo</i>	0,00	0,41	0,01	0,00	0,03
	<i>Ligero</i>	0,02	77,45	22,87	17,21	18,47
	<i>Moderado</i>	22,13	98,65	77,02	82,78	18,38
	<i>Extenso</i>	0,00	9,15	0,10	0,01	0,61
	<i>Colapso</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P(S _{d-PP-0,194g})	<i>Nulo</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	<i>Ligero</i>	0,00	0,83	0,03	0,00	0,09
	<i>Moderado</i>	3,36	98,67	74,53	78,88	20,71
	<i>Extenso</i>	0,49	96,64	25,43	21,12	20,74
	<i>Colapso</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabla 4-31 Estadísticas básicas de las probabilidades de pertenencia a los distintos estados de daño de los puntos de desempeño obtenidos para cada *pga* en la dirección +Y del edificio ED-02 [%] (fuente: preparado por el autor)

	Daño	min	max	mean	median	std
P(S _{d-PP-0,04g})	<i>Nulo</i>	100,00	100,00	100,00	100,00	0,00
	<i>Ligero</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	<i>Moderado</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	<i>Extenso</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	<i>Colapso</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P(S _{d-PP-0,141g})	<i>Nulo</i>	0,38	78,11	28,38	24,65	18,82
	<i>Ligero</i>	21,76	75,45	62,73	67,30	12,86
	<i>Moderado</i>	0,12	39,80	7,19	4,45	7,47
	<i>Extenso</i>	0,01	23,57	1,67	0,64	2,71
	<i>Colapso</i>	0,00	0,68	0,02	0,00	0,06
P(S _{d-PP-0,194g})	<i>Nulo</i>	0,00	9,95	0,97	0,30	1,65
	<i>Ligero</i>	0,69	75,03	34,54	32,67	19,45
	<i>Moderado</i>	11,61	41,54	34,99	37,13	6,90
	<i>Extenso</i>	2,56	70,41	27,99	25,66	16,38
	<i>Colapso</i>	0,02	17,28	1,52	0,79	2,08

Tabla 4-32 Estadísticas básicas de las probabilidades de pertenencia a los distintos estados de daño de los puntos de desempeño obtenidos para cada *pga* en la dirección +X del edificio ED-03 [%] (fuente: preparado por el autor)

	Daño	min	max	mean	median	std
P(S _{d-PP-0,04g})	<i>Nulo</i>	100,00	100,00	100,00	100,00	0,00
	<i>Ligero</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	<i>Moderado</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	<i>Extenso</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	<i>Colapso</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P(S _{d-PP-0,141g})	<i>Nulo</i>	0,00	1,06	0,07	0,00	0,17
	<i>Ligero</i>	0,03	80,88	28,52	23,15	21,13
	<i>Moderado</i>	16,49	87,63	67,35	72,67	18,63
	<i>Extenso</i>	0,00	83,47	4,06	0,36	9,92
	<i>Colapso</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P(S _{d-PP-0,194g})	<i>Nulo</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	<i>Ligero</i>	0,00	2,60	0,16	0,01	0,36
	<i>Moderado</i>	0,00	80,53	19,62	10,59	21,15
	<i>Extenso</i>	16,86	100,00	80,22	89,40	21,45
	<i>Colapso</i>	0,00	0,12	0,00	0,00	0,01

Tabla 4-33 Estadísticas básicas de las probabilidades de pertenencia a los distintos estados de daño de los puntos de desempeño obtenidos para cada *pga* en la dirección +Y del edificio ED-03 [%] (fuente: preparado por el autor)

	Daño	min	max	mean	median	std
P(S _{d-PP-0.04g})	<i>Nulo</i>	100,00	100,00	100,00	100,00	0,00
	<i>Ligero</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	<i>Moderado</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	<i>Extenso</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	<i>Colapso</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P(S _{d-PP-0.141g})	<i>Nulo</i>	0,04	71,01	23,67	20,09	17,22
	<i>Ligero</i>	23,17	81,05	68,36	72,13	12,66
	<i>Moderado</i>	0,09	76,56	7,97	4,03	10,54
	<i>Extenso</i>	0,00	0,23	0,00	0,00	0,01
	<i>Colapso</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P(S _{d-PP-0.194g})	<i>Nulo</i>	0,00	3,72	0,31	0,07	0,57
	<i>Ligero</i>	0,10	75,82	30,70	28,25	19,47
	<i>Moderado</i>	20,46	90,72	67,62	69,33	18,60
	<i>Extenso</i>	0,00	52,18	1,36	0,13	4,51
	<i>Colapso</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabla 4-34 Estadísticas básicas de las probabilidades de pertenencia a los distintos estados de daño de los puntos de desempeño obtenidos para cada *pga* en la dirección +X del edificio ED-04 [%] (fuente: preparado por el autor)

	Daño	min	max	mean	median	std
P(S _{d-PP-0.04g})	<i>Nulo</i>	100,00	100,00	100,00	100,00	0,00
	<i>Ligero</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	<i>Moderado</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	<i>Extenso</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	<i>Colapso</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P(S _{d-PP-0.141g})	<i>Nulo</i>	0,07	75,72	29,63	25,12	19,91
	<i>Ligero</i>	24,24	81,55	64,93	69,99	15,78
	<i>Moderado</i>	0,04	69,34	5,44	2,52	8,59
	<i>Extenso</i>	0,00	0,12	0,00	0,00	0,01
	<i>Colapso</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P(S _{d-PP-0.194g})	<i>Nulo</i>	0,00	4,74	0,52	0,11	0,96
	<i>Ligero</i>	0,18	78,81	37,35	34,29	21,38
	<i>Moderado</i>	16,46	90,18	61,05	65,51	20,85
	<i>Extenso</i>	0,00	47,18	1,08	0,09	3,87
	<i>Colapso</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabla 4-35 Estadísticas básicas de las probabilidades de pertenencia a los distintos estados de daño de los puntos de desempeño obtenidos para cada *pga* en la dirección +Y del edificio ED-04 [%] (fuente: preparado por el autor)

	Daño	min	max	mean	median	std
P(S _{d-PP-0.04g})	<i>Nulo</i>	100,00	100,00	100,00	100,00	0,00
	<i>Ligero</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	<i>Moderado</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	<i>Extenso</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	<i>Colapso</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P(S _{d-PP-0.141g})	<i>Nulo</i>	0,17	76,36	33,02	33,14	20,14
	<i>Ligero</i>	23,58	79,76	61,89	65,12	15,65
	<i>Moderado</i>	0,06	61,16	5,06	1,74	7,79
	<i>Extenso</i>	0,00	2,67	0,03	0,00	0,18
	<i>Colapso</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P(S _{d-PP-0.194g})	<i>Nulo</i>	0,00	5,86	0,77	0,30	1,16
	<i>Ligero</i>	0,38	78,42	40,61	42,92	21,24
	<i>Moderado</i>	15,64	76,10	53,81	54,99	17,41
	<i>Extenso</i>	0,07	58,45	4,81	1,79	7,21
	<i>Colapso</i>	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00

4.3.4 Grado de daño medio

Finalmente, y a manera de obtener una valoración general (*i.e.* global) sobre la probabilidad de daño que puedan presentar las distintas estructuras, se obtiene el grado de daño medio (*i.e.* índice de daño – *ver 3.6.1.1*).

El grado de daño medio se expresa como una curva IM vs. $Prob_{daño}$, a partir de la cual, mediante el uso del desplazamiento asociado a cada uno de los puntos de desempeño encontrados, se puede leer el porcentaje de daño general (*i.e.* global) en que se incurre con dicho desplazamiento.

Las curvas del grado de daño medio obtenidas para el edificio ED-01, en ambas direcciones de análisis se muestran en la Fig. 4-13 y Fig. 4-14.

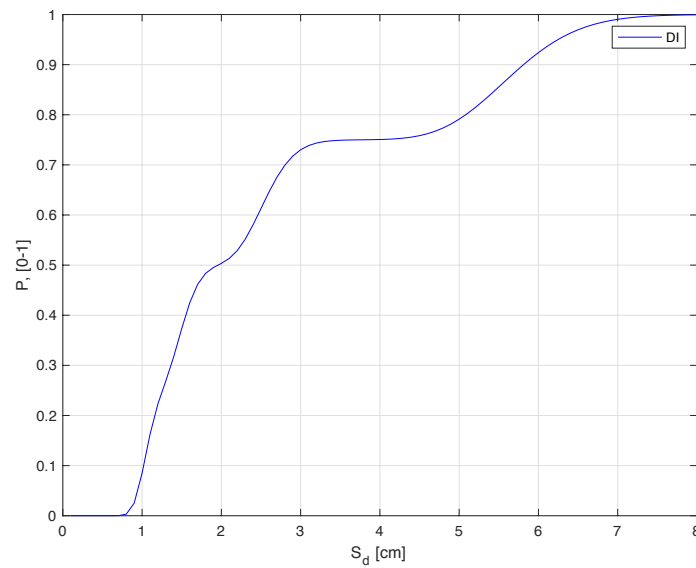


Fig. 4-13 Curva del grado de daño medio (*i.e.* índice de Daño, DI) para el edificio ED-01 en la dirección +X (fuente: preparado por el autor)

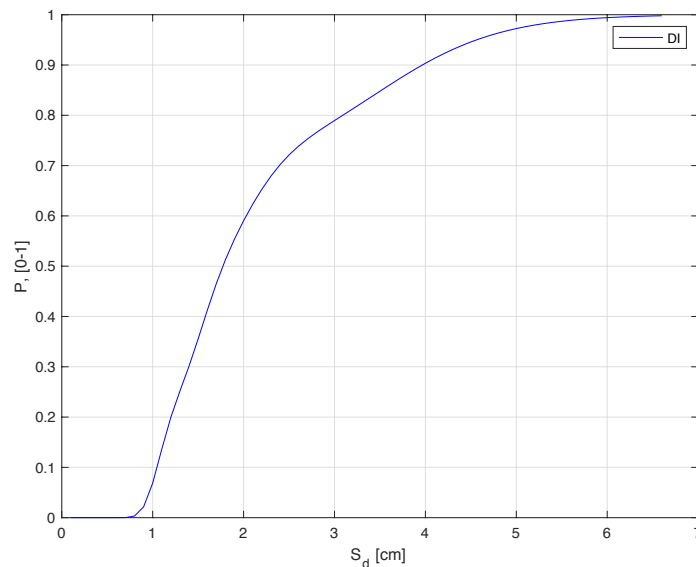


Fig. 4-14 Curva del grado de daño medio (*i.e.* índice de Daño, DI) para el edificio ED-01 en la dirección +Y (fuente: preparado por el autor)

De la misma manera en que se obtuvieron las probabilidades para cada uno de los desplazamientos de los puntos de desempeño, se obtienen los valores correspondientes al índice de daño para cada uno de los *pga* de interés en ambas direcciones del edificio ED-01, así como sus estadísticas básicas correspondientes.

Tabla 4-36 Estadísticas básicas de las probabilidades del índice de daño, *DI*, de los puntos de desempeño obtenidos para cada *pga* en ambas direcciones del edificio ED-01 [%] (fuente: preparado por el autor)

	Dir.	min	max	mean	median	std
P($S_{d-PP-0.04g}$)	+X	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	+Y	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P($S_{d-PP-0.141g}$)	+X	25,51	51,10	39,75	39,95	5,47
	+Y	12,78	49,98	25,89	25,65	6,47
P($S_{d-PP-0.194g}$)	+X	47,16	70,92	52,88	51,88	3,40
	+Y	35,36	70,93	50,97	51,34	7,11

Podemos observar que, a medida que el *pga* se incrementa, el porcentaje de daño global también se eleva, llegando incluso a superar valores por encima del 70% de daño global. La interpretación y finalidad de los porcentajes obtenidos en el punto anterior, puede ser varios, permitiendo realizar estimaciones de las acciones e intervenciones requeridas, así como de costes económicos esperables en el caso de que dichos escenarios se presenten.

Tabla 4-37 Coeficientes de correlación de las probabilidades del índice de daño, *DI*, de los puntos de desempeño y las variables aleatorias de interés para el edificio ED-01 (fuente: preparado por el autor)

	Dir.	f_m	E	G	τ_0
P($S_{d-PP-0.04g}$)	+X	-0,37	-0,40	-0,34	-0,38
	+Y	-0,17	-0,21	-0,19	-0,18
P($S_{d-PP-0.141g}$)	+X	-0,93	-0,92	-0,85	-0,97
	+Y	-0,90	-0,95	-0,94	-0,86
P($S_{d-PP-0.194g}$)	+X	-0,86	-0,86	-0,79	-0,89
	+Y	-0,91	-0,96	-0,95	-0,87

Podemos observar que las correlaciones asociadas a valores de *pga* inferiores no presentan valores demasiado altos, tal como ocurre para los otros valores de aceleración empleados.

Los resultados correspondientes al resto de los edificios aislados se presentan a continuación.

Tabla 4-38 Estadísticas básicas de las probabilidades del índice de daño, *DI*, de los puntos de desempeño obtenidos para cada *pga* en ambas direcciones del edificio ED-02 [%] (fuente: preparado por el autor)

	Dir.	min	max	mean	median	std
P($S_{d-PP-0.04g}$)	+X	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	+Y	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P($S_{d-PP-0.141g}$)	+X	30,43	52,28	44,30	45,70	4,66
	+Y	5,51	47,15	20,55	20,27	7,39
P($S_{d-PP-0.194g}$)	+X	49,91	74,16	56,35	55,28	5,19
	+Y	26,92	76,07	48,64	48,49	10,32

Tabla 4-39 Estadísticas básicas de las probabilidades del índice de daño, *DI*, de los puntos de desempeño obtenidos para cada *pga* en ambas direcciones del edificio ED-03 [%] (fuente: preparado por el autor)

	Dir.	min	max	mean	median	std
P($S_{d-PP-0.04g}$)	+X	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	+Y	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P($S_{d-PP-0.141g}$)	+X	29,25	70,86	43,85	44,30	6,88
	+Y	7,27	44,25	21,08	20,99	6,40
P($S_{d-PP-0.194g}$)	+X	53,56	75,03	70,02	72,35	5,44
	+Y	29,19	63,02	42,51	42,93	5,64

Tabla 4-40 Estadísticas básicas de las probabilidades del índice de daño, DI , de los puntos de desempeño obtenidos para cada pga en ambas direcciones del edificio ED-04 [%] (fuente: preparado por el autor)

	Dir.	min	max	mean	median	std
$P(S_{d-PP-0.04g})$	+X	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	+Y	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$P(S_{d-PP-0.141g})$	+X	6,08	42,38	18,95	19,35	6,58
	+Y	5,92	41,58	18,03	17,15	6,60
$P(S_{d-PP-0.194g})$	+X	27,93	61,75	40,67	41,39	6,16
	+Y	27,48	64,53	40,67	39,57	7,21

Tabla 4-41 Coeficientes de correlación de las probabilidades del índice de daño, DI , de los puntos de desempeño y las variables aleatorias de interés para todos los edificios y $pga = 0.04 g$ (fuente: preparado por el autor)

	Dir.	f_m	E	G	τ_0
ED-01	+X	-0,37	-0,40	-0,34	-0,38
	+Y	-0,17	-0,21	-0,19	-0,18
ED-02	+X	-0,16	-0,19	-0,17	-0,16
	+Y	-0,59	-0,62	-0,58	-0,58
ED-03	+X	-0,21	-0,24	-0,20	-0,21
	+Y	-0,37	-0,41	-0,36	-0,36
ED-04	+X	-0,24	-0,27	-0,24	-0,24
	+Y	-0,33	-0,36	-0,31	-0,33

Tabla 4-42 Coeficientes de correlación de las probabilidades del índice de daño, DI , de los puntos de desempeño y las variables aleatorias de interés para todos los edificios y $pga = 0.141 g$ (fuente: preparado por el autor)

	Dir.	f_m	E	G	τ_0
ED-01	+X	-0,93	-0,92	-0,85	-0,97
	+Y	-0,90	-0,95	-0,94	-0,86
ED-02	+X	-0,90	-0,92	-0,86	-0,91
	+Y	-0,91	-0,96	-0,95	-0,89
ED-03	+X	-0,92	-0,97	-0,93	-0,89
	+Y	-0,90	-0,97	-0,95	-0,86
ED-04	+X	-0,92	-0,97	-0,95	-0,88
	+Y	-0,91	-0,95	-0,91	-0,90

Tabla 4-43 Coeficientes de correlación de las probabilidades del índice de daño, DI , de los puntos de desempeño y las variables aleatorias de interés para todos los edificios y $pga = 0.194 g$ (fuente: preparado por el autor)

	Dir.	f_m	E	G	τ_0
ED-01	+X	-0,86	-0,86	-0,79	-0,89
	+Y	-0,91	-0,96	-0,95	-0,87
ED-02	+X	-0,88	-0,91	-0,84	-0,89
	+Y	-0,92	-0,96	-0,95	-0,89
ED-03	+X	-0,86	-0,91	-0,87	-0,82
	+Y	-0,90	-0,97	-0,96	-0,86
ED-04	+X	-0,92	-0,97	-0,95	-0,88
	+Y	-0,91	-0,95	-0,91	-0,90

Puede observarse que, para todos los valores de pga elevados y, para la mayoría de las estructuras y direcciones, la variable aleatoria con mayor coeficiente de correlación es la E . Tal como se concluyó para edificio ED-01, los valores de pga inferiores, presentan una correlación baja, a diferencia de lo que ocurre con valores de pga mayores, para los cuales, dicha correlación es elevada.

4.4 Análisis dinámico

Los diversos análisis dinámicos se realizaron conforme a lo descrito en el capítulo 3 (ver 3.5.2). Para ello, fue necesario seleccionar una muestra suficientemente representativa, a fin de reducir el número de

análisis en la medida de lo posible, y hacer viable su cálculo a gran escala, para todos los edificios aislados analizados en este trabajo.

Tal como se detalla en los apartados correspondientes del capítulo 3, un total de siete registros de aceleraciones del terreno fueron seleccionados, así como un total de cinco valores de aceleración pico del terreno, pga , para su posterior escalado.

Un total de 370 análisis se realizaron para cada una de las direcciones de, a su vez, cada uno de los edificios aislados. Los resultados de dichos análisis se presentan en este apartado de forma detallada para el edificio ED-01, y de forma resumida para el resto de las estructuras. La completitud de resultados y figuras de todos los análisis realizados se encuentran en el anejo correspondiente.

Se pretende, también, mostrar los distintos coeficientes de correlación existentes entre las variables aleatorias de interés (*i.e.* propiedades mecánicas materiales) y los distintos parámetros calculados y obtenidos a partir de los análisis dinámicos.

La Fig. 4-15 muestra la distribución de los distintos análisis realizados, observándose así, que el muestreo realizado fue capaz de cubrir de forma adecuada los distintos posibles parámetros (*i.e.* registros de aceleraciones, valores de pga y conjuntos de propiedades materiales).

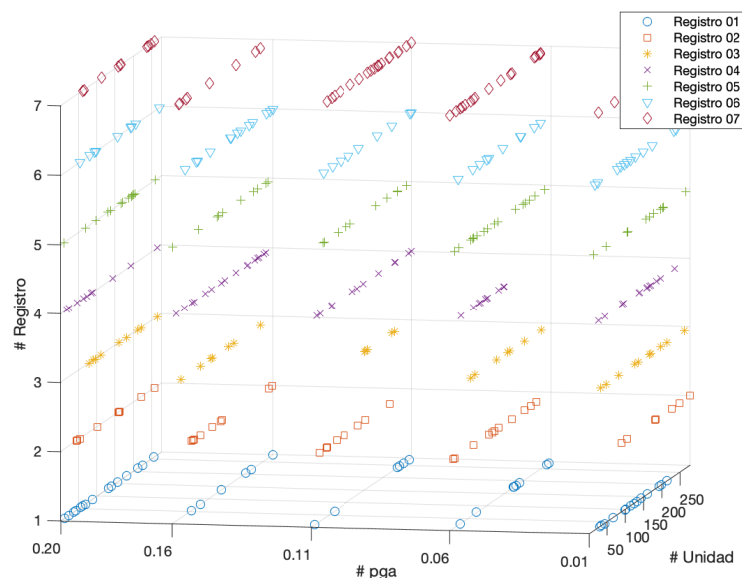


Fig. 4-15 Distribución de los 370 análisis dinámicos llevados a cabo de acuerdo con los registros sísmicos (7), pga (5), y conjuntos de propiedades mecánicas materiales (278) disponibles (fuente: preparado por el autor)

Una vez llevados a cabo los análisis utilizando el programa 3muri (Galasco *et al.*, 2002; S.T.A. DATA, 2012; Lagomarsino *et al.*, 2013), los resultados se post-procesaron mediante rutinas preparadas para ello en el programa MATLAB (The MathWorks, 2018a).

La Fig. 4-16 muestra, como ejemplo, la historia temporal de aceleración, desplazamiento en el techo y cortante basal para un registro de aceleraciones determinado, escalado a un cierto pga , y con unas propiedades materiales particulares.

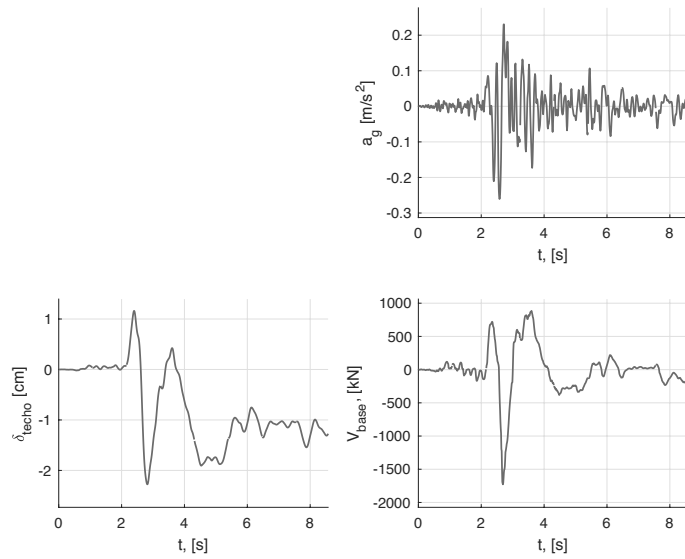


Fig. 4-16 Ejemplo de la historia temporal obtenido a partir de los análisis dinámicos para una de las unidades de la muestra para el edificio ED-01 (fuente: preparado por el autor)

A partir de esta información se obtienen los valores máximos de aceleración, desplazamiento y cortante basal, para cada unidad de la muestra, con el fin de, posteriormente, emplearlos en la determinación de la respuesta estructural.

La Fig. 4-17 y Fig. 4-18 muestran los distintos valores, 370 en total, de desplazamiento en el techo vs. pga para la dirección +X e +Y, respectivamente, del edificio ED-01. También se muestran las curvas con los valores medios y ± 1 desviación estándar.

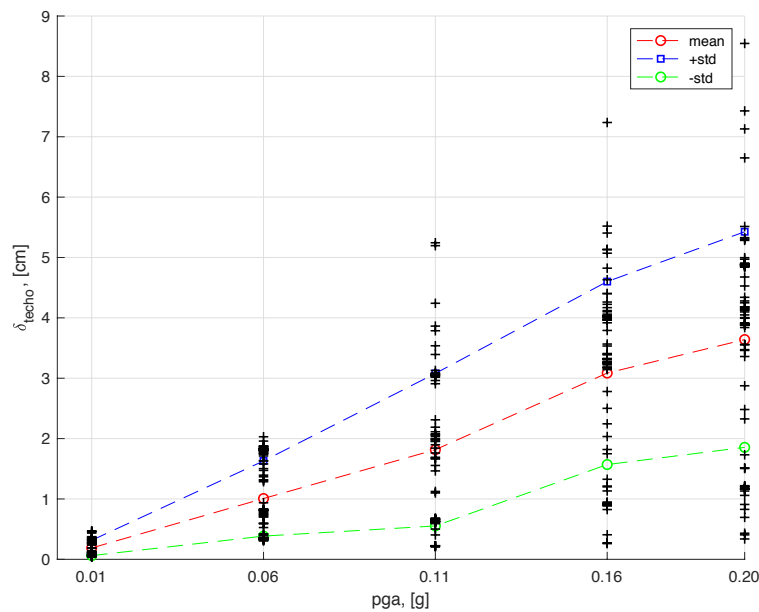


Fig. 4-17 Desplazamiento en el techo vs pga de los distintos análisis dinámicos realizados en el edificio ED-01 en la dirección +X (fuente: preparado por el autor)

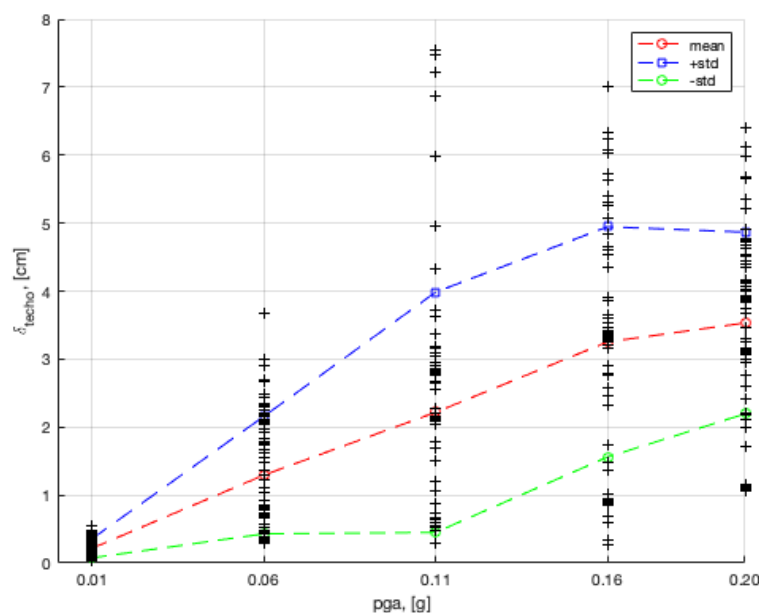


Fig. 4-18 Desplazamiento en el techo vs pga de los distintos análisis dinámicos realizados en el edificio ED-01 en la dirección +Y (fuente: preparado por el autor)

A partir de esta información se pueden calcular las distribuciones y estadísticas básicas, ya sea para cada pga considerado o, para cada uno de los registros sísmicos utilizados, según interese.

La Tabla 4-44 muestra las estadísticas básicas para los distintos desplazamientos del techo que están asociados, en particular, a cada uno de los valores elegidos de pga .

Tabla 4-44 Estadísticas básicas de los desplazamientos en el techo, obtenidos para los conjuntos de puntos asociados a cada valor de pga del edificio ED-01 para cada dirección de análisis [cm] (fuente: preparado por el autor)

	Dir.	min	max	mean	median	std
$P_{0.01g}$	+X	0,04	0,55	0,22	0,19	0,14
	+Y	0,03	0,45	0,16	0,10	0,11
$P_{0.06g}$	+X	0,30	3,68	1,29	1,11	0,86
	+Y	0,31	2,03	0,89	0,71	0,55
$P_{0.11g}$	+X	0,30	7,55	2,22	2,13	1,77
	+Y	3,24	1,74	1,97	0,88	3,24
$P_{0.16g}$	+X	0,27	7,02	3,25	3,36	1,69
	+Y	3,99	2,23	2,47	1,17	3,99
$P_{0.20g}$	+X	6,41	3,53	3,87	1,34	6,41
	+Y	4,53	2,67	3,06	1,39	4,53

La información obtenida a partir de los análisis dinámicos nos permite generar una curva de daño, de forma análoga a las curvas de fragilidad que se generaron para los análisis estáticos no-lineales. Dicha curva requiere que, primeramente, se elija un parámetro de intensidad, IM , que, para nuestro caso, podría ser tanto el desplazamiento en el techo obtenido de los análisis, o bien, la aceleración pico del terreno, pga .

La Fig. 4-19 muestra las curvas de probabilidad de daño generadas a partir de considerar $IM = pga$ y $IM = d_{techo}$, las cuales nos permiten, de manera muy sencilla, identificar cualquier valor de pga o desplazamiento de interés y, con ello, determinar sus probabilidades de ocurrencia.

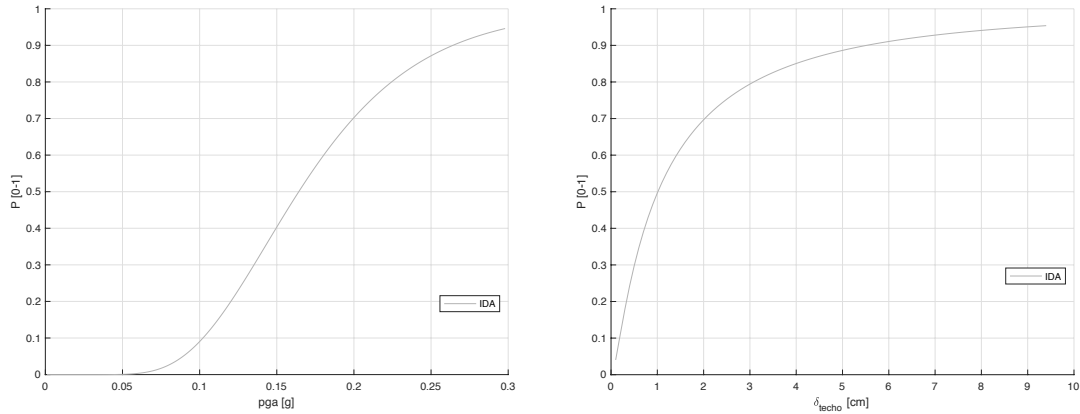


Fig. 4-19 Curva de daño esperado para el edificio ED-01 en la dirección +X y un $IM = pga$ (izq) ó $IM = S_d$ (der.) (fuente: preparado por el autor)

A fines de permitir la comparativa con los resultados obtenidos en los análisis estáticos no-lineales, se eligen los valores de $0.04g$, $0.141g$ y $0.194g$, tal como se definió en apartados anteriores.

El porcentaje de ocurrencia de daño para los distintos valores de pga del edificio ED-01, en sus dos direcciones principales de estudio, se muestran en la Tabla 4-45.

Tabla 4-45 Porcentaje de ocurrencia de daño asociado a valores de pga de $0.04g$, $0.141g$ y $0.194g$ para el edificio ED-01 (fuente: preparado por el autor)

	+X	+Y
$P_{0.04g}$	0,01	0,01
$P_{0.141g}$	34,02	34,07
$P_{0.194g}$	67,33	67,11

Se puede observar que, al comparar con el rango de valores de los resultados obtenidos para los análisis estáticos no-lineales, los porcentajes obtenidos para los análisis dinámicos se encuentran en la parte inferior de dichos rangos. Lo anterior es algo conocido y esperable, ya que los métodos simplificados tienden a sobre evaluar la respuesta estructural, presentando, por tanto, valores por encima de los que realmente puede experimentar un edificio, quedando así, del lado de la seguridad. Adicionalmente, tal como se mencionó anteriormente, la curva de daño medio (*i.e.* índice de daño) empleada en los análisis estáticos no-lineales, solamente es capaz de evaluar a la estructura de forma global, siendo, también, conocido que sus valores suelen estar por encima de los valores reales.

Los resultados del resto de edificios aislados se presentan a continuación.

Tabla 4-46 Estadísticas básicas de los desplazamientos en el techo, obtenidos para los conjuntos de puntos asociados a cada valor de pga del edificio ED-02 en ambas direcciones principales [cm] (fuente: preparado por el autor)

	Dir.	min	max	mean	median	std
$P_{0.01g}$	+X	0,05	0,57	0,22	0,13	0,16
	+Y	0,04	0,46	0,20	0,13	0,14
$P_{0.06g}$	+X	0,32	2,26	1,26	1,21	0,60
	+Y	0,31	4,98	1,81	1,73	1,27
$P_{0.11g}$	+X	0,35	7,15	2,91	2,96	1,84
	+Y	0,62	8,91	2,92	2,49	1,87
$P_{0.16g}$	+X	0,39	10,44	4,10	3,50	2,48
	+Y	0,93	8,76	3,24	3,36	1,54
$P_{0.20g}$	+X	1,02	11,96	4,70	4,46	2,70
	+Y	1,12	9,51	4,08	3,91	2,24

Tabla 4-47 Estadísticas básicas de los desplazamientos en el techo, obtenidos para los conjuntos de puntos asociados a cada valor de *pga* del edificio ED-03 en ambas direcciones principales [cm] (fuente: preparado por el autor)

	Dir.	min	max	mean	median	std
P _{0.01g}	+X	0,05	0,58	0,20	0,14	0,15
	+Y	0,03	0,35	0,13	0,08	0,09
P _{0.06g}	+X	0,30	2,52	1,21	1,02	0,63
	+Y	0,25	2,60	0,98	0,75	0,63
P _{0.11g}	+X	0,21	4,64	2,53	2,97	1,46
	+Y	0,13	4,23	1,57	1,68	0,89
P _{0.16g}	+X	0,51	6,68	3,62	3,81	1,99
	+Y	0,37	5,59	2,50	2,75	1,20
P _{0.20g}	+X	1,13	8,63	4,31	4,26	1,87
	+Y	0,97	4,63	3,08	3,57	1,16

Tabla 4-48 Estadísticas básicas de los desplazamientos en el techo, obtenidos para los conjuntos de puntos asociados a cada valor de *pga* del edificio ED-04 en ambas direcciones principales [%] (fuente: preparado por el autor)

	Dir.	min	max	mean	median	std
P _{0.01g}	+X	0,04	0,49	0,17	0,10	0,13
	+Y	0,03	0,45	0,16	0,10	0,11
P _{0.06g}	+X	0,33	2,54	1,29	1,57	0,75
	+Y	0,31	2,03	0,89	0,71	0,55
P _{0.11g}	+X	0,38	5,87	2,93	3,00	1,58
	+Y	0,23	3,24	1,74	1,97	0,88
P _{0.16g}	+X	0,71	8,40	4,07	3,65	2,22
	+Y	0,24	3,99	2,23	2,47	1,17
P _{0.20g}	+X	1,13	8,52	4,86	5,29	2,11
	+Y	0,32	4,53	2,67	3,06	1,39

Tabla 4-49 Porcentaje de daño asociado a valores de *pga* de 0.04 g, 0.141 g y 0.194 g para todos los edificios en dirección +X [%] (fuente: preparado por el autor)

	ED-01	ED-02	ED-03	ED-04
P _{0.04g}	0,01	0,01	0,01	0,01
P _{0.141g}	34,02	35,63	33,90	37,59
P _{0.194g}	67,33	68,80	67,11	70,70

Las comparativas y discusiones, al respecto de los resultados presentados en los apartados anteriores, pueden encontrarse en el capítulo 6. Así mismo, el Anejo correspondiente contiene los resultados en su completitud para todos los edificios, aislados y agregados.

An aerial photograph of a dense urban area, likely in Barcelona, Spain. The central focus is the Sagrada Família, a large, ornate Gothic cathedral with multiple spires and intricate facade. The surrounding area is filled with multi-story residential buildings with red-tiled roofs, arranged in a grid-like pattern. There are some green spaces and streets visible between the buildings.

CAPÍTULO 5

Aplicación a
edificios agregados

5 APLICACIÓN A EDIFICIOS AGREGADOS

Al igual que en el capítulo anterior, los resultados obtenidos a partir de las distintas metodologías y análisis considerados en este trabajo se presentan a continuación para los edificios agregados, los cuales se encuentran conformados por la combinatoria de dos o más de los edificios aislados que también son objeto de este estudio.

Los distintos conjuntos de propiedades mecánicas materiales, registros sísmicos y/o aceleraciones pico del terreno son empleados para la ejecución de los distintos análisis (*i.e.* modal, estático no lineal y dinámico) a través del programa 3muri (Galasco *et al.*, 2002; S.T.A. DATA, 2012; Lagomarsino *et al.*, 2013).

La creación y tratamiento de los datos y archivos de entrada, así como el procesamiento de los resultados obtenidos, fueron llevados a cabo mediante el uso de rutinas desarrolladas por el autor con dicho propósito, así como técnicas de cómputo paralelo empleadas a través del programa MATLAB (The MathWorks, 2018a).

Tal como se hizo en el capítulo anterior, se presentan, de manera sintetizada, los resultados más relevantes para los distintos edificios agregados, explicándose de forma más detallada, los resultados correspondientes a uno de ellos, el agregado AG-01. Los resultados se condensan en cuatro apartados principales: 1) Análisis modal; 2) Análisis de capacidad; 3) Fragilidad y daño esperado; y 4) Análisis dinámico incremental.

La completitud de resultados, figuras, tablas y otros datos se presentan en el Anejo correspondiente. De igual forma, la discusión de los principales resultados, comparativas, observaciones, conclusiones y otras recomendaciones se presentan en el siguiente capítulo.

5.1 Análisis modal

Para cada edificio agregado y, mediante el uso del programa 3muri, se llevaron a cabo los diversos análisis modales para los 278 conjuntos (*i.e.* sets) de propiedades mecánicas materiales. Dichos resultados han sido previamente procesados, con la finalidad de obtener aquellos valores que caracterizan las diversas propiedades utilizadas en este apartado.

Los resultados modales, correspondientes al edificio agregado AG-01, se muestran en la Tabla 5-1. La tabla contiene los 21 modos solicitados (*i.e.* tres modos por planta), de acuerdo con lo explicado en el capítulo 3 (*ver* 3.2.1).

Tabla 5-1 Resultados del análisis modal para el edificio agregado AG-01 (fuente: preparado por el autor)

# Modo	T [s]	f [rad/s]	ω [Hz]	Mx [kg]	My [kg]	Mz [kg]	ΣM [kg]
1	0,626	1,60	10,04	0,46	3772932,95	3,10	3772936,51
2	0,572	1,75	10,98	3961420,31	15,79	10,92	3961447,02
3	0,532	1,88	11,80	465615,54	143,21	2,61	465761,35
4	0,210	4,76	29,90	28,39	700220,28	100,75	700349,42
5	0,198	5,06	31,76	364913,41	123,70	60,05	365097,16
6	0,183	5,47	34,40	66008,26	34,85	131,92	66175,04
7	0,139	7,19	45,17	4,12	781,39	3849533,67	3850319,18
8	0,136	7,35	46,19	149,23	5,88	7040,08	7195,19
9	0,130	7,70	48,39	125,49	23411,06	304275,99	327812,54
10	0,125	7,99	50,22	19760,40	0,84	6434,11	26195,35
11	0,122	8,20	51,51	825,57	22362,54	922,40	24110,51
12	0,120	8,31	52,23	49,29	11330,43	13313,74	24693,46
13	0,118	8,46	53,15	22,56	3098,62	47671,55	50792,73
14	0,113	8,83	55,47	3336,98	54,77	143,24	3534,99

15	0,113	8,88	55,82	27,06	61,91	23718,76	23807,73
16	0,111	9,03	56,73	894,37	11,15	122,47	1027,99
17	0,109	9,14	57,40	216,98	17,24	62,76	296,97
18	0,108	9,23	57,97	341,27	14,51	77,15	432,93
19	0,108	9,28	58,30	2101,55	1,48	16,08	2119,12
20	0,105	9,49	59,65	11710,13	8,76	373,41	12092,30
21	0,104	9,62	60,46	703,80	4,14	424,59	1132,53

Se puede observar que los modos #2 y #1 corresponden, respectivamente, a los primeros modos fundamentales de las direcciones principales de la estructura X e Y , siendo aquellos modos que mayor masa activan en sus direcciones correspondientes.

Adicionalmente, en la Tabla 5-2 se pueden observar los factores de importancia, IF , la masa relativa activada, RAM , y la masa absoluta activada, AAM , para cada uno de los 21 modos solicitados, de las distintas direcciones de interés.

Tabla 5-2 Resultados del análisis modal para el edificio agregado AG-01 (continuación) (fuente: preparado por el autor)

# Modo	T [s]	IF _x [%]	IF _y [%]	IF _z [%]	RAM _x [%]	RAM _y [%]	RAM _z [%]	AAM _x [%]	AAM _y [%]	AAM _z [%]
1	0,626	0,000	100,000	0,000	0,000	83,203	0,000	0,000	71,620	0,000
2	0,572	99,999	0,000	0,000	80,874	0,000	0,000	75,198	0,000	0,000
3	0,532	99,969	0,031	0,001	9,506	0,003	0,000	8,839	0,003	0,000
4	0,210	0,004	99,982	0,014	0,001	15,442	0,002	0,001	13,292	0,002
5	0,198	99,950	0,034	0,016	7,450	0,003	0,001	6,927	0,002	0,001
6	0,183	99,748	0,053	0,199	1,348	0,001	0,003	1,253	0,001	0,003
7	0,139	0,000	0,020	99,980	0,000	0,017	90,483	0,000	0,015	73,075
8	0,136	2,074	0,082	97,844	0,003	0,000	0,165	0,003	0,000	0,134
9	0,130	0,038	7,142	92,820	0,003	0,516	7,152	0,002	0,444	5,776
10	0,125	75,435	0,003	24,562	0,403	0,000	0,151	0,375	0,000	0,122
11	0,122	3,424	92,750	3,826	0,017	0,493	0,022	0,016	0,425	0,018
12	0,120	0,200	45,884	53,916	0,001	0,250	0,313	0,001	0,215	0,253
13	0,118	0,044	6,101	93,855	0,000	0,068	1,121	0,000	0,059	0,905
14	0,113	94,398	1,549	4,052	0,068	0,001	0,003	0,063	0,001	0,003
15	0,113	0,114	0,260	99,626	0,001	0,001	0,558	0,001	0,001	0,450
16	0,111	87,002	1,084	11,914	0,018	0,000	0,003	0,017	0,000	0,002
17	0,109	73,064	5,804	21,132	0,004	0,000	0,001	0,004	0,000	0,001
18	0,108	78,828	3,352	17,820	0,007	0,000	0,002	0,006	0,000	0,001
19	0,108	99,171	0,070	0,759	0,043	0,000	0,000	0,040	0,000	0,000
20	0,105	96,840	0,072	3,088	0,239	0,000	0,009	0,222	0,000	0,007
21	0,104	62,144	0,366	37,490	0,014	0,000	0,010	0,013	0,000	0,008

Se observa, nuevamente, que los modos #2 y #1 activan la mayor cantidad de masa de la estructura (IF , RAM , AAM), en las direcciones X e Y , respectivamente, con lo cual podemos confirmar que el comportamiento de la estructura se encuentra principalmente influenciado por el primer modo fundamental en cada una de sus direcciones principales.

Podemos confirmar que, para cada dirección principal del agregado AG-01, los modos fundamentales (*i.e.* aquellos que movilizan al menos un 1% de la masa de la estructura) activan más del 80% de la misma.

Por otra parte, los períodos obtenidos para los primeros modos fundamentales de cada dirección principal de la estructura se encuentran dentro del rango de períodos esperables para una estructura de siete plantas y que orientativamente puede calcularse como 1/10 del número de plantas de esta.

Por último, las correlaciones existentes entre los modos fundamentales del edificio agregado AG-01 y las variables de interés de este estudio se presentan en la Tabla 5-3.

Tabla 5-3 Coeficientes de correlación entre los períodos fundamentales de vibración y las variables aleatorias de interés para ambas direcciones del edificio agregado AG-01 (fuente: preparado por el autor)

	f_m	E	G	τ_0
T_{1x}	-0,876	-0,947	-0,960	-0,820
T_{1y}	-0,867	-0,938	-0,965	-0,812

Como primera observación, podemos apreciar que todas las correlaciones existentes entre los períodos de las direcciones de interés y las variables aleatorias de este estudio son negativas. Así mismo, en general, las correlaciones no son despreciables, teniendo los valores más elevados para los casos de E y G .

Los resultados correspondientes a los edificios agregados se resumen en la Tabla 5-4 y la Tabla 5-5. La completitud de resultados se puede encontrar en el Anejo correspondiente.

Tabla 5-4 Resultados del análisis modal para los distintos edificios agregados (fuente: preparado por el autor)

Edificio	# Modo	T [s]	f [rad/s]	ω [Hz]	M_x [kg]	M_y [kg]	M_z [kg]	ΣM [kg]
AG-01	1	0,626	1,60	10,04	0,46	3772932,95	3,10	3772936,51
	2	0,572	1,75	10,98	3961420,31	15,79	10,92	3961447,02
AG-02	1	0,624	1,60	10,07	3669824,49	7613,94	1,36	3677439,79
	2	0,606	1,65	10,36	18015,22	3004166,09	50,69	3022232,01
AG-03	1	0,657	1,52	9,56	1981376,50	1635257,64	0,05	3616634,19
	2	0,620	1,61	10,14	1714671,04	1968076,28	71,94	3682819,26

Tabla 5-5 Resultados del análisis modal para los distintos edificios agregados (continuación) (fuente: preparado por el autor)

Edificio	# Modo	T [s]	IFx [%]	IFy [%]	IFz [%]	RAMx [%]	RAMy [%]	RAMz [%]	AAMx [%]	AAMy [%]	AAMz [%]
AG-01	1	0,626	0,000	100,000	0,000	0,000	83,203	0,000	0,000	71,620	0,000
	2	0,572	99,999	0,000	0,000	80,874	0,000	0,000	75,198	0,000	0,000
AG-02	1	0,624	99,793	0,207	0,000	88,778	0,195	0,000	83,067	0,172	0,000
	2	0,606	0,596	99,402	0,002	0,436	76,883	0,001	0,408	68,000	0,001
AG-03	1	0,657	54,785	45,215	0,000	43,321	35,714	0,000	38,897	32,102	0,000
	2	0,620	46,559	53,439	0,002	37,490	42,983	0,002	33,661	38,636	0,001

Es posible observar que, en el caso de los edificios agregados AG-02 y AG-03, los modos #1 y #2 corresponden a los primeros modos fundamentales de las direcciones principales de la estructura X e Y , respectivamente. También se puede observar que, para todos los edificios, excepto el edificio AG-03, los modos #1 y #2, activan la mayor cantidad de masa de la estructura (IF , RAM , AAM), confirmándose así que el comportamiento de la estructura se encuentra mayormente influenciado por el primer modo fundamental en cada una de sus direcciones principales.

En el caso del edificio AG-03, los modos #1 y #2, sólo superan ligeramente al porcentaje de la otra dirección principal, respectivamente. Lo anterior se debe a la configuración en planta del edificio de esquina que compone a este agregado. Dicho edificio, el ED-04, es un edificio de esquina (*i.e.* chaflán), cuyos ejes principales de análisis no coinciden con los ejes principales de elementos estructurales (*i.e.* muros) como en el caso del resto de estructuras que componen a los agregados. No obstante, la estructura se ha modelado respetando su posición y orientación dentro del agregado de la manzana, por lo que sus resultados habrán de ser interpretados teniendo en cuenta dicho giro.

También es posible confirmar que, para cada dirección principal de las distintas estructuras, los modos fundamentales (*i.e.* aquellos que movilizan al menos un 1% de la masa de la estructura) activan más del 80% de la misma. A diferencia de los edificios agregados AG-01 y AG-02, en los que el primer modo fundamental activaba con diferencia la mayor cantidad de masa, en el agregado AG-03, esta masa se activa

de forma casi equitativa entre los dos primeros períodos fundamentales para cada una de las direcciones principales de la estructura.

Finalmente, la Tabla 5-6 presentan los distintos coeficientes de correlación existentes entre los datos de los análisis modales y las variables de interés del este trabajo para todos los edificios agregados.

Tabla 5-6 Coeficientes de correlación entre los periodos fundamentales para cada dirección y las variables aleatorias de interés de los diferentes edificios agregados (fuente: preparado por el autor)

Edificio		f_m	E	G	τ_0
AG-01	T_{1x}	-0,88	-0,95	-0,96	-0,82
	T_{1y}	-0,87	-0,94	-0,97	-0,81
AG-02	T_{1x}	-0,88	-0,95	-0,95	-0,83
	T_{1y}	-0,87	-0,94	-0,96	-0,82
AG-03	T_{1x}	-0,88	-0,95	-0,95	-0,83
	T_{1y}	-0,88	-0,95	-0,96	-0,82

Tal como ocurrió para el edificio agregado AG-01, el resto de los edificios agregados presentan una correlación elevada y negativa con respecto a las variables de interés de este estudio, siendo E y G, una vez más, las que presentan los valores más elevados.

5.2 Análisis de capacidad

En este apartado se presentan los distintos resultados que conlleva el análisis estático no-lineal, explicado en el capítulo 3 (*ver* 3.2.2), para los edificios agregados. Tal como se hizo para el análisis modal, los resultados se presentan de forma detallada para el edificio AG-01 y, posteriormente, se muestran los resultados principales para el resto de los edificios agregados de manera resumida. La completitud de resultados y figuras puede encontrarse en el Anejo correspondiente.

5.2.1 Curva de capacidad

Los distintos análisis estáticos no-lineales, también conocidos como análisis pushover, se llevaron a cabo mediante el programa de 3muri para cada una de las direcciones principales de análisis (*i.e.* +X e +Y) de los distintos edificios agregados de este estudio, para la totalidad de 278 conjuntos (*i.e.* sets) de propiedades mecánicas de cada uno.

Tal como se detalla en el capítulo 3, la ejecución de los diversos análisis estáticos no-lineales requiere la previa elección del tipo de análisis pushover a llevarse a cabo y, por ende, del patrón de cargas a aplicar en cada una de las direcciones de análisis principales.

Para las estructuras analizadas en este trabajo, el tipo de análisis pushover se corresponde con uno de primer modo, en el cual el patrón de cargas es triangular y se escala de forma monótonica-creciente para cada iteración del análisis, y sin perder su forma inicial, como sucedería en el caso de elegir un pushover de tipo adaptativo.

El resultado obtenido a partir de la ejecución del análisis estático no-lineal es la denominada curva de capacidad o pushover, la cual presenta la relación existente entre el desplazamiento de un nodo localizado en el centro del nivel superior de la estructura y el cortante basal. Estas curvas suelen estar representadas por unos cuantos puntos (*i.e.* pasos del análisis) y presentar valores incluso después de que la estructura haya sobrepasado su capacidad máxima.

La Fig. 5-1 presenta las curvas de capacidad obtenidas mediante el programa 3muri para ambas direcciones principales de análisis del edificio agregado AG-01.

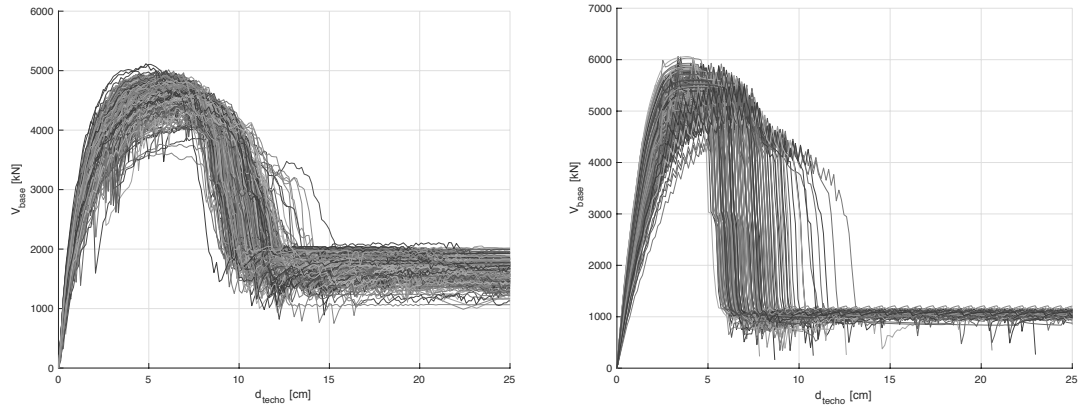


Fig. 5-1 Curvas de capacidad para las direcciones de análisis +X (izq.) y +Y (der.) del edificio agregado AG-01 (fuente: preparado por el autor)

5.2.2 Punto de fluencia y punto último

A fin de poder emplear alguno de los métodos simplificados (*i.e.* procedimientos estáticos no-lineales, *NSP*), es necesario obtener previamente los puntos de fluencia y último de las curvas de capacidad. Lo anterior se puede llevar a cabo mediante diversos procedimientos, tal como se explica en el capítulo 3 (*ver* 3.2.2.3). La selección del punto último permite acortar las curvas de capacidad originales, tal como se puede observar en la Fig. 5-2.

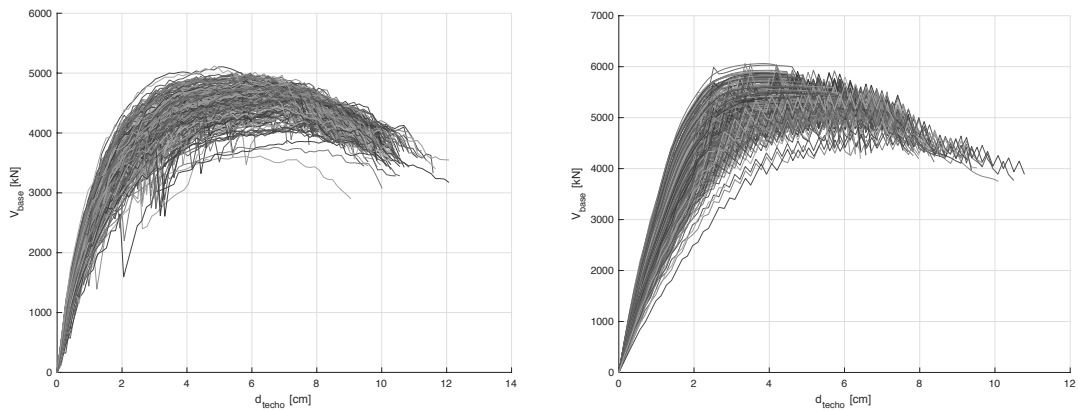


Fig. 5-2 Selección del punto último en las curvas de capacidad para las direcciones de análisis +X (izq.) y +Y (der.) del edificio agregado AG-01 (fuente: preparado por el autor)

Las estadísticas básicas de los puntos de fluencia y último, que resultan después de aplicar el criterio de corte seleccionado en este trabajo, se pueden observar en la Tabla 5-7. Adicionalmente, se añade también la información correspondiente al cortante basal máximo de las distintas curvas procesadas.

Tabla 5-7 Estadísticas básicas de los puntos de fluencia, último y cortante basal máximo de las curvas de capacidad en ambas direcciones del edificio agregado AG-01 (fuente: preparado por el autor)

	Dir.	min	max	mean	median	std
$d_{techo-yield}$ [cm]	+X	0,12	4,27	0,46	0,45	0,30
	+Y	0,00	1,15	0,45	0,44	0,14
$V_{base-yield}$ [kN]	+X	392,79	4200,91	1244,33	1266,04	381,89
	+Y	0,00	2657,31	1228,33	1156,80	380,12
$d_{techo-ult}$ [cm]	+X	5,96	12,07	9,32	9,44	0,97
	+Y	2,24	10,78	6,36	6,29	1,32
$V_{base-ult}$ [kN]	+X	2898,27	4772,28	3866,73	3844,52	275,76
	+Y	3752,39	5660,16	5075,53	5243,42	423,70
$V_{base-max}$ [kN]	+X	3614,34	5116,49	4651,76	4696,63	223,80
	+Y	3890,23	6060,61	5551,89	5568,81	258,50

A partir de los resultados anteriores, podemos observar que la curva correspondiente a la dirección +X presenta un desplazamiento último más elevado que aquél obtenido para la dirección +Y. No obstante, en lo que se refiere al cortante basal, podemos observar que la dirección +Y presenta los valores más elevados, permitiéndonos concluir, por tanto, que un comportamiento frágil sería esperable en la dirección +Y, mientras que, para la dirección +X, se presenta un comportamiento más de tipo dúctil.

Las distintas correlaciones existentes entre los resultados anteriores, con respecto a las variables de interés, se presentan en la Tabla 5-8 y Tabla 5-9.

Tabla 5-8 Coeficientes de correlación entre los puntos de fluencia, último y cortante basal máximo y las variables aleatorias de interés en la dirección +X del edificio agregado AG-01 (fuente: preparado por el autor)

	f_m	E	G	τ_0
$d_{techo-yield}$	-0,41	-0,45	-0,49	-0,34
$V_{base-yield}$	-0,30	-0,36	-0,44	-0,18
$d_{techo-ult}$	-0,71	-0,76	-0,68	-0,74
$V_{base-ult}$	0,67	0,62	0,56	0,65
$V_{base-max}$	0,93	0,86	0,78	0,92

Tabla 5-9 Coeficientes de correlación entre los puntos de fluencia, último y cortante basal máximo y las variables aleatorias de interés en la dirección +Y del edificio agregado AG-01 (fuente: preparado por el autor)

	f_m	E	G	τ_0
$d_{techo-yield}$	-0,02	0,00	0,01	-0,04
$V_{base-yield}$	0,50	0,54	0,55	0,46
$d_{techo-ult}$	-0,79	-0,80	-0,71	-0,75
$V_{base-ult}$	0,79	0,74	0,65	0,82
$V_{base-max}$	0,69	0,61	0,45	0,77

Para ambas direcciones de interés, se puede identificar fácilmente que, para el punto último, las correlaciones son mayores con respecto de aquellas obtenidas para el punto de fluencia. Algo similar ocurre con respecto al cortante basal máximo, el cual también presenta correlaciones más altas.

Las estadísticas básicas de los resultados más relevantes, para cada uno de los edificios agregados, se muestran contenidos entre la Tabla 5-10 y la

Tabla 5-12, cada una de las cuales se corresponde con uno de los parámetros de interés.

Tabla 5-10 Estadísticas básicas del desplazamiento en el techo de los puntos de últimos, $d_{techo-ult}$, de las curvas de capacidad de los diferentes edificios agregados [cm] (fuente: preparado por el autor)

	Dir.	min	max	mean	median	std
AG-01	+X	5,96	12,07	9,32	9,44	0,97
	+Y	2,24	10,78	6,36	6,29	1,32
AG-02	+X	4,34	10,68	8,72	8,87	0,96
	+Y	3,78	10,25	6,01	5,88	0,93
AG-03	+X	5,37	15,18	10,52	10,71	1,42
	+Y	3,56	12,56	9,47	9,47	1,13

Tabla 5-11 Estadísticas básicas del cortante basal de los puntos últimos, $V_{base-ult}$, de las curvas de capacidad de los diferentes edificios agregados [kN] (fuente: preparado por el autor)

	Dir.	min	max	mean	median	std
AG-01	+X	2898,27	4772,28	3866,73	3844,52	275,76
	+Y	3752,39	5660,16	5075,53	5243,42	423,70
AG-02	+X	2198,41	3826,91	2969,22	2922,61	264,40
	+Y	3601,83	5365,64	4710,81	4872,60	365,09

AG-03	+X	3582,80	6334,08	4808,98	4804,21	494,66
	+Y	3741,11	6069,90	5077,43	5145,82	541,26

Tabla 5-12 Estadísticas básicas del cortante basal máximo, $V_{base-max}$, de las curvas de capacidad de los diferentes edificios agregados [kN] (fuente: preparado por el autor)

	Dir.	min	max	mean	median	std
AG-01	+X	3614,34	5116,49	4651,76	4696,63	223,80
	+Y	3890,23	6060,61	5551,89	5568,81	258,50
AG-02	+X	2718,52	3854,57	3522,75	3545,51	185,08
	+Y	4343,88	5693,51	5168,06	5179,04	209,12
AG-03	+X	4427,26	6467,65	5736,33	5766,21	365,85
	+Y	4605,18	6287,19	5643,61	5668,46	305,34

De forma análoga, los distintos coeficientes de correlación de los parámetros correspondientes a los puntos de fluencia y último, así como el cortante basal máximo, se presentan a continuación.

Tabla 5-13 Coeficientes de correlación entre los puntos de fluencia, último y cortante basal máximo y las variables aleatorias de interés para la dirección +X de los diferentes edificios agregados (fuente: preparado por el autor)

Edificio		f_m	E	G	τ_0
AG-01	$d_{techo-yield}$	-0,41	-0,45	-0,49	-0,34
	$d_{techo-ult}$	-0,71	-0,76	-0,68	-0,74
	$V_{base-max}$	0,93	0,86	0,78	0,92
AG-02	$d_{techo-yield}$	-0,60	-0,69	-0,70	-0,54
	$d_{techo-ult}$	-0,58	-0,62	-0,54	-0,61
	$V_{base-max}$	0,95	0,89	0,80	0,93
AG-03	$d_{techo-yield}$	0,11	0,14	0,20	0,10
	$d_{techo-ult}$	-0,39	-0,42	-0,33	-0,39
	$V_{base-max}$	0,96	0,92	0,84	0,96

Tabla 5-14 Coeficientes de correlación entre los puntos de fluencia, último y cortante basal máximo y las variables aleatorias de interés para la dirección +Y de los diferentes edificios agregados (fuente: preparado por el autor)

Edificio		f_m	E	G	τ_0
AG-01	$d_{techo-ield}$	-0,02	0,00	0,01	-0,04
	$d_{techo-ult}$	-0,79	-0,80	-0,71	-0,75
	$V_{base-max}$	0,69	0,61	0,45	0,77
AG-02	$d_{techo-ield}$	0,25	0,24	0,26	0,28
	$d_{techo-ult}$	-0,91	-0,93	-0,83	-0,90
	$V_{base-max}$	0,85	0,79	0,67	0,92
AG-03	$d_{techo-ield}$	-0,51	-0,59	-0,65	-0,43
	$d_{techo-ult}$	-0,42	-0,45	-0,34	-0,43
	$V_{base-max}$	0,96	0,92	0,83	0,95

Para todos los edificios agregados se cumple que, para el caso del cortante basal máximo, existen coeficientes de correlación positiva elevados en todas las propiedades mecánicas materiales, así como en ambas direcciones.

5.2.3 Obtención del sistema equivalente de 1GDL

Siguiendo con el proceso establecido en el procedimiento estático no-lineal, debe realizarse la conversión de la curva de capacidad (*i.e.* sistema de múltiples grados de libertad) a un sistema de fuerzas equivalente de un grado de libertad, *1GDL*. Este proceso conlleva la utilización de una serie de parámetros de reducción, calculados a partir de características intrínsecas de la estructura y otros datos obtenidos como resultado de los análisis modales realizados previamente. El resultado de este proceso es la obtención de las curvas de capacidad escaladas con respecto a los valores de desplazamiento y fuerza equivalente obtenidos.

La Fig. 5-3 muestra la curva de capacidad del sistema equivalente de 1GDL del agregado AG-01 en sus dos direcciones principales de análisis.

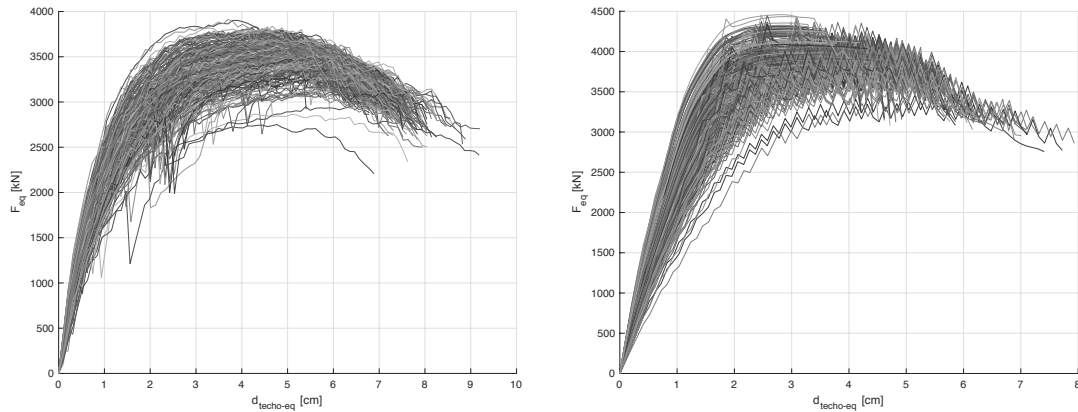


Fig. 5-3 Curvas de capacidad de los sistemas equivalentes de 1GDL para el agregado AG-01 de acuerdo con lo establecido en el procedimiento N2 para las direcciones de análisis +X (izq.) y +Y (der.) (fuente: preparado por el autor)

5.2.4 Curva de capacidad en formato aceleración-desplazamiento (ADRS)

Para poder realizar el cruce de la curva de capacidad de la estructura con el espectro de demanda sísmica, se ha de llevar a cabo una conversión de la primera a un formato espectral compatible con la segunda. Como resultado se obtienen las curvas de capacidad en formato aceleración-desplazamiento o ADRS, cuyos ejes de abscisas y ordenadas, corresponderán al desplazamiento espectral, S_d , y a la aceleración espectral, S_a , respectivamente.

La Fig. 5-4 muestra las curvas en formato espectral para el edificio agregado AG-01 en sus dos direcciones de análisis principales.

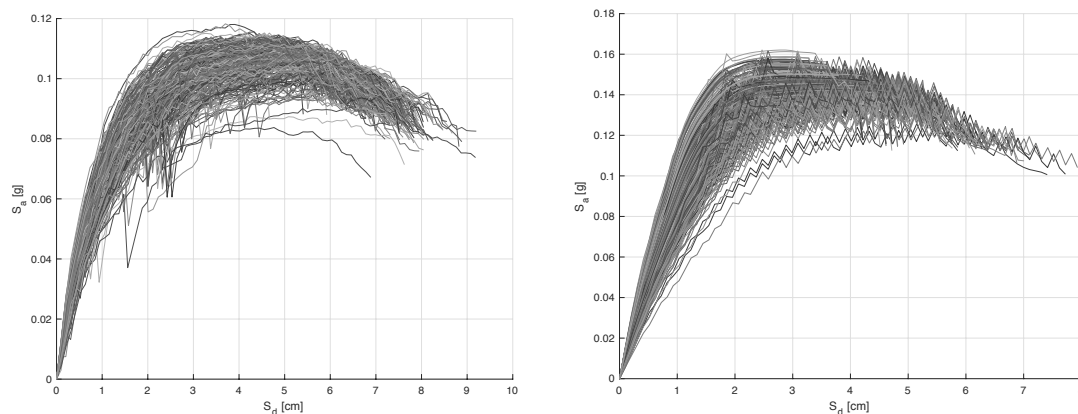


Fig. 5-4 Curvas de capacidad en formato desplazamiento-aceleración (ADRS) del agregado AG-01 de acuerdo con lo establecido en el procedimiento N2 para las direcciones de análisis +X (izq.) y +Y (der.) (fuente: preparado por el autor)

5.2.5 Representación bilineal

Siguiendo con lo establecido en el procedimiento N2, se obtiene la representación bilineal de cada una de las curvas de capacidad en formato ADRS, a fin facilitar su cruce con el espectro de demanda sísmica, y la posterior obtención del punto de desempeño correspondiente.

Los criterios, pasos y resultados obtenidos en esta etapa son específicos de cada procedimiento estático no lineal y, por tanto, se ha de realizar una selección adecuada del procedimiento a emplear, ya que su selección incide en el resto de los resultados esperados para cada estructura.

A manera de facilitar su lectura, y evitar saturar la figura con la totalidad de representaciones bilineales, la Fig. 5-5 muestra la representación bilineal promedio del total de representaciones bilineales obtenidas a partir de las distintas curvas en formato espectral. Es posible observar, a manera de nubes de puntos, los valores correspondientes a los puntos de fluencia y último de las representaciones bilineales obtenidas para la totalidad de curvas.

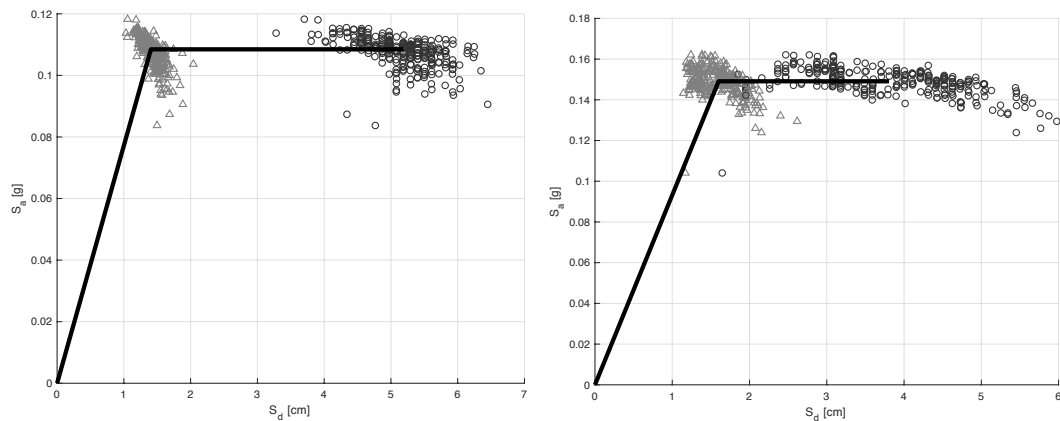


Fig. 5-5 Representación bilineal promedio y nubes de valores de los puntos de fluencia y último del agregado AG-01 de acuerdo con lo establecido en el procedimiento N2 para las direcciones de análisis +X (izq.) y +Y (der.) (fuente: preparado por el autor)

A partir de las figuras anteriores, es posible observar que los valores relacionados con el punto último tienen una mayor dispersión con respecto a aquellos relacionados con el punto de fluencia, que parecieran estar agrupados de una forma más compacta. Lo anterior confirma la elección y dispersión del punto último, incide directamente en los resultados esperables para los distintos sistemas estructurales.

En la Tabla 5-15 se muestran las estadísticas básicas relacionadas con los puntos de fluencia y último de las distintas representaciones bilineales para el edificio agregado AG-01 y en ambas direcciones.

Tabla 5-15 Estadísticas básicas de los puntos de fluencia y último de las representaciones bilineales en ambas direcciones del agregado AG-01, de acuerdo con lo establecido en el procedimiento N2 (fuente: preparado por el autor)

	Dir.	min	max	mean	median	std
$S_{d-yield}$ [cm]	+X	1,03	2,04	1,42	1,41	0,15
	+Y	1,14	2,62	1,59	1,60	0,26
$S_{a-yield}$ [g]	+X	0,08	0,12	0,11	0,11	0,01
	+Y	0,10	0,16	0,15	0,15	0,01
S_{d-ult} [cm]	+X	3,28	6,45	5,15	5,19	0,53
	+Y	1,65	5,98	3,78	3,81	0,95
S_{a-ult} [g]	+X	0,08	0,12	0,11	0,11	0,01
	+Y	0,10	0,16	0,15	0,15	0,01

La repetición de valores, para las aceleraciones espectrales de ambos puntos, se debe a las particularidades propias del método N2 al momento de definir los puntos que conforman la representación bilineal, asumiendo la representación bilineal como una curva elasto-plástica perfecta, donde la pendiente del tramo inelástico es nula, es decir, la meseta del tramo inelástico permanece horizontal.

Los coeficientes de correlación de los parámetros más relevantes de las distintas representaciones bilineales del edificio agregado, con respecto a las variables aleatorias de interés, se presentan en la Tabla 5-16 y la Tabla 5-17 para el edificio agregado AG-01.

Tabla 5-16 Coeficientes de correlación de las representaciones bilineales, entre los puntos de fluencia y último, y las variables aleatorias de interés, para la dirección +X del agregado AG-01 (fuente: preparado por el autor)

	f_m	E	G	τ_0
$S_{d-yield}$	-0,74	-0,79	-0,75	-0,79
$S_{a-yield}$	0,92	0,85	0,75	0,92
S_{d-ult}	-0,60	-0,65	-0,57	-0,64
S_{a-ult}	0,92	0,85	0,75	0,92

Tabla 5-17 Coeficientes de correlación de las representaciones bilineales, entre los puntos de fluencia y último, y las variables aleatorias de interés, para la dirección +Y del agregado AG-01 (fuente: preparado por el autor)

	f_m	E	G	τ_0
$S_{d-yield}$	-0,83	-0,91	-0,92	-0,77
$S_{a-yield}$	0,69	0,61	0,47	0,77
S_{d-ult}	-0,81	-0,83	-0,73	-0,75
S_{a-ult}	0,69	0,61	0,47	0,77

Una vez más, se observa que los valores correspondientes a las aceleraciones espectrales de los puntos de fluencia y último son idénticos, debido a la forma en que el método N2 define dichos valores. Se pueden observar algunos coeficientes de correlación elevados en ambas direcciones, sin embargo, en términos generales no existe una clara correlación entre los parámetros analizados y las variables de interés.

Las estadísticas básicas de los puntos de fluencia y último, para cada uno de los edificios agregados, se encuentran contenidos en la Tabla 5-18 y la Tabla 5-19, respectivamente.

Tabla 5-18 Estadísticas básicas del punto de fluencia, $S_{d-yield}$, de las representaciones bilineales en ambas direcciones de los edificios agregados, de acuerdo con lo establecido en el procedimiento N2 [cm] (fuente: preparado por el autor)

	Dir.	min	max	mean	median	std
AG-01	+X	1,03	2,04	1,42	1,41	0,15
	+Y	1,14	2,62	1,59	1,60	0,26
AG-02	+X	1,04	1,84	1,37	1,37	0,13
	+Y	1,17	2,61	1,65	1,62	0,25
AG-03	+X	1,30	2,60	1,73	1,71	0,22
	+Y	1,35	3,06	1,81	1,78	0,23

Tabla 5-19 Estadísticas básicas del punto último, S_{d-ult} , de las representaciones bilineales en ambas direcciones de los edificios agregados, de acuerdo con lo establecido en el procedimiento N2 [cm] (fuente: preparado por el autor)

	Dir.	min	max	mean	median	std
AG-01	+X	3,28	6,45	5,15	5,19	0,53
	+Y	1,65	5,98	3,78	3,81	0,95
AG-02	+X	2,97	5,82	4,69	4,75	0,46
	+Y	2,22	5,27	3,66	3,74	0,69
AG-03	+X	3,89	6,88	5,59	5,57	0,55
	+Y	2,65	6,96	5,32	5,81	1,20

Es posible observar, a partir de las tablas anteriores, que los valores correspondientes a los desplazamientos del punto de fluencia presentan desviaciones estándar inferiores a aquellos relacionados con los puntos últimos, indicando con ello la gran variabilidad (*i.e.* dispersión) que presenta el punto último.

Los datos recopilados en las tablas anteriores son de gran utilidad, sirviendo como indicadores acerca de los rangos de valores esperables para ambos puntos, de fluencia y último, así como de la desviación estándar asociada. Estos datos pueden ser útiles, tanto para la definición de estados de daño, como en la creación de las curvas de fragilidad, ya que, en ocasiones, al no disponer de información específica de ciertas tipologías, se establecen rangos y desviaciones de forma genérica, que pueden no ser del todo adecuados para la tipología estructural estudiada.

Tabla 5-20 Coeficientes de correlación de las representaciones bilineales, entre los puntos de fluencia y último, y las variables aleatorias de interés, para la dirección +X de los diferentes edificios agregados (fuente: preparado por el autor)

		f_m	E	G	τ_0
AG-01	$S_{d-yield}$	-0,74	-0,79	-0,75	-0,79
	S_{d-ult}	-0,60	-0,65	-0,57	-0,64
AG-02	$S_{d-yield}$	-0,81	-0,85	-0,84	-0,84
	S_{d-ult}	-0,58	-0,60	-0,53	-0,65
AG-03	$S_{d-yield}$	-0,83	-0,93	-0,95	-0,77
	S_{d-ult}	-0,49	-0,54	-0,50	-0,47

Tabla 5-21 Coeficientes de correlación de las representaciones bilineales, entre los puntos de fluencia y último, y las variables aleatorias de interés, para la dirección +Y de los diferentes edificios agregados (fuente: preparado por el autor)

		f_m	E	G	τ_0
AG-01	$S_{d-yield}$	-0,83	-0,91	-0,92	-0,77
	S_{d-ult}	-0,81	-0,83	-0,73	-0,75
AG-02	$S_{d-yield}$	-0,86	-0,94	-0,94	-0,80
	S_{d-ult}	-0,72	-0,75	-0,66	-0,72
AG-03	$S_{d-yield}$	-0,82	-0,90	-0,89	-0,78
	S_{d-ult}	-0,28	-0,20	-0,13	-0,38

En general, el desplazamiento del punto de fluencia presenta una correlación más elevada que el resto de parámetros considerados, siendo E y G , las variables con valores más elevados, al contrario de τ_0 , que presenta los valores más bajos.

5.3 Fragilidad y daño esperado

5.3.1 Curvas de fragilidad

Los puntos de fluencia y último, obtenidos de las representaciones bilineales del punto anterior, permiten definir los estados de daño empleados en este trabajo (*i.e.* ligero, moderado, extenso, colapso - *ver 3.6.1*). Lo anterior, tal como se explica en el capítulo 3 (*ver 3.6.2.1*), permite la obtención de las curvas de fragilidad propias de la estructura analizada. Estas curvas quedan definidas en función de un parámetro de intensidad, M , previamente seleccionado que, en nuestro caso, será el desplazamiento espectral, S_d .

A continuación, se presentan las curvas de fragilidad obtenidas para ambas direcciones de interés del edificio agregado AG-01. Las curvas correspondientes al resto de edificios agregados pueden encontrarse en el Anejo correspondiente.

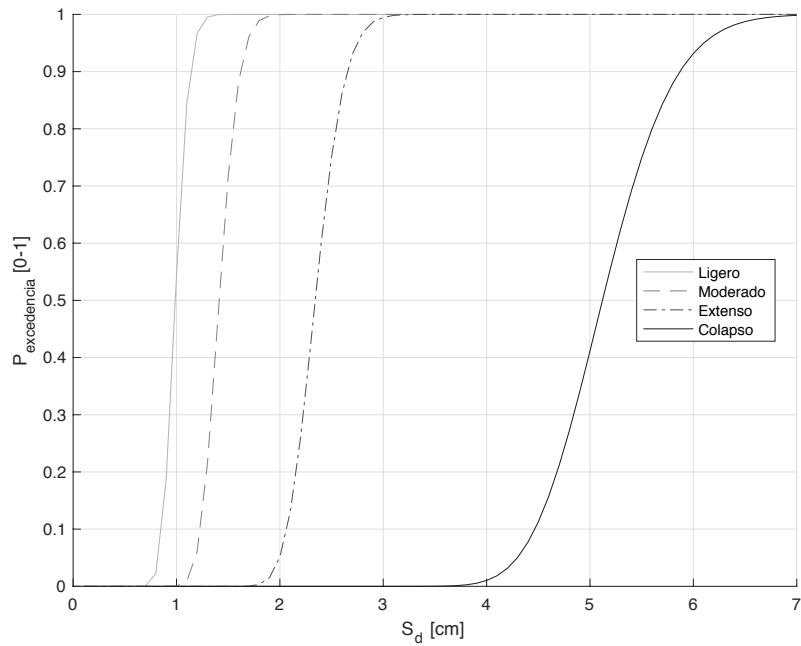


Fig. 5-6 Curvas de fragilidad para la dirección +X del agregado AG-01 (fuente: preparado por el autor)

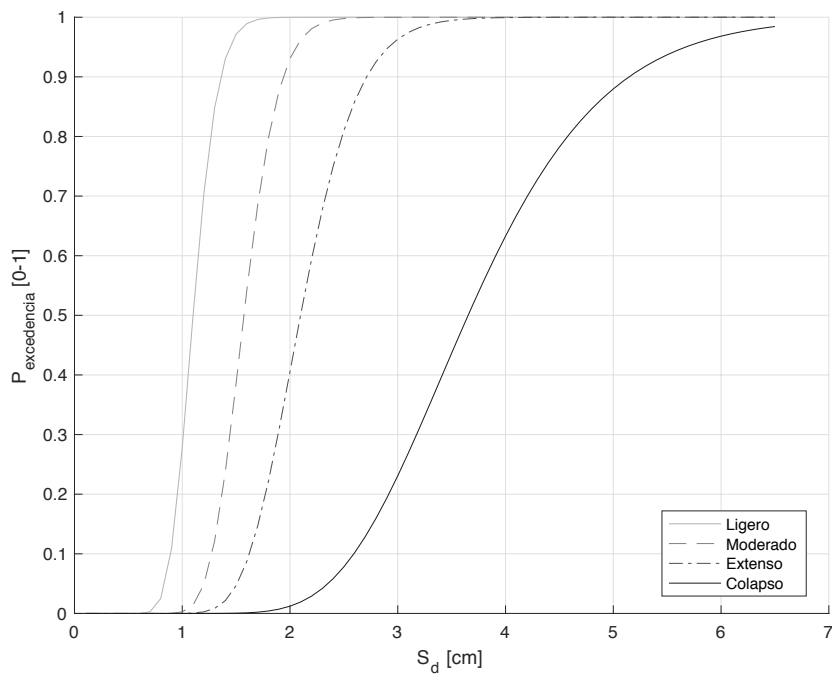


Fig. 5-7 Curvas de fragilidad para la dirección +Y del agregado AG-01 (fuente: preparado por el autor)

El daño esperable en una estructura puede determinarse, de forma cuantitativa, mediante las curvas de fragilidad. Lo anterior es posible mediante la lectura de las probabilidades asociadas a los distintos estados de daño, previamente definidos, para este propósito, y que permiten la obtención de las curvas de fragilidad asociadas a cada uno de ellos.

5.3.2 Estados de daño

Como se mencionó en el apartado anterior, a fin de obtener las probabilidades asociadas a cada uno de los estados de daño definidos en ellas, es necesario determinar el punto de cruce entre la capacidad y

la demanda (*i.e.* punto de desempeño, P_p), para, posteriormente, localizarlo en dichas curvas y realizar la lectura de las probabilidades correspondientes.

Además de los estados de daño previamente definidos, ha de considerarse el estado de daño nulo, el cual puede obtenerse al restar la sumatoria del resto de probabilidades del 100% (*i.e.* 1) de probabilidad.

Las probabilidades asociadas a un punto de desempeño en particular, P_p , para cada uno de los estados de daño, nulo y no-nulos, pueden ser expresadas en forma de histograma, a fin de poder determinar de forma sencilla, cuáles son los estados de daño más y menos probables para dicho punto.

La Fig. 5-8 y Fig. 5-9 muestran las distintas probabilidades de ocurrencia del rango de desplazamientos espectrales (*i.e.* IM) que conforman la totalidad de las curvas de fragilidad mostradas anteriormente para el agregado AG-01, permitiendo con ello, observar la evolución de cada uno de los estados de daño conforme nos desplazamos a lo largo de las curvas de fragilidad. Se puede observar, por ejemplo, que la probabilidad de que el estado de daño sea nulo es del 100% (*i.e.* 1) para desplazamientos cercanos a 0, mientras que, para desplazamientos superiores, dicho estado de daño nulo tiene una probabilidad de ocurrencia de 0.

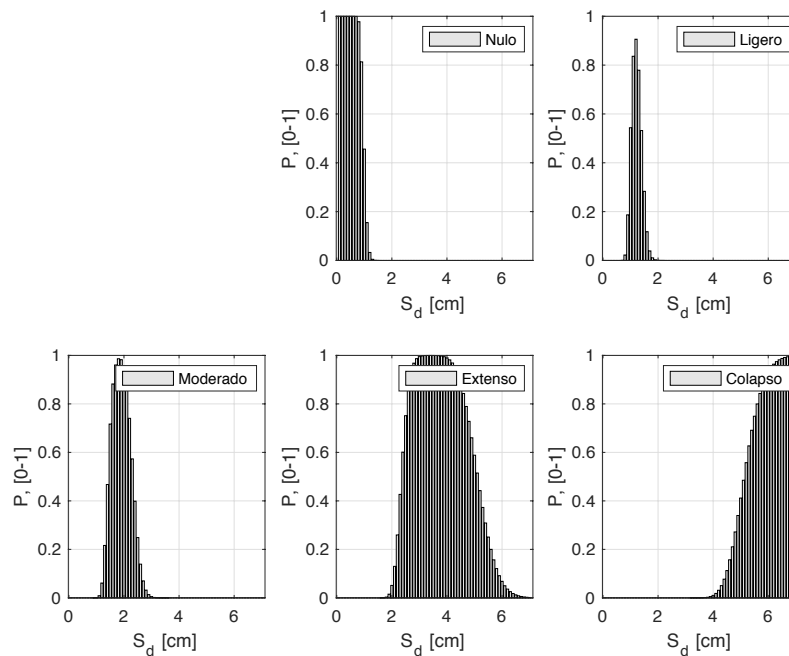


Fig. 5-8 Probabilidades de ocurrencia de los distintos estados de daño para diversos desplazamientos espectrales posibles obtenidos a partir de las curvas de fragilidad en la dirección +X del agregado AG-01 (fuente: preparado por el autor)

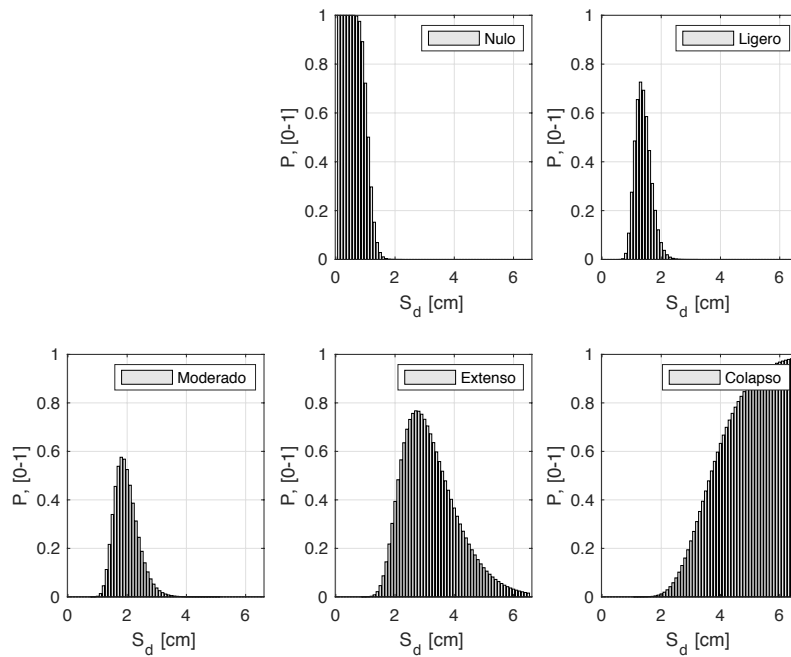


Fig. 5-9 Probabilidades de ocurrencia de los distintos estados de daño para diversos desplazamientos espectrales posibles obtenidos a partir de las curvas de fragilidad en la dirección +Y del agregado AG-01 (fuente: preparado por el autor)

Es posible, por tanto, de manera muy sencilla, observar la entrada y salida a los distintos estados de daño, conforme los desplazamientos espectrales cambian, permitiendo generar un histograma con los distintos estados de daño para cualquier P_p de interés.

Por ejemplo, podemos observar que, para la dirección +X del agregado AG-01, el estado de daño *Extenso* tendrá una mayor participación, en términos generales, que en la dirección +Y, en la cual el estado de daño de *Colapso* tendrá una participación más elevada.

Las figuras correspondientes al resto de edificios agregados pueden encontrarse en el Anejo correspondiente.

5.3.3 Punto de desempeño

El punto de capacidad por demanda, o punto de desempeño, resulta de confrontar la capacidad de la estructura con la demanda. Este punto de cruce nos permite, a partir de las curvas de fragilidad y estados de daño previamente definidos, extraer las probabilidades de ocurrencia de dichos estados de daño y, por tanto, la toma de decisiones relacionadas con, primeramente, salvaguardar la vida y, posteriormente, mantener o elevar las condiciones estructurales del edificio estudiado.

Los resultados que se presentan en este apartado corresponden a tres aceleraciones pico del terreno, *pga*, de interés. Estas aceleraciones, con valores de $0.04g$, $0.141g$ y $0.194g$, corresponden a los valores de referencia para la zona y tipo de terreno en que se encuentran las estructuras de este trabajo (ver 2.2.2), siendo el primero de ellos el propuesto en la Norma de Construcción Sismorresistente (NCSE-02, 2002), mientras que los otros dos valores se corresponden, respectivamente, con aquellos propuestos para los escenarios determinista y probabilista en el estudio llevado a cabo por el Instituto Cartográfico de Cataluña (Irizarry *et al.* (2003)).

Tal como se comentó para los edificios aislados, a pesar de que en 2012 se llevó a cabo la actualización de los mapas de peligrosidad sísmica de España (Instituto Geográfico Nacional, 2013), a raíz de lo cual, para Barcelona, se incrementó el valor de pga de 0.04 g a 0.09 g , a manera de demostrar la importancia de una correcta caracterización del tipo del terreno y la selección de una demanda adecuada, los resultados se presentan en función del valor que fue definido inicialmente en la norma, es decir, 0.04 g .

El procedimiento estático no-lineal seleccionado, incide, junto con la aceleración pico del terreno para la cual se escalan los distintos espectros de respuesta, en la obtención del punto de desempeño. Los resultados obtenidos para los 278 conjuntos (*i.e.* sets) de propiedades mecánicas materiales del edificio agregado AG-01, y su correspondiente distribución se muestran en la Fig. 5-10, para cada una de las direcciones de interés y el $pga = 0.04\text{ g}$. Análogamente, los resultados para $pga = 0.141\text{ g}$ y $pga = 0.194\text{ g}$, se muestran en la Fig. 5-11 y en la Fig. 5-12, respectivamente.

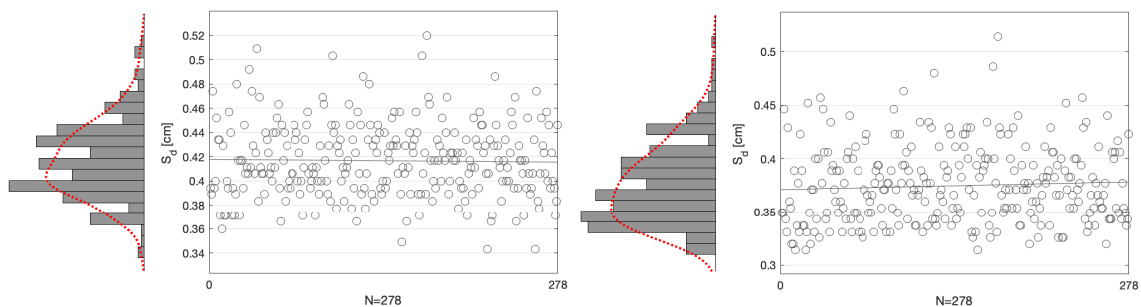


Fig. 5-10 Desplazamientos espectrales, S_d , de los puntos de desempeño, P_p , obtenidos para $pga = 0.04\text{ g}$ del agregado AG-01 en las direcciones +X (izq.) y +Y (der.), de acuerdo con lo establecido en el procedimiento N2 (fuente: preparado por el autor)

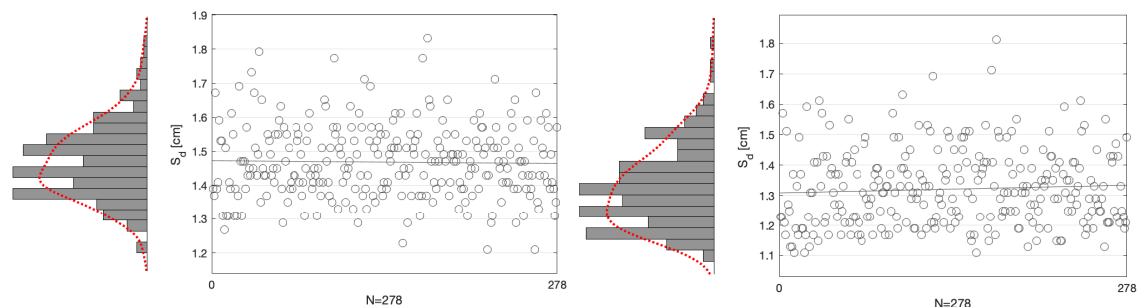


Fig. 5-11 Desplazamientos espectrales, S_d , de los puntos de desempeño, P_p , obtenidos para $pga = 0.141\text{ g}$ del agregado AG-01 en las direcciones +X (izq.) y +Y (der.), de acuerdo con lo establecido en el procedimiento N2 (fuente: preparado por el autor)

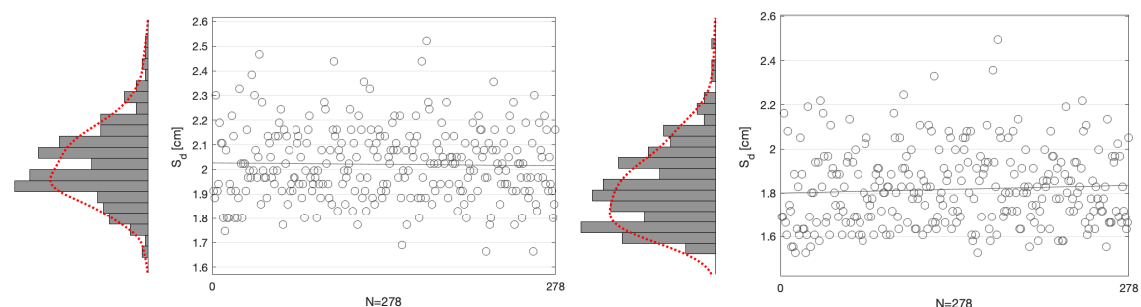


Fig. 5-12 Desplazamientos espectrales, S_d , de los puntos de desempeño, P_p , obtenidos para $pga = 0.194\text{ g}$ del agregado AG-01 en las direcciones +X (izq.) y +Y (der.), de acuerdo con lo establecido en el procedimiento N2 (fuente: preparado por el autor)

Como era de esperar, es posible observar que, a medida que el pga aumenta, también lo hacen los desplazamientos asociados a los distintos puntos de desempeño obtenidos, teniendo valores de desplazamiento espectral bajos para valores de pga inferiores.

Las estadísticas básicas para los puntos de desempeño encontrados para cada uno de los *pga* de interés, en cada dirección de análisis, se muestran para el agregado AG-01 en la Tabla 5-22.

Tabla 5-22 Estadísticas básicas de los puntos de desempeño para cada *pga* en ambas direcciones del agregado AG-01 [cm] (fuente: preparado por el autor)

	Dir.	min	max	mean	median	std
$S_{d-PP-0.04g}$	+X	0,34	0,52	0,42	0,41	0,03
	+Y	0,31	0,51	0,37	0,37	0,04
$S_{d-PP-0.141g}$	+X	1,21	1,83	1,47	1,46	0,11
	+Y	1,11	1,81	1,32	1,31	0,13
$S_{d-PP-0.194g}$	+X	1,66	2,52	2,02	2,01	0,15
	+Y	1,52	2,49	1,82	1,80	0,17

La Tabla 5-23 muestra los coeficientes de correlación existentes de los puntos de desempeño obtenidos para el agregado AG-01 en las dos direcciones principales de análisis. Ya que los puntos de desempeño se calculan a partir de escalar el mismo espectro de demanda para uno u otro *pga*, las correlaciones entre distintos valores de *pga* son idénticas.

Tabla 5-23 Coeficientes de correlación de los puntos de desempeño y las variables aleatorias de interés del agregado AG-01 (fuente: preparado por el autor)

	Dir.	f_m	E	G	τ_0
S_{d-PP}	+X	-0,86	-0,87	-0,81	-0,89
	+Y	-0,89	-0,93	-0,91	-0,85

Las estadísticas básicas para los puntos de desempeño de cada *pga* de interés, así como para ambas direcciones de análisis de todos los edificios agregados se presentan a continuación.

Tabla 5-24 Estadísticas básicas de los puntos de desempeño, S_{d-PP} , para *pga*=0.04 g, para todos los edificios agregados en ambas direcciones principales (fuente: preparado por el autor)

	Dir.	min	max	mean	median	std
AG-01	+X	0,34	0,52	0,42	0,41	0,03
	+Y	0,31	0,51	0,37	0,37	0,04
AG-02	+X	0,36	0,55	0,43	0,43	0,03
	+Y	0,30	0,49	0,36	0,36	0,03
AG-03	+X	0,33	0,54	0,39	0,39	0,04
	+Y	0,34	0,58	0,41	0,40	0,04

Tabla 5-25 Estadísticas básicas de los puntos de desempeño, S_{d-PP} , para *pga*=0.141 g, para todos los edificios agregados en ambas direcciones principales (fuente: preparado por el autor)

	Dir.	min	max	mean	median	std
AG-01	+X	1,21	1,83	1,47	1,46	0,11
	+Y	1,11	1,81	1,32	1,31	0,13
AG-02	+X	1,27	1,93	1,52	1,51	0,11
	+Y	1,05	1,71	1,27	1,27	0,12
AG-03	+X	1,15	1,89	1,39	1,37	0,13
	+Y	1,19	2,03	1,43	1,41	0,13

Tabla 5-26 Estadísticas básicas de los puntos de desempeño, S_{d-PP} , para *pga*=0.194 g, para todos los edificios agregados en ambas direcciones principales (fuente: preparado por el autor)

	Dir.	min	max	mean	median	std
AG-01	+X	1,66	2,52	2,02	2,01	0,15
	+Y	1,52	2,49	1,82	1,80	0,17
AG-02	+X	1,75	2,66	2,10	2,08	0,15
	+Y	1,44	2,36	1,75	1,75	0,16
AG-03	+X	1,58	2,61	1,91	1,88	0,18
	+Y	1,64	2,80	1,97	1,94	0,17

Puede confirmarse, por tanto, que conforme se incursiona en estados de daño superiores (*i.e.* S_{d-PP} mayores), la variabilidad de los resultados también aumenta, lo cual está estrechamente relacionado con la definición de los estados de daño superiores, para los cuales, se considera, parcial o totalmente, la participación del desplazamiento correspondiente al punto último obtenido de las representaciones bilineales.

La Tabla 5-27 muestra los coeficientes de correlación existentes entre los puntos de desempeño y las variables aleatorias de interés, para cada uno de los edificios agregados en sus dos direcciones principales de análisis.

Tabla 5-27 Coeficientes de correlación de los puntos de desempeño y las variables aleatorias de interés para todos los edificios agregados (fuente: preparado por el autor)

	Dir.	f_m	E	G	τ_0
AG-01	+X	-0,86	-0,87	-0,81	-0,89
	+Y	-0,89	-0,93	-0,91	-0,85
AG-02	+X	-0,90	-0,91	-0,86	-0,92
	+Y	-0,90	-0,95	-0,93	-0,86
AG-03	+X	-0,91	-0,96	-0,94	-0,86
	+Y	-0,89	-0,93	-0,90	-0,86

Se puede observar que, en términos generales, los coeficientes más elevados corresponden a las variables E y G .

Las estadísticas básicas de las probabilidades de pertenencia a cada uno de los estados de daño que tienen los diversos puntos de desempeño del agregado AG-01 se presentan en las tablas Tabla 5-28 y Tabla 5-29.

Tabla 5-28 Estadísticas básicas de las probabilidades de pertenencia a los distintos estados de daño de los puntos de desempeño obtenidos para cada pga en la dirección +X del agregado AG-01 [%] (fuente: preparado por el autor)

	Daño	min	max	mean	median	std
P($S_{d-PP-0.04g}$)	<i>Nulo</i>	100,00	100,00	100,00	100,00	0,00
	<i>Ligero</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	<i>Moderado</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	<i>Extenso</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	<i>Colapso</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P($S_{d-PP-0.141g}$)	<i>Nulo</i>	0,00	3,03	0,11	0,02	0,33
	<i>Ligero</i>	0,79	89,49	39,06	38,11	21,00
	<i>Moderado</i>	7,48	98,49	60,82	61,87	21,17
	<i>Extenso</i>	0,00	0,73	0,01	0,00	0,05
	<i>Colapso</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P($S_{d-PP-0.194g}$)	<i>Nulo</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	<i>Ligero</i>	0,00	6,80	0,26	0,05	0,72
	<i>Moderado</i>	22,41	98,61	88,71	93,07	13,06
	<i>Extenso</i>	0,03	77,59	11,02	5,99	13,24
	<i>Colapso</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabla 5-29 Estadísticas básicas de las probabilidades de pertenencia a los distintos estados de daño de los puntos de desempeño obtenidos para cada pga en la dirección +Y del agregado AG-01 [%] (fuente: preparado por el autor)

	Daño	min	max	mean	median	std
P($S_{d-PP-0.04g}$)	<i>Nulo</i>	100,00	100,00	100,00	100,00	0,00
	<i>Ligero</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	<i>Moderado</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	<i>Extenso</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	<i>Colapso</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P($S_{d-PP-0.141g}$)	<i>Nulo</i>	0,11	48,44	17,52	14,45	12,16
	<i>Ligero</i>	19,05	72,32	65,09	67,55	7,70
	<i>Moderado</i>	1,60	57,47	15,52	12,27	11,87

	<i>Extenso</i>	0,08	22,91	1,85	0,95	2,55
	<i>Colapso</i>	0,00	0,45	0,02	0,01	0,04
	<i>Nulo</i>	0,00	2,40	0,35	0,12	0,47
	<i>Ligero</i>	0,23	55,10	22,63	19,96	14,12
P(S _{d-PP-0.194g})	<i>Moderado</i>	19,09	57,56	51,83	53,88	5,95
	<i>Extenso</i>	5,62	72,96	24,49	21,94	13,71
	<i>Colapso</i>	0,06	7,71	0,70	0,41	0,85

En las tablas anteriores, se puede apreciar la distribución de los estados de daño correspondientes a cada uno de los *pgas* de interés, pudiendo observar que, para el caso de *pga* = 0.04 g, la totalidad de puntos se concentra en el estado de daño *Nulo*. En el caso del *pga* = 0.141 g, para las direcciones +X e +Y, los estados *Moderado* y *Ligero*, dominan, respectivamente. En lo que respecta el *pga* = 0.194 g, se observa que, en ambas direcciones, el estado de daño *Moderado* es el que presenta mayor concentración de porcentaje.

La tendencia del daño para las diferentes estructuras analizadas puede determinarse a partir de la distribución de porcentajes asignada al resto de estados de daño, detectando así, si la mayoría de porcentaje se presenta en estados de daño inferiores o superiores.

Tal como se presentó para el agregado AG-01, las estadísticas básicas de las probabilidades de pertenencia a cada uno de los estados de daño que tienen los diversos puntos de desempeño de los distintos edificios agregados se presentan a continuación para cada una de sus direcciones.

Tabla 5-30 Estadísticas básicas de las probabilidades de pertenencia a los distintos estados de daño de los puntos de desempeño obtenidos para cada *pga* en la dirección +X del agregado AG-02 [%] (fuente: preparado por el autor)

	Daño	min	max	mean	median	std
P(S _{d-PP-0.04g})	<i>Nulo</i>	100,00	100,00	100,00	100,00	0,00
	<i>Ligero</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	<i>Moderado</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	<i>Extenso</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	<i>Colapso</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P(S _{d-PP-0.141g})	<i>Nulo</i>	0,00	0,29	0,00	0,00	0,02
	<i>Ligero</i>	0,02	77,11	19,10	15,10	16,55
	<i>Moderado</i>	22,60	98,73	80,80	84,89	16,47
	<i>Extenso</i>	0,00	8,57	0,10	0,00	0,58
	<i>Colapso</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P(S _{d-PP-0.194g})	<i>Nulo</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	<i>Ligero</i>	0,00	0,63	0,01	0,00	0,05
	<i>Moderado</i>	1,81	98,64	66,66	72,47	22,48
	<i>Extenso</i>	0,73	98,19	33,33	27,52	22,50
	<i>Colapso</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabla 5-31 Estadísticas básicas de las probabilidades de pertenencia a los distintos estados de daño de los puntos de desempeño obtenidos para cada *pga* en la dirección +Y del agregado AG-02 [%] (fuente: preparado por el autor)

	Daño	min	max	mean	median	std
P(S _{d-PP-0.04g})	<i>Nulo</i>	100,00	100,00	100,00	100,00	0,00
	<i>Ligero</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	<i>Moderado</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	<i>Extenso</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	<i>Colapso</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P(S _{d-PP-0.141g})	<i>Nulo</i>	0,33	72,18	28,22	25,08	17,26
	<i>Ligero</i>	27,64	76,85	64,54	67,54	12,30
	<i>Moderado</i>	0,18	53,33	6,97	4,47	7,95
	<i>Extenso</i>	0,00	8,55	0,27	0,07	0,72
	<i>Colapso</i>	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00
P(S _{d-PP-0.194g})	<i>Nulo</i>	0,00	6,42	0,70	0,24	1,12
	<i>Ligero</i>	0,70	73,79	35,08	33,14	18,30
	<i>Moderado</i>	18,99	60,81	50,39	53,78	10,60
	<i>Extenso</i>	0,79	71,69	13,78	10,79	11,91
	<i>Colapso</i>	0,00	1,79	0,06	0,02	0,15

Tabla 5-32 Estadísticas básicas de las probabilidades de pertenencia a los distintos estados de daño de los puntos de desempeño obtenidos para cada *pga* en la dirección +X del agregado AG-03 [%] (fuente: preparado por el autor)

	Daño	min	max	mean	median	std
P(S _{d-PP-0.04g})	<i>Nulo</i>	100,00	100,00	100,00	100,00	0,00
	<i>Ligero</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	<i>Moderado</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	<i>Extenso</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	<i>Colapso</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P(S _{d-PP-0.141g})	<i>Nulo</i>	0,02	62,53	18,77	15,56	15,87
	<i>Ligero</i>	21,43	82,95	72,06	75,60	11,83
	<i>Moderado</i>	0,14	78,52	9,17	4,51	11,29
	<i>Extenso</i>	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00
	<i>Colapso</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P(S _{d-PP-0.194g})	<i>Nulo</i>	0,00	1,70	0,14	0,02	0,29
	<i>Ligero</i>	0,05	71,34	25,42	22,66	18,80
	<i>Moderado</i>	26,95	94,81	73,69	77,28	18,35
	<i>Extenso</i>	0,00	39,36	0,75	0,03	2,92
	<i>Colapso</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabla 5-33 Estadísticas básicas de las probabilidades de pertenencia a los distintos estados de daño de los puntos de desempeño obtenidos para cada *pga* en la dirección +Y del agregado AG-03 [%] (fuente: preparado por el autor)

	Daño	min	max	mean	median	std
P(S _{d-PP-0.04g})	<i>Nulo</i>	100,00	100,00	100,00	100,00	0,00
	<i>Ligero</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	<i>Moderado</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	<i>Extenso</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	<i>Colapso</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P(S _{d-PP-0.141g})	<i>Nulo</i>	0,01	66,57	20,77	17,74	15,98
	<i>Ligero</i>	15,84	84,40	72,49	77,01	12,53
	<i>Moderado</i>	0,05	79,35	6,69	2,83	9,51
	<i>Extenso</i>	0,00	4,78	0,05	0,00	0,30
	<i>Colapso</i>	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00
P(S _{d-PP-0.194g})	<i>Nulo</i>	0,00	1,87	0,13	0,03	0,28
	<i>Ligero</i>	0,02	74,73	28,25	26,69	18,73
	<i>Moderado</i>	23,27	83,26	66,84	70,78	15,46
	<i>Extenso</i>	0,13	62,38	4,76	2,50	6,39
	<i>Colapso</i>	0,00	0,93	0,02	0,01	0,06

5.3.4 Grado de daño medio

El denominado grado de daño medio (*i.e.* índice de daño –*ver 3.6.1.I*) permite obtener una valoración general (*i.e.* global) sobre la probabilidad de daño que puedan presentar las distintas estructuras. Se expresa como una curva *IM* vs. *Prob_{daño}*, a partir de la cual, mediante el uso del desplazamiento asociado a cada uno de los puntos de desempeño encontrados, se puede leer el porcentaje de daño general (*i.e.* global) en que se incurre con dicho desplazamiento.

Las curvas del grado de daño medio obtenidas para el agregado AG-01, en ambas direcciones de análisis se muestran en la Fig. 5-13 y Fig. 5-14.

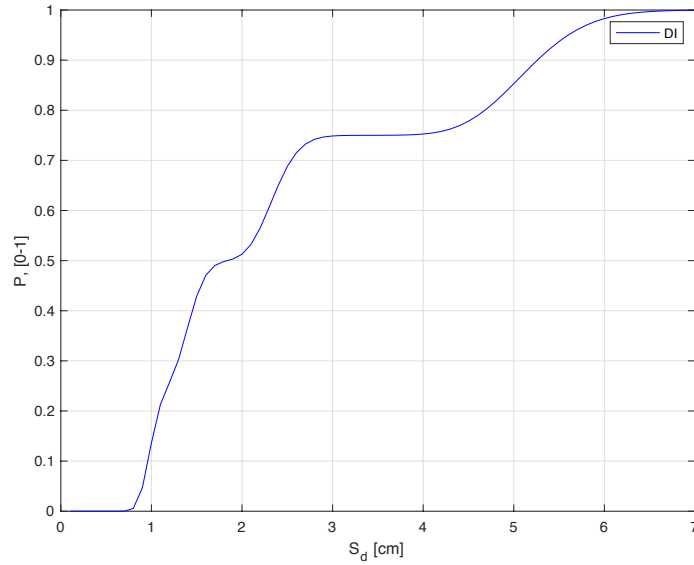


Fig. 5-13 Curva del grado de daño medio (i.e. índice de Daño, DI) para el agregado AG-01 en la dirección +X (fuente: preparado por el autor)

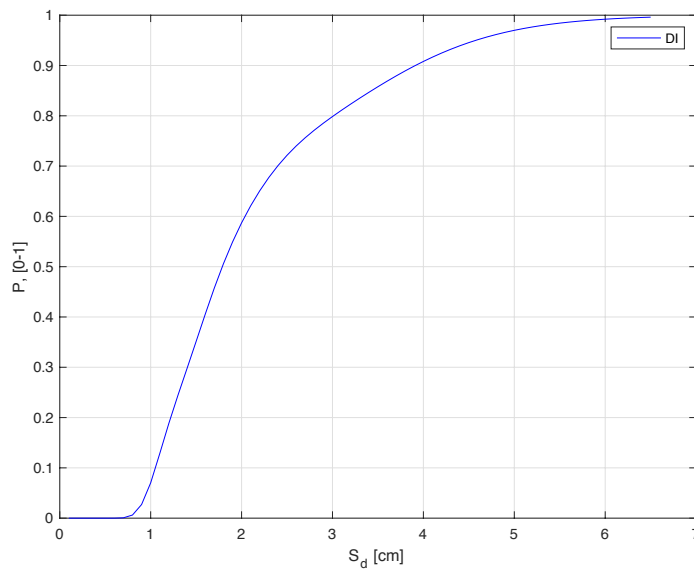


Fig. 5-14 Curva del grado de daño medio (i.e. índice de Daño, DI) para el agregado AG-01 en la dirección +Y (fuente: preparado por el autor)

De la misma manera en que se obtuvieron las probabilidades para cada uno de los desplazamientos de los puntos de desempeño, se obtienen los valores correspondientes al índice de daño para cada uno de los *pga* de interés en ambas direcciones del agregado AG-01, así como sus estadísticas básicas correspondientes.

Tabla 5-34 Estadísticas básicas de las probabilidades del índice de daño, *DI*, de los puntos de desempeño obtenidos para cada *pga* en ambas direcciones del agregado AG-01 [%] (fuente: preparado por el autor)

	Dir.	min	max	mean	median	std
P($S_d-PP-0.04g$)	+X	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	+Y	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P($S_d-PP-0.141g$)	+X	26,11	49,98	40,18	40,46	5,35
	+Y	13,33	51,13	25,44	24,94	6,90
P($S_d-PP-0.194g$)	+X	48,31	69,40	52,69	51,48	3,36
	+Y	36,46	72,04	50,64	50,64	7,37

Podemos observar que, a medida que el pga se incrementa, el porcentaje de daño global también se eleva, llegando incluso a superar valores por encima del 70% de daño global. La interpretación y finalidad de los porcentajes obtenidos en el punto anterior, puede ser varios, permitiendo realizar estimaciones de las acciones e intervenciones requeridas, así como de costes económicos esperables en el caso de que dichos escenarios se presenten.

Tabla 5-35 Coeficientes de correlación de las probabilidades del índice de daño, DI , de los puntos de desempeño y las variables aleatorias de interés para el agregado AG-01 (fuente: preparado por el autor)

	Dir.	f_m	E	G	τ_0
P($S_{d-PP-0.04g}$)	+X	-0,17	-0,20	-0,19	-0,20
	+Y	-0,19	-0,23	-0,21	-0,20
P($S_{d-PP-0.141g}$)	+X	-0,87	-0,87	-0,81	-0,90
	+Y	-0,89	-0,94	-0,92	-0,86
P($S_{d-PP-0.194g}$)	+X	-0,75	-0,76	-0,71	-0,77
	+Y	-0,90	-0,94	-0,92	-0,86

Podemos observar que las correlaciones asociadas a valores de pga inferiores no presentan valores demasiado altos, tal como ocurre para los otros valores de aceleración empleados.

Los resultados correspondientes al resto de los edificios agregados se presentan a continuación.

Tabla 5-36 Estadísticas básicas de las probabilidades del índice de daño, DI , de los puntos de desempeño obtenidos para cada pga en ambas direcciones del agregado AG-02 [%] (fuente: preparado por el autor)

	Dir.	min	max	mean	median	std
P($S_{d-PP-0.04g}$)	+X	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	+Y	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P($S_{d-PP-0.141g}$)	+X	30,58	52,14	45,25	46,22	4,17
	+Y	7,00	42,53	19,82	19,88	6,20
P($S_{d-PP-0.194g}$)	+X	50,03	74,55	58,33	56,88	5,63
	+Y	28,54	68,64	44,35	44,30	7,79

Tabla 5-37 Estadísticas básicas de las probabilidades del índice de daño, DI , de los puntos de desempeño obtenidos para cada pga en ambas direcciones agregado AG-03 [%] (fuente: preparado por el autor)

	Dir.	min	max	mean	median	std
P($S_{d-PP-0.04g}$)	+X	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	+Y	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P($S_{d-PP-0.141g}$)	+X	9,40	44,64	22,60	22,24	6,22
	+Y	8,37	47,24	21,50	21,28	5,85
P($S_{d-PP-0.194g}$)	+X	31,31	59,83	43,76	44,33	5,09
	+Y	30,41	66,06	44,07	43,94	5,99

Tabla 5-38 Coeficientes de correlación de las probabilidades del índice de daño, DI , de los puntos de desempeño y las variables aleatorias de interés para todos los edificios y $pga = 0.04 g$ (fuente: preparado por el autor)

	Dir.	f_m	E	G	τ_0
AG-01	+X	-0,17	-0,20	-0,19	-0,20
	+Y	-0,19	-0,23	-0,21	-0,20
AG-02	+X	-0,24	-0,26	-0,23	-0,24
	+Y	-0,46	-0,50	-0,45	-0,45
AG-03	+X	-0,14	-0,18	-0,16	-0,15
	+Y	-0,18	-0,22	-0,19	-0,19

Tabla 5-39 Coeficientes de correlación de las probabilidades del índice de daño, DI , de los puntos de desempeño y las variables aleatorias de interés para todos los edificios y $pga = 0.141 g$ (fuente: preparado por el autor)

	Dir.	f_m	E	G	τ_0
AG-01	+X	-0,87	-0,87	-0,81	-0,90
	+Y	-0,89	-0,94	-0,92	-0,86
AG-02	+X	-0,87	-0,87	-0,82	-0,88
	+Y	-0,90	-0,95	-0,94	-0,87
AG-03	+X	-0,91	-0,97	-0,95	-0,87
	+Y	-0,90	-0,94	-0,90	-0,86

Tabla 5-40 Coeficientes de correlación de las probabilidades del índice de daño, DI , de los puntos de desempeño y las variables aleatorias de interés para todos los edificios y $pga = 0.194 g$ (fuente: preparado por el autor)

	Dir.	f_m	E	G	τ_0
AG-01	+X	-0,75	-0,76	-0,71	-0,77
	+Y	-0,90	-0,94	-0,92	-0,86
AG-02	+X	-0,89	-0,89	-0,84	-0,90
	+Y	-0,90	-0,95	-0,94	-0,87
AG-03	+X	-0,90	-0,96	-0,94	-0,85
	+Y	-0,91	-0,95	-0,91	-0,87

Puede observarse que, para todos los valores de pga elevados y, para la mayoría de las estructuras y direcciones, la variable aleatoria con mayor coeficiente de correlación es la E . Tal como se concluyó para agregado AG-01, los valores de pga inferiores, presentan una correlación baja, a diferencia de lo que ocurre con valores de pga mayores, para los cuales, dicha correlación es elevada.

5.4 Análisis dinámico incremental

5.4.1 Limitaciones en los análisis dinámicos

Tal como ocurre en cualquiera programa de cálculo estructural, el número de barras y nodos que componen a cada modelo tridimensional, se incrementa conforme la estructura crece en planta y/o en altura. Lo anterior tiene asociadas una serie de limitaciones en lo que se refiere al cómputo de algunos tipos de análisis estructurales. En particular, el programa *3muri*, presenta una limitante de memoria en los análisis dinámicos, la cual se ve excedida al confrontar modelos con un número elevado de nodos y barras, con los registros de aceleración utilizados.

A pesar de que los registros de aceleraciones empleados en este trabajo fueron previamente tratados y elegidos minuciosamente para evitar, en la medida de lo posible, esta limitante, en lo que respecta a las estructuras agregadas compuestas por dos edificios, algunos de estos registros presentaron problemas, impidiendo el cálculo de dicho análisis dinámico. De la misma manera, para el caso del agregado compuesto por tres edificios, y que, por tanto, es el modelo con mayor número de nodos y barras de todas las estructuras analizadas en este trabajo, ninguno de los registros previamente seleccionados y tratados permitió la obtención de resultados referentes al análisis dinámico.

A fin de mantener las mismas unidades que componen las muestras para el resto de las estructuras analizadas en este trabajo, se decidió no suplir los análisis que no pudieron ser computados, a fin de poder mantener las correlaciones existentes para otros modelos. Lo anterior podría interpretarse como si se llevase a cabo un segundo muestreo, cuya población inicial, sería la muestra obtenida previamente, a sabiendas de las posibles implicaciones de representatividad y adecuación que esta decisión conlleva implícitamente.

5.4.2 Resultados

De acuerdo con lo descrito en el capítulo 3 (*ver 3.5.2*), los diversos análisis dinámicos incrementales se llevaron a cabo utilizando el programa de cálculo estructural 3muri. Previamente, fue necesario seleccionar una muestra suficientemente representativa, a fin de reducir el número de análisis en la medida de lo posible, y hacer viable su cálculo a gran escala.

Tal como se detalla en los apartados correspondientes del capítulo 3, un total de siete registros de aceleraciones del terreno fueron seleccionados, así como un total de cinco valores de aceleración pico del terreno, pga , para su posterior escalado.

Para cada una de las direcciones de los distintos edificios agregados, se llevaron a cabo los análisis dinámicos para la muestra, previamente diseñada y seleccionada, compuesta por 370 unidades. Los resultados de dichos análisis se presentan en este apartado de forma detallada para el edificio agregado AG-01, y de forma resumida para el edificio agregado AG-02. La completitud de resultados y figuras de todos los análisis realizados se encuentran en el anejo correspondiente. Cabe recalcar que, tal como se explicó en el apartado anterior, no existen resultados para el edificio agregado AG-03.

Adicionalmente, se presentan las tablas con los distintos coeficientes de correlación existentes entre las variables aleatorias de interés (*i.e.* propiedades mecánicas materiales) y los distintos parámetros calculados y obtenidos a partir de los análisis dinámicos.

Una vez llevados a cabo los análisis en el programa 3muri (Galasco *et al.*, 2002; S.T.A. DATA, 2012; Lagomarsino *et al.*, 2013), los resultados se post-procesaron mediante rutinas preparadas para ello en el programa MATLAB (The MathWorks, 2018a).

Los valores máximos de aceleración, desplazamiento y cortante basal, para cada unidad de la muestra, se obtienen a partir de las historias temporales resultantes de cada análisis dinámico, con el fin de, posteriormente, emplearlos en la determinación de la respuesta estructural.

La Fig. 5-15 y Fig. 5-16 muestran los distintos valores de desplazamiento en el techo vs. pga para la dirección +X e +Y, respectivamente del agregado AG-01. También se muestran las curvas con los valores medios y ± 1 desviación estándar.

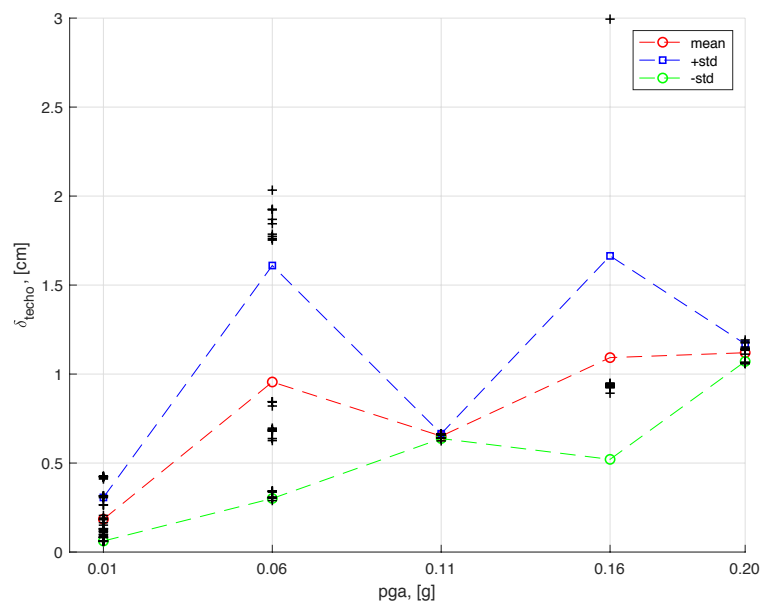


Fig. 5-15 Desplazamiento en el techo vs pga de los distintos análisis dinámicos realizados en el agregado AG-01 en la dirección +X (fuente: preparado por el autor)

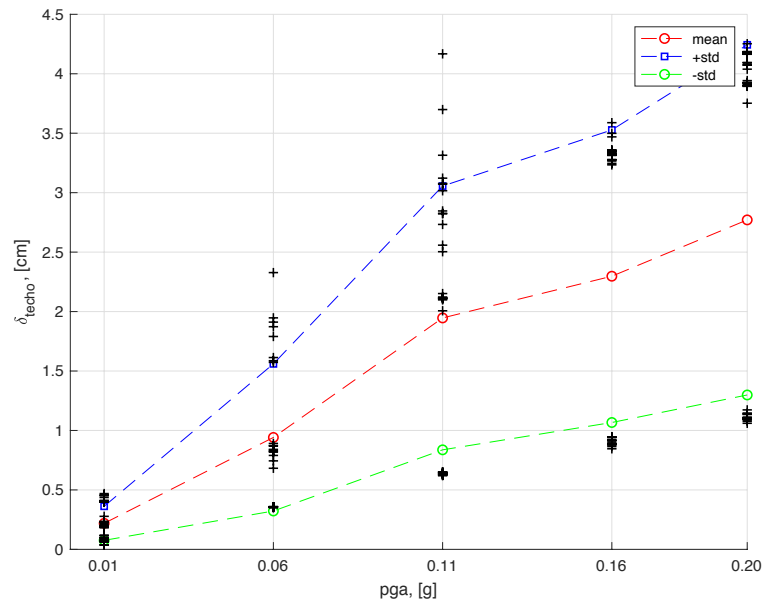


Fig. 5-16 Desplazamiento en el techo vs pga de los distintos análisis dinámicos realizados en el agregado AG-01 en la dirección +Y (fuente: preparado por el autor)

Como se puede apreciar, el hecho de no tener disponibles la totalidad de resultados esperados para la muestra diseñada, incide, directamente, en la cantidad de resultados y, por ende, en la variabilidad que podrían presentar los mismos. Así mismo, existe una diferencia apreciable entre los desplazamientos obtenidos para la dirección +X y la dirección +Y, siendo, los de esta última dirección, sensiblemente superiores.

A partir de esta información se pueden calcular las distribuciones y estadísticas básicas, ya sea para cada pga considerado o, para cada uno de los registros sísmicos utilizados, según interese.

La Tabla 5-41 muestra las estadísticas básicas para los distintos desplazamientos del techo que están asociados en particular a cada uno de los valores elegidos de pga.

Tabla 5-41 Estadísticas básicas de los desplazamientos en el techo, obtenidos para los conjuntos de puntos asociados a cada valor de pga del agregado AG-01 para cada dirección de análisis [cm] (fuente: preparado por el autor)

	Dir.	min	max	mean	median	std
P _{0.01g}	+X	0,06	0,43	0,18	0,13	0,12
	+Y	0,04	0,47	0,22	0,19	0,14
P _{0.06g}	+X	0,29	2,03	0,96	0,69	0,65
	+Y	0,35	2,33	0,94	0,82	0,62
P _{0.11g}	+X	0,62	0,66	0,65	0,66	0,01
	+Y	0,62	4,17	1,95	2,11	1,11
P _{0.16g}	+X	0,89	2,99	1,09	0,94	0,57
	+Y	0,85	3,59	2,30	3,27	1,23
P _{0.20g}	+X	1,06	1,19	1,12	1,14	0,05
	+Y	1,06	4,25	2,77	3,90	1,47

La información obtenida a partir de los análisis dinámicos nos permite generar una curva de daño, de forma análoga a las curvas de fragilidad que se generaron para los análisis estáticos no-lineales. Se elige como parámetro de intensidad, IM , la aceleración pico del terreno, pga .

La Fig. 5-17 muestra las curvas de probabilidad de daño generadas a partir de considerar $IM = pga$ y $IM = d_{techo}$, las cuales nos permiten, de manera muy sencilla, identificar cualquier valor de pga o desplazamiento de interés, y con ello, determinar la probabilidad sus probabilidades de ocurrencia.

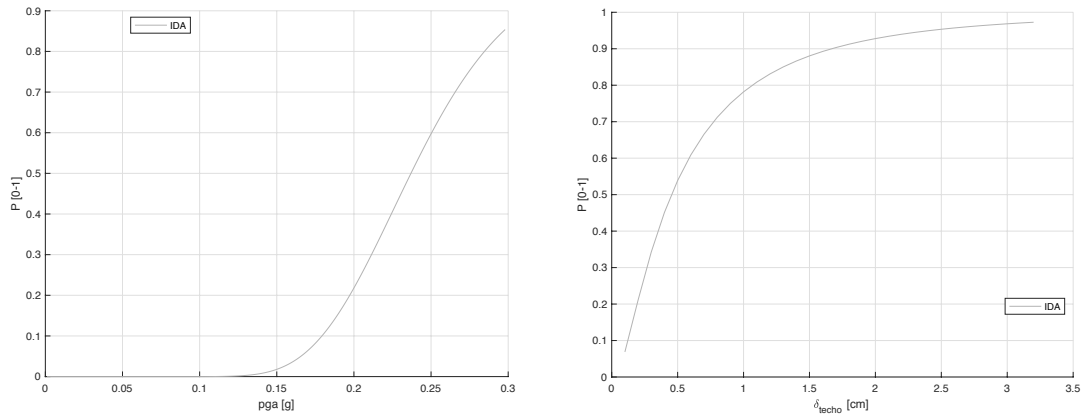


Fig. 5-17 Curva de daño esperado para el agregado AG-01 en la dirección +X y un $IM = pga$ (izq) ó $IM = S_d$ (der.) (fuente: preparado por el autor)

A fines de permitir la comparativa con los resultados obtenidos en los análisis estáticos no-lineales, se eligen los valores de $0.04g$, $0.141g$ y $0.194g$, tal como se definió en apartados anteriores.

El porcentaje de daño obtenido para los distintos valores de pga del agregado AG-01, en sus dos direcciones principales de estudio, se muestran en la Tabla 5-42.

Tabla 5-42 Porcentaje de daño asociado a valores de pga de $0.04g$, $0.141g$ y $0.194g$ para el agregado AG-01 [%] (fuente: preparado por el autor)

	+X	+Y
$P_{0.04g}$	0,00	0,00
$P_{0.141g}$	0,86	3,32
$P_{0.194g}$	17,91	28,18

Se puede observar que, al comparar con el rango de valores de los resultados obtenidos para los análisis estáticos no-lineales, los porcentajes obtenidos para los análisis dinámicos son inferiores. Lo anterior es algo conocido y esperable, ya que los métodos simplificados tienden a sobre evaluar la respuesta estructural, presentando, por tanto, valores por encima de los que reflejan los métodos más avanzados. Los diferentes razonamientos al respecto se discuten en el capítulo siguiente.

Los resultados del agregado AG-02 se presentan a continuación.

Tabla 5-43 Estadísticas básicas de los desplazamientos en el techo, obtenidos para los conjuntos de puntos asociados a cada valor de pga del agregado AG-02 en ambas direcciones principales [cm] (fuente: preparado por el autor)

	Dir.	min	max	mean	median	std
$P_{0.01g}$	+X	0,05	0,43	0,21	0,18	0,14
	+Y	0,06	0,45	0,26	0,26	0,14
$P_{0.06g}$	+X	0,29	2,17	0,92	0,77	0,61
	+Y	0,31	2,25	0,97	0,73	0,67
$P_{0.11g}$	+X	0,57	3,33	1,84	1,83	1,02
	+Y	0,61	3,13	1,86	2,06	0,88
$P_{0.16g}$	+X	0,92	4,25	2,93	3,63	1,50
	+Y	0,90	3,61	2,98	3,37	0,96
$P_{0.20g}$	+X	1,08	5,04	2,99	4,00	1,76
	+Y	1,06	4,30	2,78	3,99	1,51

Tabla 5-44 Porcentaje de daño asociado a valores de pga de 0.04 g, 0.141 g y 0.194 g para el agregado AG-02 [%] (fuente: preparado por el autor)

	+X	+Y
P _{0.04g}	0,00	0,00
P _{0.141g}	4,44	4,59
P _{0.194g}	31,43	31,67

Las comparativas y discusiones, al respecto de los resultados presentados en los apartados anteriores, pueden encontrarse en el capítulo 6. Así mismo, el Anejo correspondiente contiene los resultados en su completitud para todos los edificios, aislados y agregados.

An aerial photograph of a city grid, showing a dense pattern of buildings and streets. The image is partially obscured by a dark blue rectangular overlay at the bottom, which contains the chapter title and subtitle in white serif font. The text is centered within the blue area.

CAPÍTULO 6

Resumen, discusión,
conclusiones
y recomendaciones

6 Resumen, discusión, conclusiones y recomendaciones

6.1 Introducción

Los principales resultados y contribuciones de esta tesis, así como las conclusiones más relevantes, se exponen en este capítulo. Adicionalmente, se añaden una serie de comentarios y discusiones con referencia a algunos temas que, si bien no forman parte de los objetivos principales de este trabajo, requieren ser tratados. Finalmente, se advierten las distintas líneas de investigación futuras, cuyo objetivo es complementar y/o incrementar los objetivos planteados y conseguidos en este estudio.

6.2 Resumen

Una de las contribuciones más importantes de esta tesis es la propuesta e implementación de métodos de evaluación del daño sísmico desde el punto de vista probabilista que, si bien ya se han implementado con anterioridad, lo hicieron para materiales más modernos, como lo son el hormigón y el acero, y no para mampostería no reforzada.

Este trabajo contempla la evaluación de edificios similares a los que forman parte del parque urbano de la ciudad de Barcelona, los cuales han sido ampliamente caracterizados y documentados para este trabajo, a fin de asegurar la calidad de los modelos tridimensionales modelados.

Utilizando diferentes criterios, e incluyendo la consideración probabilista de las propiedades mecánicas, así como de la demanda sísmica, se ha caracterizado el daño predecible para estas estructuras mediante funciones de fragilidad y matrices e índices de daño, aportándose un estudio de la correlación entre los parámetros mecánicos y el daño observado

La implementación del enfoque probabilista se ha efectuado mediante el muestreo aleatorio simple (SRS, por sus siglas en inglés), tanto en la acción sísmica, como en los edificios estudiados y las funciones de daño. Los principales aspectos relacionados con estos tres elementos se resumen a continuación.

6.2.1 Sobre las acciones sísmicas

La selección de una demanda adecuada para la zona de interés atiende diversos criterios con la finalidad de caracterizar adecuadamente los posibles movimientos sísmicos esperables. Es un proceso sumamente importante, ya que la incertidumbre asociada a la misma es una de las que mayor impacto tiene en los resultados finales.

En el caso de los procedimientos estáticos no-lineales, el método N2 propone la obtención de una serie de factores relacionados con la ductilidad y el período de la estructura, los cuales permiten convertir el espectro elástico en uno inelástico. Los espectros empleados en este trabajo se eligen a partir de una de las formulaciones hechas en distintos trabajos, en los cuales se han tenido en cuenta las características del terreno de la zona de estudio, permitiendo con ello, el uso de espectros específicos de la ciudad.

En cuanto a la selección de los registros a utilizar en los análisis dinámicos, se ha empleado la metodología del espectro condicional, *CS*, con la finalidad de tener acceso a una base de datos más extensa, permitiendo así, obtener los registros que mejor se adecuan a las características propias de la zona de interés. El procedimiento incorpora también simulaciones por medio del método de Monte Carlo y procesos de optimización, con el objetivo de que la compatibilidad entre los registros existentes y los valores objetivo sea la máxima posible.

El tratamiento de los registros obtenidos a través del *CS* se lleva a cabo con la finalidad de filtrar, corregir y preparar los registros para su posterior uso en el programa 3muri.

6.2.2 Sobre los edificios aislados

Un total de cuatro edificios de mampostería no-reforzada se han modelado tridimensionalmente con el programa 3muri. Lo anterior ha sido posible gracias a la información detallada acerca de los mismos, que ha sido recopilada de diferentes fuentes, archivos y visitas in-situ, y que, por tanto, ha permitido su modelado de forma sencilla y completa.

Los edificios aislados cuentan con siete niveles (*i.e.* pisos), y cada uno de ellos presenta una configuración en planta distinta, con plantas bajas diáfanas, cuyos elementos estructurales constan principalmente de columnas y vigas metálicas, mientras que para el resto de los niveles se cuenta con un sistema a base de muros de carga.

Las características propias de los materiales que los componen han sido también estudiadas al detalle, con la finalidad de incorporar dichas propiedades como variables aleatorias en este trabajo, y así, observar la influencia que tienen sobre los resultados obtenidos.

6.2.3 Sobre los edificios agregados

Los edificios agregados se componen por dos o más edificios aislados, y se encuentran unidos por medio de las paredes medianeras que comparten, una práctica habitual de la época.

Lo anterior deriva en agregados de edificios que podrían incluso completar la manzana en su totalidad. En nuestro caso, se han modelado tridimensionalmente tres agregados. Dos de ellos se componen por dos edificios, mientras que el tercero consta de tres edificios, unidos entre sí.

6.2.4 El daño

Tal como lo establece el procedimiento estático no-lineal elegido (*i.e.* N2), las curvas de capacidad obtenidas del programa 3muri al ejecutar los análisis estáticos no-lineales correspondientes, son después transformadas a su formato de aceleración-desplazamiento espectrales, con la finalidad de poder ser confrontadas con el espectro de demanda sísmica en las mismas unidades. Posteriormente, se obtiene una representación bilineal, la cual se define por la rigidez inicial y los puntos de fluencia y último, que sirven también para definir, de forma simplificada, los umbrales de los estados de daño a considerar.

Los datos obtenidos permiten la generación de las denominadas curvas de fragilidad, las cuales representan la probabilidad de pertenecer o exceder a uno o varios estados de daño, y cuya lectura se lleva a cabo una vez se hace el cruce de la demanda con la capacidad, y se obtiene el punto de desempeño de la estructura.

Finalmente, el daño puede estimarse de forma global mediante un índice de daño, el cual se calcula a partir de las probabilidades obtenidas para cada uno de los estados de daño mencionados anteriormente. Lo anterior nos permite identificar los posibles daños que una estructura puede sufrir al presentarse una demanda similar.

En el caso de los análisis dinámicos, se seleccionan siete registros de aceleración del terreno compatibles con las características de la zona de estudio, los cuales se escalan posteriormente de acuerdo con los valores de *pga* previamente seleccionados. Lo anterior resulta en una serie temporal de valores de desplazamiento, cortante y aceleración, a partir de la cual se obtienen los valores máximos, permitiendo después la generación de una curva de daño, similar a las obtenidas para los análisis estáticos, a partir de la cual se hace la lectura de la probabilidad de daño de acuerdo con el parámetro de intensidad, *IM*, seleccionado.

6.3 Discusión y conclusiones

La conclusión principal de esta tesis es que el enfoque probabilista juega un papel fundamental al momento de diseñar y evaluar el daño sísmico de las estructuras. Lo anterior permite tener una visión más amplia del comportamiento de una estructura, permitiendo determinar la influencia de las diversas fuentes de incertidumbre existentes y favoreciendo la toma de decisiones. A continuación, se presentan las conclusiones relacionadas con las acciones sísmicas, los edificios aislados y los edificios agregados, así como otras más, en relación con las anteriores.

6.3.1 Sobre las acciones sísmicas

6.3.1.1 *En el análisis estático*

Una correcta caracterización del tipo de terreno existente en la zona de estudio es fundamental, con la finalidad de definir espectros de respuesta adecuados. Los estudios de microzonación permiten llevar a cabo esta tarea, no obstante, la obligada revisión y actualización de las normativas vigentes es también de suma importancia, a manera de evitar utilizar valores que se encuentran desfasados con estudios más actuales en dichas zonas, y que pueden conducir a estimar de forma incorrecta la respuesta de los edificios.

Un ejemplo claro sobre lo comentado en el párrafo anterior, son los distintos estudios de microzonación realizados para la ciudad de Barcelona (Cid, 1998; Secanell *et al.*, 1998; Irizarry *et al.*, 2003; Secanell *et al.*, 2004), a partir de los cuales se propone la existencia de dos distintos escenarios sísmicos, uno determinista y otro probabilista, para los cuales se tienen valores de referencia de aceleración pico del terreno de $0.141 g$ y $0.194 g$, respectivamente, para el distrito del Ensanche. En contraste, el valor correspondiente a la aceleración pico del terreno recomendado inicialmente por la Norma de Construcción Sismorresistente (NCSE-02, 2002) para Barcelona, era de $0.04 g$, y que se vería incrementado a $0.09 g$, a raíz de la última actualización de mapas de peligrosidad sísmica de España, en 2012 (Instituto Geográfico Nacional, 2013).

La importancia de una adecuada caracterización del tipo de terreno y la selección de una demanda acorde, queda claramente reflejada en los resultados obtenidos en este trabajo, teniendo valores e índices muy inferiores para el caso del pga propuesto inicialmente en la normativa NCSE-02, y valores considerablemente mayores para los datos provenientes de los estudios de microzonación. Lo anterior conduce a conclusiones que se basan en los valores tomados como referencia al momento de exponerlas, no obstante, es fundamental que, tanto los valores de referencia empleados, como las conclusiones que derivan de ellos, se revisen constantemente, a manera de establecer la vigencia de estos, así como la posible necesidad de que sean actualizados.

6.3.1.2 *En el análisis dinámico*

La selección de una demanda adecuada es un proceso sumamente importante, ya que la incertidumbre asociada a la misma es una de las que mayor impacto tiene en los resultados finales. A este respecto, se ha empleado la metodología del espectro condicional, CS, con la finalidad de tener acceso a una base de datos más extensa, permitiendo así, obtener los registros que mejor se adecuan a las características propias de la zona de interés.

La selección de un número suficiente y adecuado de valores de pga es fundamental para asegurar que se cubre un rango adecuado de aceleraciones del terreno, y con ello, obtener resultados relevantes que faciliten la toma de decisiones futuras.

6.3.1.3 *En el enfoque probabilista*

La incertidumbre asociada a la demanda es una de las que incide de mayor manera en la respuesta estructural. Su incorporación en los estudios de vulnerabilidad y daño sísmicos es indispensable.

La incorporación del enfoque probabilista, en lo que a la demanda corresponde, se lleva a cabo a varios niveles. Por un lado, la elección de siete registros de aceleración reales, sin escalar, pretende incorporar una variabilidad suficiente a este respecto.

Adicionalmente, la elección del número y los valores de *pga* a utilizar, incorporan un grado más de variabilidad a la demanda. Finalmente, la combinatoria entre las distintas propiedades materiales existentes, el número de sismos elegidos y el número de valores de *pga* seleccionados, permiten generar poblaciones (y muestras) suficientemente capaces de cubrir cualquiera de los distintos posibles escenarios.

6.3.2 **Sobre los edificios aislados**

6.3.2.1 *Fragilidad y daño esperado*

Los procedimientos empleados han permitido obtener, de manera satisfactoria, resultados para los distintos edificios aislados que, a su vez, permiten determinar el daño esperado para cada una de ellas ante distintas demandas.

Como era de esperarse, se observan diferencias entre los resultados de los distintos edificios. No obstante, las conclusiones que pueden obtenerse para alguno de ellos, en general, son válidas para el resto, al igual que la correlación que guardan con las variables aleatorias de interés, la cual es elevada para todas ellas, siendo el módulo de Young, E , la que presenta los valores más elevados.

Trabajos en curso ponen de manifiesto la importancia que tiene la inercia principal de los edificios (*i.e.* dirección de muros respecto a la dirección de análisis) en los resultados obtenidos. Un ejemplo que podemos mencionar, en cuanto a las estructuras analizadas en este trabajo, es el referente al edificio aislado ED-04, el cual es un edificio de esquina (*i.e.* chaflán), cuyos ejes de muros principales se encuentran rotados 45 grados con respecto a las direcciones principales de análisis (*i.e.* +X -horizontal a 0°- y +Y -vertical a 90°-), y el cual presenta algunas diferencias en sus resultados, con respecto al resto de edificios aislados.

La relación que guardan las dimensiones en planta de la estructura también está correlacionada con sus resultados, teniendo así una variación apreciable en los diversos modelos de edificios aislados, los cuales presentan configuraciones aproximadamente cuadradas (*e.g.* ED-03), rectangulares (*e.g.* ED-01 o ED-02) e incluso pentagonales (ED-04). Lo mismo sucede con los edificios agregados, los cuales podrían interpretarse como sistemas cuyas dimensiones se ven más extendidas en una o ambas de sus direcciones principales.

En lo que respecta al edificio de esquina, ED-04, los resultados e índices de daño obtenidos son, en general, inferiores que para el resto de los edificios individuales. Lo anterior nos permite inferir que, pese a su forma irregular, la distribución de elementos estructurales y mayores dimensiones en planta, favorece su respuesta estructural, sin olvidar que la dirección de los ejes de muros principales no coincide con las direcciones principales de análisis, y por ende habrían de realizarse más análisis a manera de obtener la dirección más crítica.

Es también posible observar, a partir de los resultados obtenidos para los edificios aislados, que la curva correspondiente a la dirección +X presenta un desplazamiento último considerablemente más

elevado que aquél obtenido para la dirección +Y. No obstante, en lo que se refiere al cortante basal, podemos observar que la dirección +Y presenta los valores más elevados, permitiéndonos concluir, por tanto, que la dirección +X presentará un comportamiento más dúctil que la dirección +Y, cuyo comportamiento habría de interpretarse como frágil.

6.3.2.2 *Coherencia análisis estático y dinámico*

Los resultados obtenidos para los edificios aislados tanto por medio de análisis estáticos no-lineales, como por análisis dinámicos, ha permitido realizar su comparación a manera de determinar la coherencia y validez de estos.

Se observa que, para valores de pga inferiores, los resultados de los métodos estáticos no-lineales tiende a sobrestimar el daño asociado a ellos, mientras que, para valores superiores de pga ocurre lo contrario, los resultados de los métodos estáticos no-lineales subestiman el daño asociado a los mismos. Lo anterior se corresponde con aquello observado en el trabajo González-Drigo *et al.* (2017), en el cual se utilizaron un número mayor de valores de pga , que permiten observar con mayor claridad este fenómeno.

6.3.2.3 *El enfoque probabilista*

El enfoque probabilista en la estimación de los daños de los edificios aislados permite, de forma sencilla pero completa, determinar los posibles rangos de daño que pueden presentar estas estructuras ante determinadas demandas, mediante la incorporación de la variabilidad de las propiedades materiales en los modelos, lo cual incide directamente en sus resultados, permitiendo obtener una visión más amplia acerca del estado de dicha estructura, así como la evolución de sus daños en términos generales.

Su empleo y viabilidad, en términos de recursos computacionales y tiempo, es considerable, no obstante, mediante el uso de metodologías actuales y recursos de cómputo modernos, esta tarea se simplifica y agiliza enormemente.

6.3.3 **Sobre los edificios agregados**

6.3.3.1 *Fragilidad y daño esperado*

Como era de esperarse, también se observan diferencias entre los resultados de los distintos agregados. No obstante, las conclusiones que pueden obtenerse para alguno de ellos, en general, son válidas para el resto, al igual que la correlación que guardan con las variables aleatorias de interés, la cual es elevada para todas ellas, siendo el módulo de Young, E , la que presenta los valores más elevados.

Tal como se mencionó para los edificios aislados, la selección de una demanda adecuada, considerando su variabilidad, ha permitido obtener una serie de resultados que esbozan de forma general los rangos de respuesta esperables para estas estructuras.

El único inconveniente al analizar estas estructuras, como ya se ha comentado, fue la imposibilidad de realizar todos los análisis dinámicos debido a las limitantes del programa por el uso de modelos excesivamente complejos.

En general, los resultados obtenidos para los edificios agregados presentan índices de daño inferiores que aquellos obtenidos para los edificios individuales, lo cual se puede traducir como una mejora en el comportamiento estructural del sistema a medida que éste se despliega en una mayor superficie. Esto se

ve reflejado principalmente en la dirección en la que los agregados ven incrementadas sus dimensiones, es decir, la dirección X de análisis.

Tal como sucede con los edificios aislados, también es posible observar los efectos de la direccionalidad de muros con respecto a las direcciones de análisis principales, en particular en el agregado AG-03, que se compone por el edificio ED-04, cuyos muros se encuentran girados 45° con respecto a los ejes principales de análisis.

De manera análoga a los edificios aislados, se observa que, para los edificios agregados, la curva correspondiente a la dirección +X presenta un desplazamiento último considerablemente más elevado que aquél obtenido para la dirección +Y. No obstante, en lo que se refiere al cortante basal, podemos observar que la dirección +Y presenta los valores más elevados, permitiéndonos concluir, por tanto, que la dirección +X presentará un comportamiento más dúctil que la dirección +Y, cuyo comportamiento habría de interpretarse como frágil.

Finalmente, se puede concluir que, en base a los resultados e índices de daño obtenidos para las distintas configuraciones estructurales, los edificios de la ciudad de Barcelona pueden ser considerados sísmicamente seguros. No obstante, se advierte la posible presencia de daños no despreciables en caso de llegar a valores de aceleración del terreno como los estudiados en este trabajo, por lo que, aunado a otros factores que caracterizan este tipo de estructuras, como lo son la edad de una gran cantidad de ellos, se debe mantener un monitoreo constante sobre las condiciones de los mismos.

6.3.3.2 Coherencia análisis estático y dinámico

Debido a la obtención, únicamente parcial, de resultados provenientes del análisis dinámico, no ha sido posible determinar, en su completitud, la coherencia de los resultados dinámicos con respecto de los obtenidos a través de los análisis estáticos. Sí que es posible observar que, para los resultados que han podido obtenerse, las conclusiones obtenidas para los edificios aislados se corroboran también para los edificios agregados.

6.3.3.3 El enfoque probabilista

Tal como se mencionó para los edificios aislados, la incorporación de variables capaces de captar las diversas fuentes de incertidumbre que presenta cualquier modelo es indispensable para la correcta evaluación de los mismos.

El diseño adecuado de las muestras, y el uso de técnicas adecuadas es también una tarea sumamente importante, a fin de asegurar resultados adecuados y representativos, optimizando el uso de recursos y tiempo disponibles para ello.

6.3.4 Sobre otros aspectos adicionales

6.3.4.1 Sobre la selección de metodologías adecuadas

En lo que respecta a la evaluación estructural, el eje fundamental de las filosofías de diseño vigentes se enfoca en el estudio del desempeño de una estructura. Lo anterior puede llevarse a cabo, ya sea, mediante el uso de técnicas avanzadas y análisis detallados, o a través de técnicas simplificadas que permiten reducir los altos recursos computacionales y de tiempo de las primeras, sin sacrificar, de forma considerable, la fiabilidad y calidad de sus resultados.

Métodos simplificados

Dentro de los posibles tipos de análisis simplificados que pueden llevarse a cabo para la obtención y evaluación de la respuesta estructural, se encuentran los análisis estáticos no lineales, los cuales permiten calcular el desempeño de una estructura al confrontar la capacidad de esta con la demanda ante la cual se puede ver sometida, obteniendo así el denominado punto de capacidad por demanda o punto de desempeño.

Existe una gran diversidad de procedimientos estáticos no lineales, los cuales han evolucionado durante las últimas décadas, existiendo así algunos que se adaptan mejor a ciertas tipologías constructivas, que consideran la participación de modos superiores, la regularidad de las estructuras, etc.

La elección de uno u otro procedimiento estático no lineal incidirá directamente en el proceso que conlleva la evaluación de la estructura, así como en los resultados que se obtienen de la misma, y es por ello por lo que ha de llevarse a cabo rigurosamente, atendiendo las necesidades reales del proyecto en cuestión y tomando en cuenta los distintos pros y contras de cada uno de dichos procedimientos.

Lo anterior se debe, principalmente, a que cada procedimiento ha sido elaborado y calibrado para distintas tipologías estructurales, obteniendo de distintas maneras, por ejemplo, los sistemas equivalentes de *IGDL*, las representaciones bilineales, el cruce con el espectro de demanda, entre otras. Mayores detalles y comparativas pueden encontrarse en el trabajo de González-Drigo *et al.* (2017).

Métodos avanzados

A pesar de que el uso de métodos avanzados (*e.g.* análisis dinámicos incrementales) no es común en la evaluación de estructuras que podríamos considerar de uso ‘cotidiano’, sí que tiene un papel fundamental para poder contrastar resultados y, con ello, asegurar que las metodologías simplificadas elegidas son adecuadas para la evaluación de estructuras.

En el trabajo de González-Drigo *et al.* (2017) puede observarse una comparativa exhaustiva entre métodos simplificados y avanzados, llegando a algunas conclusiones que a continuación se resumen:

- Las metodologías simplificadas son diseñadas y calibradas para tipologías estructurales específicas, por lo tanto, sólo han de emplearse aquellas que realmente se correspondan con los edificios a analizar.
- Los procedimientos estáticos no lineales evolucionan y se adaptan con el fin mantener su vigencia y aplicabilidad para un mayor número de tipologías constructivas, considerar la participación de modos superiores, irregularidades en estructuras, etc.
- Las metodologías simplificadas suelen sobreestimar ligeramente el daño esperado en las estructuras, quedando del lado de la seguridad.

El uso de metodologías avanzadas es una opción que, conforme los diversos avances computacionales y de metodologías evolucionan, se vuelve más cotidiana para el estudio de estructuras comunes.

6.3.4.2 Sobre la selección del punto último

En lo que respecta a la capacidad, la selección del punto último es, probablemente, junto con la selección del método estático no lineal a utilizar, una de las tareas que más inciden de forma directa en el resto de los cálculos y resultados a obtener.

El empleo de metodologías ampliamente utilizadas y contrastadas por diversos autores es esencial. Su aplicación puede ser de tipo general (*i.e.* decaimiento del 20% de cortante basal máximo), o más

específico, si se conocen datos sobre la tipología analizada y se calibran adecuadamente (*i.e.* modelo paramétrico - Pujades *et al.* (2015)).

En este trabajo, se ha empleado un criterio de valor mínimo (*i.e.* primero en ocurrir) que combina las dos metodologías explicadas en el párrafo anterior, permitiendo con ello la obtención del punto último de las diversas curvas de capacidad obtenidas para cada uno de los edificios y agregados de edificios analizados.

6.3.4.3 *Sobre la definición de los estados e índice de daño*

La elección de los estados de daño atiende principalmente al tipo de datos (*i.e.* análisis) que se tengan disponibles, siendo de uso común, aquellos que emplean los puntos (*i.e.* desplazamientos) de fluencia y último en su definición. En estos casos, la adecuada elección del punto último de corte de la curva de capacidad incidirá directamente en aquellos estados de daño que se encuentren definidos a partir de dicho valor.

Adicionalmente, la variabilidad de los valores utilizados para la definición de los estados de daño repercutirá a su vez en la variabilidad de los mismos, reflejándose, directamente, en la forma que tomarán las curvas de fragilidad asociadas a cada uno de estos estados de daño, así como cualquier otro indicador que dependa de ello. La evolución del estado (*i.e.* daño) de una estructura queda, mayor o menormente, detallado en función del número de estados de daño utilizados para dicho propósito.

Los resultados obtenidos asociados a las representaciones bilineales de las distintas estructuras nos son de gran utilidad, ya que sirven de indicadores acerca de los rangos de valores esperables para ambos puntos, de fluencia y último, así como de la desviación estándar asociada. Lo anterior, permite, por tanto, emplear dichos datos, tanto en la definición de estados de daño, como en la creación de las curvas de fragilidad, ya que, en ocasiones, al no tenerse información específica de ciertas tipologías, se establecen rangos y desviaciones de forma genérica, que pueden ser no del todo adecuados para la tipología estructural estudiada.

En lo que respecta al índice de daño empleado en este trabajo, su objetivo principal es recoger, de forma global o general, la probabilidad de daño de la estructura, pero siendo incapaz de determinar cuáles son los elementos o conjunto de elementos estructurales con mayor daño, ni la localización de estos dentro de la estructura.

Lo anterior puede traducirse en subestimaciones o sobreestimaciones del daño global la estructura, al no poder identificar su origen u orígenes principales.

Existen diversos programas de cálculo estructural que incorporan, de forma simplificada/automática, el cálculo de otros índices o indicadores de daño, con lo cual, se puede, además, llevar a cabo una estimación del daño a nivel local.

6.3.4.4 *Sobre el modelado tridimensional*

En este trabajo se han modelado diversos edificios, tanto de manera individual, como de forma agregada, permitiendo representar algunas configuraciones comunes que se pueden observar en cualquier manzana. El modelado de los edificios se lleva a cabo con el programa de cálculo estructural Tremuri (3muri), que, a su vez, permite la realización de diversos tipos de análisis estructural (*i.e.* modal, pushover o dinámico).

Durante la realización de esta tesis, el programa 3muri, tal como sucede con otros programas, ha sufrido una serie de actualizaciones, una de las cuales, requería la modelación de las estructuras desde

cero, puesto que los modelos anteriores no eran compatibles. A este respecto, y con la ayuda y experiencia de nuestra colega Chiara Ferrero, se hizo la migración de los modelos existentes, así como la creación de algunos nuevos en base a los que se tenían inicialmente.

Calidad de la información

Es primordial que la información recolectada referente, tanto a las estructuras (*e.g.* materiales, geometría, técnicas, calidad de mano de obra, etc.), como a la demanda a la que se verán sometidas (*e.g.* tipo de terreno, aceleración del terreno, parámetros espectrales, etc.), sea original y lo más específica posible, para así representarla (*i.e.* modelarla) de manera adecuada y completa. El grado de calidad y representatividad de la información introducida en el modelo incidirá directamente en los resultados obtenidos. La información puede ser obtenida y contrastada a partir de diversos medios, tales como: archivos históricos, revisiones in-situ de edificios existentes, referencias bibliográficas contemporáneas, tratados de construcción, pruebas de laboratorio disponibles, y juicio de expertos en la materia.

El proceso de modelado

El modelado de una estructura en un programa de cálculo estructural para este propósito conlleva tener una serie de datos previamente preparados, así como seguir una serie de pasos bien estipulados para asegurar la correcta introducción de toda la información que definirá el modelo final.

A pesar de que el programa 3muri es un software comercial común y de tener diversas similitudes con otros programas del mismo tipo, requiere una curva de aprendizaje no despreciable, aunada a la constante actualización de versiones que añaden una cierta complejidad al proceso.

No obstante, teniendo una geometría correctamente definida al detalle, así como los datos correspondientes a las propiedades mecánicas de los materiales, forjados, aperturas, etc., se asegura que la calidad del modelo es la adecuada.

Una vez obtenido y verificado el modelo inicial, el archivo resultante puede ser manipulado, a manera de generar cualquier variación requerida para los análisis de tipo probabilista. Lo anterior se llevó a cabo mediante el uso de rutinas MATLAB creadas para este propósito, las cuales agilizan enormemente la consecución de estos objetivos.

6.3.4.5 Sobre las variables aleatorias

La selección adecuada de las variables aleatorias, que puedan ser de interés para los distintos análisis a realizarse, es primordial para poder esbozar conclusiones adecuadas y significativas sobre los resultados de estas y su correlación, tanto entre ellas, como con el resto de los datos existentes.

Las propiedades mecánicas de los materiales más relevantes han sido seleccionadas como variables aleatorias para este trabajo, permitiendo, con ello, generar un conjunto de propiedades (*i.e.* población), que contiene los límites superiores e inferiores, así como valores medios y distribuciones tipo de la tipología de interés.

La caracterización de esta información conlleva, también, el empleo de distintas fuentes correspondientes a la época constructiva de interés, las cuales incluyen archivos históricos, referencias bibliográficas, manuales de construcción, visitas in situ, pruebas de laboratorios y el juicio de expertos, entre otros. En caso de que esta información no estuviese disponible, sería necesario identificar tipologías, épocas y localizaciones afines, a manera de poder extrapolar datos de utilidad.

6.3.4.6 Sobre el uso de herramientas de cómputo

El empleo de técnicas modernas y recursos computacionales es de gran ventaja para trabajos como el realizado en esta tesis. En particular, estas herramientas han permitido agilizar tanto el pre-proceso y post-proceso de la información, así como la ejecución misma de los diversos análisis presentados en este trabajo.

Algunos ejemplos y detalles de procesos que se han optimizado y agilizado en este trabajo gracias al uso de programas (*i.e.* MATLAB) y metodologías de cómputo actuales (*i.e.* cómputo en paralelo) son:

- Generación de archivos para diversos análisis
 - o Sustitución de propiedades materiales iniciales por aquéllas generadas para la población de este estudio.
 - o Generación de archivos para cada estructura de la población, para distintas direcciones, sentidos, *pga*'s y/o registros sísmicos empleados.
- Ejecución de análisis estructurales múltiples
 - o Cálculo de análisis con el programa 3muri de forma paralela, evitando así la ejecución en lotes (*i.e.* batch).
 - o Ejecución de cálculos para un rango de valores de *pga* mucho más amplio que los mencionados en los resultados principales.

A grandes rasgos, podemos asegurar que, con el empleo de estas herramientas y cálculos avanzados, cada día se reducen más las limitantes relacionadas con recursos computacionales y de tiempo que han marcado (*i.e.* limitado) la evolución y uso común de diversos métodos y análisis, y que, tuvieron como resultante, la creación de metodologías simplificadas, a fin de poder contrarrestar dichas limitantes.

6.4 Recomendaciones y líneas de investigación futuras

La constante evolución y desarrollo de metodologías y herramientas, capaces de solucionar aquellas necesidades intrínsecas de los diversos procesos que conlleva la evaluación de estructuras, permite concebir mejoras y soluciones que, si bien quizás no son del todo posibles actualmente, llegarán a serlo en un determinado momento. A este respecto, se proponen algunas de ellas, a manera de dar continuidad a los objetivos planteados en este trabajo.

6.4.1 Sobre las acciones sísmicas

A pesar del uso de técnicas avanzadas en la selección de acelerogramas compatibles de las diversas bases de datos disponibles para este propósito, la incertidumbre asociada a las acciones sísmicas sigue siendo un aspecto que incide de forma directa e importante, tanto en los procedimientos empleados, como en los resultados obtenidos.

Además de la incorporación de bases de datos más grandes, a manera de tener una completitud mayor sobre los fenómenos sísmicos asociados a una zona en particular, también se proponen estudios de microzonación en áreas que no cuenten aún con ellos, a manera de poder caracterizar de mejor manera los distintos tipos de terreno. Adicionalmente, y haciendo uso de las técnicas actuales más avanzadas en otros ámbitos, se propone la incorporación de técnicas de Machine Learning, a fin de poder generar y simular acciones sísmicas ad-hoc, basadas en modelos entrenados con la información actualmente disponible.

6.4.2 Sobre el estudio de edificios aislados

La incorporación de varias fuentes de incertidumbre en el análisis de edificios es, además de necesaria, algo que puede llevarse a cabo en muchos casos de forma sencilla, mientras se cuente con la información

necesaria. Se propone incorporar al estudio de edificios algunas variables que se consideren fuentes de incertidumbre importante. Por mencionar algunas, tenemos: cargas vivas y muertas, amortiguamiento viscoso, longitudes de soporte de elementos estructurales (*i.e.* dinteles y forjados), espesores de muros, variación en las dimensiones geométricas de otros elementos estructurales, entre otras.

A nivel de procedimiento, se pueden mencionar otras propuestas, tales como:

- El uso de otros programas de análisis estructural, a fin de poder contrastar los resultados obtenidos en unos y otros.
- La incorporación de la componente de direccionalidad en los análisis, girando la estructura.
- La implementación de otros tipos de análisis pushover, como por ejemplo los adaptativos.
- El diseño de múltiples tamaños de muestras, atendiendo a diversos valores de precisión.
- La definición de los estados de daño basados en otros parámetros distintos a los puntos de fluencia y último.
- La incorporación de índices de daño adicionales.

Adicionalmente, otros temas actuales que generan posibles líneas de investigación de interés serían:

- El estudio de los efectos que tiene el vaciado de edificios sobre edificios aledaños y agregados existentes, y que posteriormente contienen estructuras cuya tipología no coincide con la que existía inicialmente, las cuales sólo conservan las fachadas modernistas a fin de mantener la estética de la ciudad.
- El estudio de agregados heterogéneos (*i.e.* tipologías y materiales distintos).
- Estudios de la vulnerabilidad no-estructural de elementos no arquitectónicos presentes en los edificios existentes.
- El modelado de manzanas completas.

6.4.3 Sobre el estudio de edificios agregados

Además de las propuestas mencionadas en el apartado correspondiente a los edificios aislados, para el caso de edificios agregados, y dadas las limitantes en los análisis dinámicos de los edificios agregados, observadas durante el desarrollo de esta tesis, se proponen dos tipos de acciones. La primera, pretende, a nivel software, solventar el problema de la complejidad asociada con el número de nudos y barras, así como el número de puntos que definen la acción sísmica en los análisis dinámicos y, la segunda, que pretende sustituir las estructuras aledañas por un elemento, o conjunto de elementos, capaces de simular su comportamiento e influencia sobre la estructura analizada, a manera de simplificar y reducir los modelos.

Adicionalmente, también se propone el uso de metodologías que permitan analizar las estructuras de una manera más focalizada y menos global, permitiendo con ello un entendimiento más adecuado sobre la respuesta de los elementos que la componen de manera más focalizada.

6.5 Reflexión final

Hoy en día, la tipología de edificios de mampostería no-reforzada, está presente en un gran número de ciudades, manteniendo sus condiciones de servicio. Por tanto, estudios como el presentado aquí, pretenden ayudar a los técnicos y autoridades involucradas en la toma de decisiones referentes a tareas de mantenimiento, prevención y/o reconstrucción, con el objetivo último de que las comunidades estén preparadas para afrontar de la mejor manera cualquier desastre.

El empleo de metodologías avanzadas y enfoques probabilistas, son cada día más cotidianas en el análisis de estructuras ‘normales’, no obstante, es deber del ingeniero tener conocimiento de ellas, a fin de facilitar su incorporación.

El uso de herramientas que permitan la incorporación de las metodologías y enfoques mencionados anteriormente, es una necesidad fundamental a día de hoy, con el fin de optimizar recursos y tiempo, al mismo tiempo que se obtienen resultados de calidad.

LA PLANTA DE LAS MANZANAS 51 ^MN 52 Y 52 ^MN 53 QUE TIENE
FOMENTO del ENSANCHE de BARCELONA

Escala de 1 por 1250.



**REFERENCIAS
BIBLIOGRÁFICAS**

Referencias Bibliográficas

- Abrahamson, N. A., & Al Atik, L. (2010). *Scenario Spectra for Design Ground Motions and Risk Calculation*. Paper presented at the 9th US National and 10th Canadian Conference on Earthquake Engineering, Toronto, Canada.
- Agustí, D. (2008). *Historia breve de Barcelona*. Madrid, España: Sílex.
- Agustí, D. (2014). *Historia de Cataluña*. España: Silonia.
- Allen, C., Masia, M. J., Derakhshan, H., Griffith, M. C., Dizhur, D., & Ingham, J. M. (2013). *What ductility value should be used when assessing unreinforced masonry buildings?* Paper presented at the 2013 NZSEE Conference, Wellington.
- Ambrasseys, N., Simpson, K., & Bommer, J. (1996). Prediction of horizontal response spectra in Europe. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 25, 371-400.
- Arredondo, F. (1980). *Estudio de Materiales. VI.-Cerámica y Vidrio* (9th ed.). Madrid: Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y el Cemento.
- Arxi Històric de la Ciutat de Barcelona (Cartographer). (1860). Plano de Barcelona y sus alrededores. Proyecto de Ensanche de la ciudad y su puerto.
- ATC-13. (1985). *Earthquake Damage Evaluation Data for California*. Redwood City, California, USA
- ATC-40. (1996a). *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings*. (SSC-96-01). California, U.S.A.: California Seismic Safety Commission
- ATC-40. (1996b). *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings*. (SSC-96-01). California, U.S.A.: California Seismic Safety Commission
- Bal, I. E., Crowley, H., Pinho, R., & Gülay, F. G. (2008). Detailed assessment of structural characteristics of Turkish RC building stock for loss assessment models. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 28(10-11), 914-932.
- Barbat, A. (1982). *Cálculo sísmico de estructuras*. Barcelona: Editores Técnicos Asociados.
- Barbat, A., Hurtado, J. E., Orosco, L., & Canas, J. A. (1995). Tendencias actuales en la definición de la acción sísmica. *Física de la Tierra*, 7, 297-326.
- Barbat, A., Oller, S., & Vielma, J. C. (2005). *Cálculo y diseño sismorresistente de edificios: aplicación de la norma NCSE-02*. Barcelona, España: Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería
- Barbat, A., Orosco, L., Hurtado, J. E., & Galindo, M. (1994). *Definición de la acción sísmica*. Spain: CIMNE
- Barbat, A., Vargas, Y., Pujades, L. G., & Hurtado, J. E. (2012). *Probabilistic assessment of the seismic damage in reinforced concrete buildings*. Paper presented at the Computational Civil Engineering - CCE2012 43 International Symposium, Iasi, Romania.
- Bassegoda Piniés, S. (1920). *Tratado práctico de construcción moderna*. Barcelona.
- Benavent, P. (1981). *Cómo Debo Construir* (9a ed.). Barcelona, España: BOSCH, Casa Editorial.
- Bento, R., Falcão, A. P., Catulo, R., & Milosevic, J. (2016). Seismic Assessment of Pombalino Buildings. In H. Cruz, J. Saporiti, A. Campos, P. Candeias, N. Ruggieri, & J. Catarino (Eds.), *Historical Earthquake-Resistant Timber Framing in the Mediterranean Area*. Switzerland: Springer International Publisher.
- Busquets, J. (2004). *Barcelona. La construcción urbanística de una ciudad compacta*. Barcelona.
- C.S.LL.PP. (2008). Decreto Ministeriale del 14 gennaio 2008. Nuove norme tecniche per le costruzioni. In: Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana 4 febbraio 2008.
- Calpena, E. (2015). *Barcelona, una biografía*. Barcelona, España: Destino.
- Calvi, G. M. (1999). A displacement-based approach for vulnerability evaluation of classes of buildings. *Journal of Earthquake Engineering*, 3(3), 411-438.
- Casarotti, C., Monteiro, R., & Pinho, R. (2009). Verification of spectral reduction factors for seismic assesment of bridges. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 42(2).
- Cattari, S., & Lagomarsino, S. (2013). Seismic assessment of mixed masonry-reinforced concrete buildings by non-linear static analyses. *Earthquakes and Structures*, 4(3), 241-264.

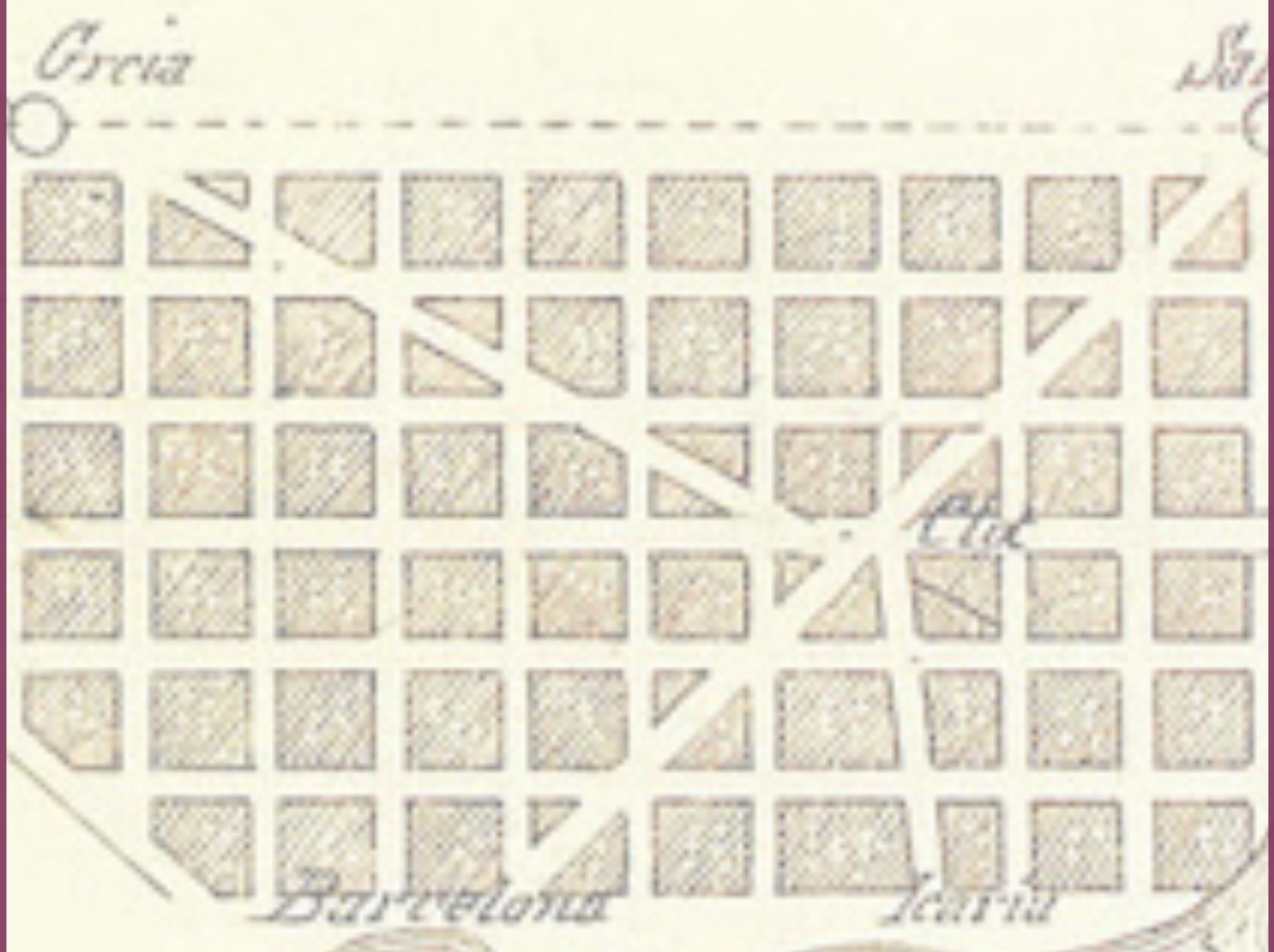
- CEN. (2004). Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 1: general rules, seismic actions and rules for buildings. In. Brussels: EN 1998-1:2004 Comité Européen de Normalisation.
- Chopra, A. K., & Goel, R. K. (1999). *Capacity Demand Diagram Method for Estimating Seismic Deformation of Inelastic Structures: SDOF System*. Berkeley, California: Pacific Earthquake Engineering Research Center
- Chowdhury, I., & Dasgupta, S. P. (2003). Computation of Rayleigh Damping Coefficients for Large Systems. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 8.
- Cid, J. (1998). *Zonación sísmica de la ciudad de Barcelona basada en métodos de simulación numérica de efectos locales*. (PhD.). Universitat Politècnica de Catalunya, UPC, Barcelona, Spain.
- Clough, R., & Penzien, J. (2003). *Dynamics of Structures*. Berkeley, California: Computers and Structures, Inc.
- Cochran, W. G. (1977). *Sampling Techniques*. New York, USA: John Wiley & Sons.
- D'Ayala, D., Meslem, A., Vamvatsikos, D., Porter, K., & Rosseto, T. (2015). *Guidelines for Analytical Vulnerability Assessment of Low/Mid-Rise Buildings*.
- de Almeida e Fernandes Bhatt, C. A. (2011). *Seismic Assessment of Existing Buildings Using Nonlinear Static Procedures (NSPs) - A New 3d Pushover Procedure*. (PhD in Civil Engineering). Universidade Técnica de Lisboa. Instituto Superior Técnico,
- De Luca, F., Vamvatsikos, D., & Iervolino, I. (2013a). Improving Static Pushover Analysis by Optimal Bilinear Fitting of Capacity Curves. In M. Papadrakis et al. (Ed.), *Computational Methods in Earthquake Engineering* (Vol. 2, pp. 273-295): Springer Netherlands.
- De Luca, F., Vamvatsikos, D., & Iervolino, I. (2013b). *Near-optimal piecewise linear fits of static pushover capacity curves for equivalent SDOF analysis*. Retrieved from 10.1002/eqe.2225
- Dolce, M., Kappos, A., Masi, A., Penelis, G., & Vona, M. (2006). Vulnerability assessment and earthquake damage scenarios of the building stock of Potenza (Southern Italy) using Italian and Greek methodologies. *Engineering Structures*, 28, 357–371.
- Dolšek, M. (2008). *PBEE Toolbox - Examples of application*. Ljubljana, Slovenia.: University of Ljubljana, Faculty of Civil and Geodetic Engineering
- Drougkas, A., Roca, P., & Molins, C. (2015). Numerical prediction of the behavior, strength and elasticity of masonry in compression. *Engineering Structures*(90), 15-28.
- Drougkas, A., Roca, P., & Molins, C. (2016). Compressive strength and elasticity of pure lime mortar masonry. *Materials and Structures*(49), 983-999.
- Erduran, E. (2012). Evaluation of Rayleigh damping and its influence on engineering demand parameter estimates. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 41, 1905-1919.
- Esselborn, C. (1928). *Tratado general de construcción*. Barcelona.
- Eurocode-8-1. (2004). Design of Structures for Earthquake Resistance. Part 1: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings. In: Comité Européen de Normalisation.
- Eurocode-8-3. (2005). Design of Structures for Earthquake Resistance. Part 3: Assessment and Retrofitting of Buildings. In: Comité Européen de Normalisation.
- Fajfar, P. (1999). Capacity Spectrum Method Based on Inelastic Demand Spectra. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*(28), 979-993.
- Fajfar, P. (2000). A Nonlinear Analysis Method for Performance Based Seismic Design. *Earthquake Spectra*, 16(3), 573-592.
- Fajfar, P., Dolšek, M., Marušić, D., & Peruš, I. (2004). *Extension of the N2 method - Asymmetric buildings, infilled frames and incremental N2*. Paper presented at the Performance-based seismic design concepts and implementation, Bled, Slovenia.
- Fajfar, P., & Fischinger, M. (1987). Non-linear seismic analysis of RC buildings: implications of a case study. *European Earthquake Engineering*, 1, 31-43.
- Fajfar, P., & Fischinger, M. (1988, August 2-9, 1988). *N2 - A method for non-linear seismic analysis of regular buildings*. Paper presented at the Ninth World Conference on Earthquake Engineering, Tokyo-Kyoto, Japan.

- Fajfar, P., & Gašperšič, P. (1996). The N2 method for the seismic damage analysis of RC buildings. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 25, 31-46.
- Fardis, M. N. (2009). *Seismic Design, Assessment and Retrofitting of Concrete Buildings based on EN-Eurocode 8*. New York: Springer.
- FEMA/NIBS. (1999). *HAZUS'99 technical manual: Earthquake loss estimation methodology*. Washington DC
- Figueras, L., Guardia, M., García-Fuentes, J. M., Graus, R., Paricio, A., & Roselló, M. (2010). *El Ensanche: Génesis y Construcción*: Lunwerg.
- Freeman, S. A. (1998). *The Capacity Spectrum Method as a Tool for Seismic Design*. Paper presented at the Eleventh European Conference on Earthquake Engineering, Paris, France.
- Freeman, S. A. (2004). Review of the Development of the Capacity Spectrum Method. *ISET Journal of Earthquake Technology*, 41(1), 1-13.
- Galasco, A., Lagomarsino, S., & Penna, A. (2002). TREMURI Program: Seismic Analyser of 3D Masonry Building. University of Genoa.
- Gambarotta, L., & Lagomarsino, S. (1997). Damage models for the seismic response of brick masonry shear walls, Part II: the continuum model and its applications. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 26.
- Gašperšič, P., Fajfar, P., & Fischinger, M. (1992). *An approximate method for seismic damage analysis of buildings*. Paper presented at the Tenth World Conference on Earthquake Engineering, Rotterdam, Netherlands.
- Ger y Lobe, F. (1898). *Tratado de construcción civil*. Badajoz: La Minerva Extremeña.
- Gimeno, E. (1994). El Concurso Municipal de Proyectos de 1859. In *Cerdà. Ciudad y territorio. Una visión de futuro*. Barcelona: Editorial Electa y Fundación Catalana para la Recerca.
- Giovinazzi, S., & Lagomarsino, S. (2002). *WP04: guidelines for the implementation of the I level methodology for the vulnerability assessment of current buildings*. Genoa, Italy
- González-Drigo, R., Avila-Haro, J., Barbat, A., Pujades, L., Vargas, Y., Lagomarsino, S., & Cattari, S. (2015). Modernist URM buildings of Barcelona. Seismic Vulnerability and Risk Assessment. *International Journal of Architectural Heritage*, 9(3), 214-230. doi:10.1080/15583058.2013.766779
- González-Drigo, R., Avila-Haro, J., Pujades, L. G., & Barbat, A. (2017). Non-linear static procedures applied to high-rise residential URM buildings. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 15, 149-174. doi:<https://doi.org/10.1007/s10518-016-9951-2>
- Grünthal, G. (1993). *The European Macro-seismic Scale 1992: (up-dated MSK-scale)*. Luxembourg: Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie
- Grünthal, G. (1998). *European Macroseismic Scale 1998 (EMS-98)*. Luxembourg: Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie
- Grupo 2C. (2009). *La Barcelona de Cerdà*: Flor del Viento Ediciones.
- Hall, J. F. (2006). Problems encountered from the use (or misuse) of Rayleigh damping. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*(35), 525-545.
- Hamburg, M. (1985). *Basic statistics: A modern approach*. San Diego, USA.
- Hancock, J., Bommer, J., & Stafford, P. J. (2008). Numbers of scaled and matched accelerograms required for inelastic dynamic analysis. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 37, 1585-1607.
- Harris, H. A. (1986). *Masonry: Materials, Design, Construction and Maintenance*. Paper presented at the Masonry: Materials, Design, Construction and Maintenance, New Orleans, L.A.
- HAZUS. (2012). *HAZUS-MH 2.1 Technical Manual. Earthquake Model*. Washington, D.C., USA
- Hendry, A. W. (1990). *Structural Masonry*. Hong Kong: MacMillan Education LTD.
- Hendry, A. W., Sinha, B. P., & Davies, S. R. (1987). *Design of Masonry Structures* (3rd ed.): E & FN Spon.
- Hill, M. P., & Rosseto, T. (2008). *Do existing damage scales meet the needs of seismic loss estimation?* Paper presented at the The 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China.

- Institut d'Estadística de Catalunya, I. (2011). Censo de edificios. Retrieved 01-11-2020
- Institut d'Estadística de Catalunya, I. (2019a). El municipio en cifras: Barcelonés. Retrieved 01-11-2020
- Institut d'Estadística de Catalunya, I. (2019b). Padrón de habitantes: Ampliación de resultados de la población extranjera. Retrieved 01-11-2020
- Instituto Geográfico Nacional. (2013). *Actualización de Mapas de Peligrosidad Sísmica en España 2012*. (ISBN 978-84-416-2685-0). Madrid: Editorial Centro Nacional de Información Geográfica
- Irizarry, J. (2004). *An Advanced Approach to Seismic Risk Assessment. Application to the Cultural Heritage and the Urban System of Barcelona*. (PhD.). Universitat Politècnica de Catalunya, UPC, Barcelona, Spain.
- Irizarry, J., Goula, X., & Susagna, T. (2003). *Analytical Formulation for the Elastic Acceleration-Displacement Response Spectra Adapted to Barcelona Soil Conditions*. Barcelona, Spain: Institut Cartogràfic de Catalunya
- Jayaram, N., Lin, T., & Baker, J. W. (2011). A Computationally Efficient Ground Motion Selection Algorithm for Matching a Target Response Spectrum Mean and Variance. *Earthquake Spectra*, 27(3), 797-815.
- Jones, T. (1996). *The Basics of Brick Kiln Technology*. Braunschweig/Wiesbaden, Germany: Vieweg & Sohn, Friedr.
- Kalkan, E., & Kunnath, S. K. (2008). Assessment of current nonlinear static procedures for seismic evaluation of buildings. *Engineering Structures*, 29, 305-316.
- Kappos, A. (1997). Seismic damage indices for RC buildings: evaluation of concepts and procedures. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 1, 78-87 doi:doi: 10.1002/pse.2260010113
- Kappos, A., Panagopoulos, G., Panagiotopoulos, C., & Penelis, G. (2006). A hybrid method for the vulnerability assessment of R/C and URM buildings. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 4, 391-413.
- Kappos, A., & Papanikolaou, V. K. (2016). Nonlinear Dynamic Analysis of Masonry Buildings and Definition of Seismic Damage States. *The Open Construction and Building Technology Journal*, 10(2), 192-209.
- Kareem, A., & Gurley, K. (1996). Damping in structures: Its evaluation and treatment of uncertainty. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*(59), 131-157.
- Keneddy, R. P., Cornel, C. A., Campbell, R. L., Kaplan, S., & Perla, H. F. (1980). Probabilistic Seismic Safety Study of an Existing Nuclear Power Plant. *Nuclear Engineering and Design*, 59(2), 315-338.
- Kish, L. (1965). *Survey Sampling*. New York, USA: John Wiley & Sons.
- Krawinkler, H. (1999). *Challenges and progress in Performance-Based Earthquake Engineering*. Paper presented at the International Seminar on Seismic Engineering for Tomorrow - In Honor of Professor Hiroshi Akiyama, Tokyo, Japan.
- Kreslin, M., & Fajfar, P. (2012). The extended N2 method considering higher mode effects in both plan and elevation. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 10, 695-715.
- Lagomarsino, S., & Cattari, S. (2015a). PERPETUATE guidelines for seismic performance-based assessment of cultural heritage masonry structures. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 13(1), 13-47.
- Lagomarsino, S., & Cattari, S. (2015b). Seismic Performance of Historical Masonry Structures Through Pushover and Nonlinear Dynamic Analyses. In A. Ansal (Ed.), *Perspectives on European Earthquake Engineering and Seismology* (Vol. 2): Springer International Publishing.
- Lagomarsino, S., Galasco, A., & Penna, A. (2002). *Pushover and dynamic analysis of URM buildings by means of a non-linear macro-element model*. Bucharest: RISK-UE project
- Lagomarsino, S., & Giovinazzi, S. (2006). Macroseismic and mechanical models for the vulnerability and damage assessment of current buildings. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 4, 415-443.

- Lagomarsino, S., Penna, A., Galasco, A., & Cattari, S. (2013). TREMURI program: An equivalent frame model for the nonlinear seismic analysis of masonry buildings. *Engineering Structures*, 56, 1787-1799.
- Lahuerta, J. (1948). El tamaño de los ladrillos. *Revista Nacional de Arquitectura*(80), 307-311.
- Lahuerta, J., & Rodríguez, L. F. (1962). *Muros de Fábrica de Ladrillo. Normas y estudios extranjeros para su proyecto y ejecución*. Madrid: Ministerio de la Vivienda. Secretaría General Técnica.
- Lantada, N. (2007). *Aplicación de Técnicas GIS a Estimación de Riesgos Naturales*. (PhD). Universitat Politècnica de Catalunya,
- Lazan, B. J. (1968). *Damping of materials and members in structural mechanics*. Oxford, U.K.: Pergamon.
- Mahaney, J. A., Paret, T. F., Kehoe, B. E., & Freeman, S. A. (1993). *The Capacity Spectrum Method for Evaluating Structural Response During the Loma Prieta Earthquake*. Paper presented at the National Earthquake Conference, Memphis, USA.
- Milutinovic, Z. V., & Trendafiloski, G. S. (2003). WP4: Vulnerability of Current Buildings. In *RISK-UE Project Handbook* (pp. 111).
- Ministerio de la Vivienda. (1963). Norma MV 101-1962. Acciones en la Edificación. In *Spanish Official Bulletin*. Madrid, Spain: Ministerio de la Vivienda.
- Ministerio de la Vivienda. (1988). NBE-AE/88 Norma Básica de la Edificación. Acciones en la Edificación. In *Spanish Official Bulletin*. Madrid, Spain: Ministerio de la Vivienda.
- Moreno, R., & Bairán, J. M. (2012). Evaluación sísmica de los edificios de mampostería típicos de Barcelona aplicando la metodología Risk-UE. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 28(3).
- Mouroux, P., Bertrand, M., Bour, M., Brun, B. L., Depinois, S., Masure, P., & team, R.-U. (2004). *The European Risk-UE Project: an advanced approach to earthquake risk scenarios*. Paper presented at the 13th World Conference Earthquake Engineering, Vancouver B.C., Canada.
- Mouroux, P., & Brun, B. L. (2006). Presentation of the RISK-UE Project. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 4, 323-339.
- Mouyiannou, A., Rota, M., Penna, A., & Magenes, G. (2014). Identification of suitable limit states from nonlinear dynamic analyses of masonry structures. *Journal of Earthquake Engineering*, 18(2), 231-263. doi:10.1080/13632469.2013.842190
- Muñoz, D. (1989). Conceptos básicos en riesgo sísmico. *Física de la Tierra*, 1, 199-215.
- Nashif, A. D., Jones, D. I. G., & Henderson, J. P. (1985). *Vibration damping*. New York: John Wiley Interscience Publications.
- National Research Council. (2006). *Improved Seismic Monitoring - Improved Decision-Making: Assessing the Value of Reduced Uncertainty*. Washington, DC: The National Academies Press.
- NCSE-02. (2002). *Norma de Construcción Sismorresistente: Parte General y Edificación*. Madrid, España: Ministerio de Fomento
- NIST. (2011). *Selecting and Scaling Earthquake Ground Motions for Performing Response-History Analyses, NIST GCR 11-917-15*. Gaithersburg, Maryland: by NEHRP Consultants Joint Venture for the National Institute of Standards and Technology
- Panagopoulos, G., Panagiotopoulos, C., & Kappos, A. (2010). *Derivation of capacity curves for reinforced concrete frame and dual structures*. Paper presented at the 14th European Conference on Earthquake Engineering, Ohrid, Republic of Macedonia.
- Paricio, A. (2001). *Secrets d'un Sistema Constructiu*. Barcelona, España: Edicions UPC.
- Paricio, A., Ratera, J., & Casanovas, X. (1999). *Estudi de costos orientatiu de rehabilitació i manteniment de les façanes de l'Eixample*. Barcelona, Spain.
- PEER. (2011). *New Ground Motion Selection Procedures and Selected Motions for the PEER Transportation Research Program*. California, USA: Pacific Earthquake Engineering Research Center

- Penelis, G., Kappos, A., Stylianidis, K. C., & Panagiotopoulos, C. (2002). *2nd level analysis and vulnerability assessment of URM buildings*. Paper presented at the International Conference Earthquake Loss Estimation and Risk Reduction, Bucharest, Romania.
- Penna, A. (2002). *A Macro-element Procedure for the Non-linear Dynamic Analysis of Masonry Buildings*. (Ph.D.). Politecnico di Milano, Milano, Italy.
- Permanyer, L. (2011). *L'Exemple. 150 Anys d'Historia*. Barcelona, Spain.
- PIET-70. (1971). *Obras de Fábrica*. Madrid: Instituto Eduardo Torroja.
- Priestley, M. J. N., Seible, F., & Calvi, G. M. (1996). *Seismic Design and Retrofit of Bridges*. New York: John Wiley and Sons.
- Pujades, L. G., Vargas, Y., Barbat, A., & González-Drigo, R. (2015). Parametric model for capacity curves. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 13(5), 1347–1376.
- Rayleigh, L. (1877). *The theory of sound (two volumes)* (reissued 1945, 2nd ed.). New York: Dover Publications.
- Rea, L. M., & Parker, R. A. (2014). *Designing and Conducting Survey Research: A Comprehensive Guide*: John Wiley & Sons.
- Roderer, N. K. (1998). How to Report Statistics in Medicine: Annotated Guidelines for Authors, Editors and Reviewers. *Bulletin of the Medical Library Association*, 86(4), 623–624.
- Rodríguez Sánchez, A. (2006). Evolución de las dimensiones de los ladrillos y su coordinación desde la adopción del metro como unidad de medida. *Red temática de conservación, restauración y rehabilitación del patrimonio arquitectónico. RECOPAR*, 4(56).
- Rossetto, T., Gehl, P., Minas, S., Galasso, C., Duffour, P., Douglas, J., & Cook, O. (2016). FRACAS: A capacity spectrum approach for seismic fragility assessment including record-to-record variability. *Engineering Structures*, 125, 337–348.
- S.T.A. DATA. (2012). 3muri Program. <http://www.3muri.com>.
- Schindler, R., & Bassegoda, B. (1955). *Tratado moderno de construcción de edificios*. Barcelona, Spain.
- Secanell, R., Goula, X., Susagna, T., Fleta, J., & Roca, A. (1998). *Analysis of Seismic Hazard in Catalonia (Spain) through Different Probabilistic Approaches*. Paper presented at the Proceedings of the 11th European Conference on Earthquake Engineering, Paris, France.
- Secanell, R., Goula, X., Susagna, T., Fleta, J., & Roca, A. (2004). Seismic hazard zonation of Catalonia, Spain, integrating uncertainties. *Journal of Seismology*, 8, 24–40.
- Sobrequés i Callicó, J. (2008). *Historia de Barcelona*. Barcelona.
- Susagna, T., & Goula, X. (1999). Cataleg de Sismicitat. Atlas Sismic de Catalunya. . In I. C. f. d. Catalunya (Ed.), (Vol. 1, pp. 436). Barcelona.
- Taherdoost, H. (2016). Sampling Methods in Research Methodology; How to Choose a Sampling Technique in Research. *SSRN Electronic Journal*, 5(2).
- The MathWorks, I. (2018a). MATLAB Release 2018a. Massachusetts, United States.
- Ting, J. M., & Crawley, E. F. (1992). Characterization of damping of materials and structures from nanostrain levels to one thousand microstrain. *American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal*, 30(7), 1856–1863.
- Vacareanu, R., Lungu, D., Aldea, A., & Arion, A. (2004). *WP7 Report seismic risk scenarios handbook*.
- Valentín Gamazo, G. (1948). El tamaño de los ladrillos desde el punto de vista de la coordinación modulada de los elementos constructivos. *Revista Nacional de Arquitectura*(83), 452.
- Vamvatsikos, D., & Cornell, C. A. (2002). Incremental Dynamic Analysis. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 31(3), 491–514. doi:10.1002/eqe.141
- Venteo, D. (2012). *Autobiografía de Barcelona*. España: Efadós.



ANEJOS

A Producción científica generada durante la tesis

La producción científica generadas durante la tesis, desarrollada en conjunto con el grupo de investigación al que el autor pertenece, se presenta en este Anejo de forma resumida.

A.1 Publicaciones en revistas indexadas:

A.1.1

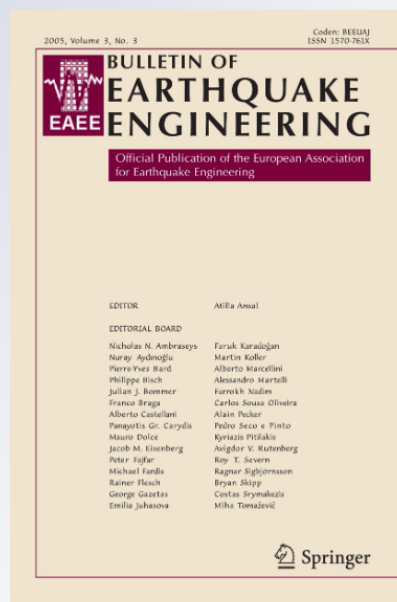
Seismic performance of a block of buildings representative of the typical construction in the Eixample district in Barcelona (Spain)

L. G. Pujades, A. H. Barbat, R. González-Drigo, J. Avila & S. Lagomarsino

Bulletin of Earthquake Engineering
Official Publication of the European
Association for Earthquake Engineering

ISSN 1570-761X
Volume 10
Number 1

Bull Earthquake Eng (2012) 10:331-349
DOI 10.1007/s10518-010-9207-5



Abstract:

Between the late nineteenth century and the early twentieth century, Barcelona was expanded, occupying the terrains connecting the old walled city and the nearby towns of the plateau of Barcelona. At that time, a large number of unreinforced masonry buildings were constructed and nowadays many of them are still used as dwellings. Though built individually, these buildings are connected to adjacent buildings, forming blocks composed of aggregates. In order to analyze the seismic behavior of isolated buildings and aggregates, two typical central buildings and one typical corner building have been chosen. The two central buildings and the corner building are referred as C1, C2, and E buildings. Two corner buildings and two central buildings have been connected in order to simulate a block side. This aggregate is referred as AGG and it is composed by the following sequence of individual buildings: E-C1-C2-E. Original plans and drawings of existing buildings are then used to model these buildings. The modeled buildings have five stories. Standard pushover analyses lead to evaluate their seismic performance by means of capacity spectra and fragility curves. The analysis has been carried out in the parallel (U_x) and transversal (U_y) directions to the street. Then, a capacity spectrum based method is used to analyze the seismic behavior of these buildings considered as individual buildings and as an aggregate. Two earthquake scenarios are considered. The first one is a deterministic scenario which is based on a historical earthquake occurred in 1,824, 25km away from the city and the second one is a probabilistic scenario, which represents the ground motion with a probability of occurrence of 10% in 50years. The soil local effects have been also considered and both scenarios have been used to assess the expected damage. Four non-null damage states are considered: slight (1), moderate (2), severe (3) and extensive-to-collapse (4). For the type of soil where most of the buildings are, and in the U_x direction, the four buildings show a similar behavior. The mean damage grade is 2.3 for the deterministic scenario and 2.7 for the probabilistic one. This means that moderate to severe damage is expected in both cases; furthermore, in the case of the deterministic scenario more than 10% of the buildings would suffer extensive-to-collapse damage and nearly 20% for the probabilistic scenario, confirming the high vulnerability of such buildings. The differences in the expected damage are due to the significant different characteristics of the response spectra of the earthquake scenarios in the range of the fundamental periods of the buildings.

Keywords: Unreinforced masonry buildings, aggregates, seismic performance capacity spectra fragility curves, seismic risk

Modernist unreinforced masonry (URM) buildings of Barcelona. Seismic vulnerability and risk assessment

Gonzalez-Drigo R ¹, Avila-Haro JA ¹, Barbat AH ¹, Pujades LG ², Vargas YF ², Lagomarsino S ³ and Cattari S ³

¹ *Department of Strength of Materials and Structural Engineering. UPC-Barcelona-TECH. Barcelona, Spain.*

² *Department of Geotechnical Engineering and Geo-Sciences. UPC-Barcelona-TECH. Barcelona, Spain.*

³ *Department of Civil, Chemical and Environmental Engineering. University of Genoa. Genoa, Italy.*

Abstract

The main objective of this work is to assess the vulnerability and seismic risk of typical existing URM modernist buildings and aggregates situated in the Eixample district of Barcelona, part of the architectural heritage of the city. The context of the analysis is the methodology proposed by the Risk-UE project. The buildings are characterized by their capacity spectrum and the earthquake demand is defined by the 5% damped elastic response spectrum, considering deterministic and probabilistic earthquake scenarios. A discussion is made regarding the basis of the seismic damage states probabilities and the calculated damage index. An important research effort has been focused on the buildings modelling. All the architectural elements and their mechanical properties have been studied and evaluated accurately. It has been evidenced that a detailed and complete knowledge of all the structural elements existing in this type of buildings influence directly their behavior and hence the calculations and the results. The analysis of the isolated buildings and of the aggregate building has been performed for both mentioned seismic scenarios. Finally, a complete discussion of the results is included.

Keywords: Unreinforced masonry, modernist architecture, capacity spectrum method, vulnerability, fragility, risk assessment.

1 Introduction

In the Mediterranean area, modern cities accumulate a large number of buildings, infrastructures and facilities that result in an important concentration of socioeconomic value and in high population density. (EUROSTAT 2011; US Bureau of the Census 1991). At present the 75% of European people live in cities with more than 100,000 inhabitants.

The seismic hazard is not negligible in this area (Jiménez et al. 2001; Grünthal et al. 1999; Egozcue et al. 1991) and the seismic risk is higher than expected due to the high vulnerability of constructions built in the urban centres where a significant number of the current buildings are constructed with unreinforced brick masonry and without any consideration of the seismic actions. Most of these buildings are more than 100 years old, which means that they largely overpass the service life initially supposed for them. In addition, several circumstances, as the material degradation, some aggressive retrofitting and refurbishing works, and the changes in the

Abstract:

The main objective of this work is to assess the vulnerability and seismic risk of typical existing URM modernist buildings and aggregates situated in the Eixample district of Barcelona, part of the architectural heritage of the city. The context of the analysis is the methodology proposed by the Risk-UE project. The buildings are characterized by their capacity spectrum and the earthquake demand is defined by the 5% damped elastic response spectrum, considering deterministic and probabilistic earthquake scenarios. A discussion is made regarding the basis of the seismic damage states probabilities and the calculated damage index. An important research effort has been focused on the buildings modelling. All the architectural elements and their mechanical properties have been studied and evaluated accurately. It has been evidenced that a detailed and complete knowledge of all the structural elements existing in this type of buildings influence directly their behavior and hence the calculations and the results. The analysis of the isolated buildings and of the aggregate building has been performed for both mentioned seismic scenarios. Finally, a complete discussion of the results is included.

Keywords: Unreinforced masonry, modernist architecture, capacity spectrum method, vulnerability, fragility, risk assessment

Non-linear static procedures applied to high-rise residential URM buildings

R. Gonzalez-Drigo¹ · J. Avila-Haro¹ · L. G. Pujades² ·
A. H. Barbat²

Received: 15 March 2015 / Accepted: 24 May 2016 / Published online: 15 June 2016
© Springer Science+Business Media Dordrecht 2016

Abstract In this work, the vulnerability of an unreinforced masonry building, evaluated on the one hand by using the incremental dynamic analysis, and on the other hand by using nine representative non-linear static incremental procedures, is compared. For comparison reasons among the different non-linear static procedures, the obtained incremental dynamic analyses results are used as reference values. The aim of this analysis is to evaluate the applicability and reliability of the diverse non-linear static procedures for unreinforced masonry buildings, and to propose modifications oriented to improve their use in this typology of structures. For this purpose, a fully representative unreinforced masonry building of the dominating building type in the Eixample district of Barcelona, is analyzed. Furthermore, the conditional spectrum approach procedure has been applied with the aim to conveniently define the seismic demand. Regarding the definition of the fragility curves, two different methodologies were used for each non-linear static procedure and incremental dynamic analyzes. Subsequently, the corresponding damage indices as well as the damage curves were calculated and compared for the different considered peak ground acceleration values. The results of this comparison seem to confirm that the damage curves obtained by performing the NSP and by applying the Risk-UE methodology overestimate the damage corresponding to low values of the PGA and underestimate the damage for higher values of the PGA.

Keywords Unreinforced masonry · Push-over · Non-linear static procedures · Multi stripe analysis · Vulnerability

✉ R. Gonzalez-Drigo
jose.ramon.gonzalez@upc.edu

¹ Department of Strength of Materials and Structural Engineering, EUETIB-UPC BarcelonaTech, C/Urgel 187, 08036 Barcelona, Spain

² Department of Civil and Environmental Engineering, UPC BarcelonaTech, Barcelona, Spain

Abstract:

In this work, the vulnerability of an unreinforced masonry building, evaluated on the one hand by using the incremental dynamic analysis, and on the other hand by using nine representative non-linear static incremental procedures, is compared. For comparison reasons among the different non-linear static procedures, the obtained incremental dynamic analyses results are used as reference values. The aim of this analysis is to evaluate the applicability and reliability of the diverse non-linear static procedures for unreinforced masonry buildings, and to propose modifications oriented to improve their use in this typology of structures. For this purpose, a fully representative unreinforced masonry building of the dominating building type in the Eixample district of Barcelona, is analyzed. Furthermore, the conditional spectrum approach procedure has been applied with the aim to conveniently define the seismic demand. Regarding the definition of the fragility curves, two different methodologies were used for each non-linear static procedure and incremental dynamic analyzes. Subsequently, the corresponding damage indices as well as the damage curves were calculated and compared for the different considered peak ground acceleration values. The results of this comparison seem to confirm that the damage curves obtained by performing the NSP and by applying the Risk-UE methodology overestimate the damage corresponding to low values of the PGA and underestimate the damage for higher values of the PGA.

Keywords: Unreinforced masonry, push-over, non-linear static procedures, multi stripe analysis, vulnerability

Article

Assessment of Post-Earthquake Damaged Building with Interferometric Real Aperture Radar

Ramon Gonzalez-Drigo ^{1,*}, Esteban Cabrera ², Guido Luzi ³, Luis G. Pujades ⁴,
Yeudy F. Vargas –Alzate ⁴ and Jorge Avila-Haro ¹

¹ Department of Structural Engineering, Polytechnic University of Catalonia, Calle/Street Jordi Girona, 31, 08034 Barcelona, Spain; jose.ramon.gonzalez@upc.edu (R.G.D.); jorge.avila-haro@upc.edu (J.A.H.)

² Civil Engineering School, University of Azuay, Ave 24 de Mayo, 7-77, y Hernán Malo, Cuenca 010107, Ecuador; ecabrerav@uazuay.edu.ec

³ Department of Remote Sensing-Division of Geomatics. Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya, Ave. Carl Friedrich Gauss, 7, 08860 Castelldefels, Spain; guido.luzi@cttc.cat

⁴ Department of Civil and Environmental Engineering, Polytechnic University of Catalonia, Calle/Street Jordi Girona, 31, 08034 Barcelona, Spain; lluis.pujades@upc (L.G.P.); yeudy.felipe.vargas@upc.edu (Y.F.V.A.)

* Correspondence: jose.ramon.gonzalez@upc.edu; Tel.: +34-934137332

Received: 29 September 2019; Accepted: 25 November 2019; Published: 28 November 2019

Abstract: In this study the main results of a detailed analysis of an actual building, which was severely damaged during the Mw 5.1, May 11th 2011, Lorca earthquake (Murcia, Spain) are presented. The dynamic behavior of the building was analyzed by means of empirical and numerical approaches. The displacement response of the building submitted to ambient noise was recorded by using a Real Aperture Radar (RAR). This approach provides a secure remote sensing procedure that does not require entering the building. Based on the blueprints and other available graphical information about the building, a numeric 3D model was also set up, allowing obtaining capacity spectra and fragility curves in the two main resistant directions of the building. The main purpose of this study was to check out the feasibility of the RAR-based method to detect the safety state of a damaged building after an earthquake, without the need of entering unsafe structures. A good consistency of the numerical and experimental approaches and the observed damage was obtained, showing that RAR interferometric-based tools may provide promising supplementary remote sensing methods to safely survey and report about the structural health and the operative conditions of buildings in post-earthquake scenarios.

Keywords: seismic damage; seismic fragility; remote sensing; real aperture radar; capacity spectrum; Lorca earthquake

Abstract:

In this study the main results of a detailed analysis of an actual building, which was severely damaged during the Mw 5.1, May 11th 2011, Lorca earthquake (Murcia, Spain) are presented. The dynamic behavior of the building was analyzed by means of empirical and numerical approaches. The displacement response of the building submitted to ambient noise was recorded by using a Real Aperture Radar (RAR). This approach provides a secure remote sensing procedure that does not require entering the building. Based on the blueprints and other available graphical information about the building, a numeric 3D model was also set up, allowing obtaining capacity spectra and fragility curves in the two main resistant directions of the building. The main purpose of this study was to check out the feasibility of the RAR-based method to detect the safety state of a damaged building after an earthquake, without the need of entering unsafe structures. A good consistency of the numerical and experimental approaches and the observed damage was obtained, showing that RAR interferometric-based tools may provide promising supplementary remote sensing methods to safely survey and report about the structural health and the operative conditions of buildings in post-earthquake scenarios.

Keywords: seismic damage, seismic fragility, remote sensing, real aperture radar, capacity spectrum, Lorca earthquake

A.1.5

“Probabilistic seismic assessment of a high-rise URM building”. Avila Haro, J.; González-Drigo, R.; Vargas-Alzate, Y. F.; Pujades, L.; Barbat, A. *Journal of Building Engineering*. *Enviado a revista, en revision*

Abstract:

According to the Sendai Framework for Disaster Risk Reduction (2015-2030), disasters have demonstrated that the recovery, rehabilitation and reconstruction phase, which needs to be prepared ahead of a disaster, is a critical opportunity to “Build Back Better”, integrating disaster risk reduction into development measures. In this respect, a significant number of structures, that constitute several European urban nuclei, belong to old constructive typologies, which were designed and built without any consideration for the seismic hazard. One of the most used typologies exhibiting this shortcoming is unreinforced masonry (URM). Therefore, an important step towards increasing resilience of European cities is to deeply understand the seismic behavior of this frequent typology. In order to do so properly, detailed probabilistic nonlinear building models should be developed. However, including the uncertainties associated with this typology is challenging due to the heterogeneity of the different manufacturing techniques, executed under primitive industrial standards, and to the construction techniques, which are dependent on regional uses and criteria in a pre-code scenario. The object of this research is twofold. First, a detailed quantification of the uncertainties related to the mechanical properties of this construction material is conducted. Then, the influence of this variability on the seismic performance of a representative building model of the Eixample district in Barcelona, Spain, is analyzed. This building typology represents 72% of the building stock in this district with an average age of 90 years, which means that the construction practice, at that time, was only regulated by early council guidelines that are considered pre-code rules. Specifically, the probabilistic approach is illustrated with a case study performed on an existing seven-story (high-rise) URM. A detailed numerical model of this structure has been developed and randomized taking into account the variability of the material properties. Accordingly, 1000 models were generated and analyzed by considering as input different sets of material random variables. The compressive strength, Young modulus, shear modulus and shear strength are chosen and modelled to encompass the material uncertainties. The seismic response of each variant (i.e. selected set of mechanical properties) is obtained through a simplified non-linear static procedure aiming to compare and categorize the influence of the probabilistic input on the seismic performance of the building. Results are presented in terms of correlations between damage parameters and material properties. The analysis carried out shows that the variability in the material properties generates significant uncertainties in the seismic response of URM buildings, leading to over or underestimate expected damage when compared with results based on approaches that do not consider the probabilistic nature of the problem.

Keywords: probabilistic, high-rise, unreinforced masonry, mechanical properties, fragility, damage ratio

A.2 Otras publicaciones

J. A. Avila and J. A. Avila-Haro, "Assessment of the Structural Condition of a Hospital-Type Building in Mexico City Damaged in the 1985 Earthquake", *Key Engineering Materials*, Vol. 754, pp. 349-352, 2017

J. A. Avila and J. A. Avila-Haro, "Inelastic Dynamic Seismic Response of 15-Story and 25-Story RC Buildings with and without Shear Walls Designed with the Mexico City Building Code", *Key Engineering Materials*, Vol. 665, pp. 81-84, 2016

J. A. Avila et al., "Inelastic Dynamic and Non-Linear Static Seismic Performance of a Building with RC Walls that Collapsed in the Chile's Earthquake of February 2010 and a Building with RC Concrete Frame Designed in the Mexico City", *Key Engineering Materials*, Vol. 627, pp. 161-164, 2015

J. A. Avila-Haro, R. González-Drigo, Y. Vargas, L.G. Pujades, A.H. Barbat, "Deterministic and Probabilistic Earthquake Scenarios for the Seismic Risk Analysis of URM Buildings", *Key Engineering Materials*, Vols. 525-526, pp. 537-540, 2013

A.3 Presentaciones en congresos

Avila-Haro, J.; González-Drigo, J.; Pujades, L.; Barbat, A. "Probabilistic Seismic Damage Assessment of URM Buildings Based on Incremental Dynamic Analyses". 16th World Conference on Earthquake Engineering. Santiago, Chile (9-13/01/2017).

Avila, J.; Avila - Haro, J. "Inelastic Performance of a RC Wall Building Collapsed in the 27 February 2010 Chile Earthquake". 16th World Conference on Earthquake Engineering. Santiago, Chile (9-13/01/2017)

Avila-Haro, J.; González-Drigo, J.; Pujades, L.; Barbat, A. "Seismic assessment of high-rise URM buildings: a probabilistic approach". 11th International Workshop on Seismic Microzoning and Risk Reduction. Granada, España (3-5/09 / 2016).

Avila, J.; Avila- Haro, J. "Inelastic Dynamic Response of 15-Story and 25-Story RC Buildings With and Without Shear Walls Designed With the Mexico City Building Code". 14th International Conference on Fracture and Damage Mechanics. Montenegro, Serbia (2015).

Avila- Haro, J.; Elshoura, A.; Maca, J. "Seismic Assessment of Unreinforced Masonry Buildings". 13th International Conference on New Trends in Statics and Dynamics of Buildings. Bratislava, Eslovaquia (2015).

Avila, J.; Lopez, D. Avila-Haro, J. "Inelastic dynamic and non-linear static performance of a building with RC walls that collapsed in the Chile's earthquake of February 2010 and building with RC concrete frame designed in Mexico City". 13TH International Conference on Fracture and Damage Mechanics. Azores, Portugal. (23-25/09/2014).

Avila-Haro, J.; Gonzalez, J.; Vargas, Y.; Pujades, L.; Barbat, H. "Deterministic and probabilistic earthquake scenarios for the seismic risk analysis of URM buildings". 11th International Conference on Fracture and Damage Mechanics. Xian, China. (2012).

Avila-Haro, J.; González-Drigo, J.; Pujades, L.; Barbat, A. “Modelización de un edificio de mampostería no reforzada característico del distrito del eixample de Barcelona, España”. 4o Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica. Granada, España (2011).

González-Drigo, J.; Avila-Haro, J.; Pujades, L.; Barbat, A. “Riesgo sísmico de los edificios agregados en la ciudad de Barcelona (España)”. :4o Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica. Granada, España (2011).

González-Drigo, J.; Avila-Haro, J.; Pujades, L.; Barbat, A. “Seismic vulnerability of building aggregates in Barcelona”. 14th European Conference on Earthquake Engineering. Ohrid, Macedonia (2010).

B Resultados

La completitud de resultados, gráficos, tablas y otros datos correspondientes a los diferentes edificios aislados y agregados que componen este estudio se presentan en este Anejo.

En el Capítulo 4 se detalla la información de los diversos resultados para el edificio ED-01. De manera análoga, en el Capítulo 5, se detalla la información correspondiente al edificio agregado AG-01.

Este anejo, tal como lo hace la estructura de la tesis, se divide en dos secciones principales: i) Edificios aislados; y ii) Edificios agregados. A su vez, dichas secciones comparten en común la estructura de la información aquí presentada consiste en 4 sub-apartados: 1) Análisis modal; 2) Análisis estático no-lineal; 3) Fragilidad y daño; y 4) Análisis dinámico.

B.1 ED-01

B.1.1 Análisis modal

Tabla B-1 Resultados del análisis modal para el edificio aislado ED-01 (fuente: preparado por el autor)

# Modo	T [s]	f [rad/s]	ω [Hz]	Mx [kg]	My [kg]	Mz [kg]	ΣM [kg]
1	0,630	1,59	9,98	45,52	1876380,39	0,12	1876426,03
2	0,615	1,63	10,22	2140253,20	43,54	4,20	2140300,94
3	0,534	1,87	11,78	70179,83	1,70	6,50	70188,03
4	0,218	4,58	28,77	234750,94	10,89	3,35	234765,18
5	0,214	4,68	29,39	17453,56	2327,37	2,46	19783,39
6	0,210	4,76	29,93	99,42	360876,64	6,86	360982,92
7	0,184	5,44	34,16	19274,49	0,36	19,31	19294,16
8	0,141	7,11	44,68	861,30	25,31	317,50	1204,11
9	0,138	7,25	45,52	12,69	245,36	1988391,26	1988649,31
10	0,130	7,67	48,20	31,73	8087,21	114463,63	122582,57
11	0,122	8,23	51,68	6,22	21685,12	33522,25	55213,58
12	0,119	8,39	52,74	25,58	95090,19	207,51	95323,28
13	0,117	8,52	53,52	28048,85	6,68	59,76	28115,28
14	0,110	9,08	57,06	2497,16	17,64	119,34	2634,15
15	0,109	9,14	57,45	45,29	16,31	224,17	285,76
16	0,106	9,40	59,07	726,64	3,16	15,75	745,56
17	0,104	9,64	60,56	25,17	138,60	500,55	664,32
18	0,103	9,72	61,07	884,29	1,94	194,04	1080,27
19	0,101	9,88	62,05	347,24	216,76	871,04	1435,05
20	0,101	9,94	62,45	6225,29	5,26	48,99	6279,54
21	0,098	10,25	64,37	0,86	19,50	16261,94	16282,30

Tabla B-2 Resultados del análisis modal para el edificio aislado ED-01 (continuación) (fuente: preparado por el autor)

# Modo	T [s]	IFx [%]	IFy [%]	IFz [%]	RAMx [%]	RAMy [%]	RAMz [%]	AAMx [%]	AAMy [%]	AAMz [%]
1	0,630	0,002	99,998	0,000	0,002	79,333	0,000	0,002	69,390	0,000
2	0,615	99,998	0,002	0,000	84,870	0,002	0,000	79,148	0,002	0,000
3	0,534	99,988	0,002	0,009	2,783	0,000	0,000	2,595	0,000	0,000
4	0,218	99,994	0,005	0,001	9,309	0,000	0,000	8,681	0,000	0,000
5	0,214	88,223	11,764	0,012	0,692	0,098	0,000	0,645	0,086	0,000
6	0,210	0,028	99,971	0,002	0,004	15,258	0,000	0,004	13,345	0,000
7	0,184	99,898	0,002	0,100	0,764	0,000	0,001	0,713	0,000	0,001
8	0,141	71,531	2,102	26,368	0,034	0,001	0,015	0,032	0,001	0,012
9	0,138	0,001	0,012	99,987	0,001	0,010	92,258	0,000	0,009	73,532
10	0,130	0,026	6,597	93,377	0,001	0,342	5,311	0,001	0,299	4,233
11	0,122	0,011	39,275	60,714	0,000	0,917	1,555	0,000	0,802	1,240
12	0,119	0,027	99,755	0,218	0,001	4,020	0,010	0,001	3,516	0,008
13	0,117	99,764	0,024	0,213	1,112	0,000	0,003	1,037	0,000	0,002
14	0,110	94,800	0,670	4,531	0,099	0,001	0,006	0,092	0,001	0,004
15	0,109	15,847	5,706	78,447	0,002	0,001	0,010	0,002	0,001	0,008
16	0,106	97,463	0,424	2,113	0,029	0,000	0,001	0,027	0,000	0,001
17	0,104	3,789	20,863	75,347	0,001	0,006	0,023	0,001	0,005	0,019
18	0,103	81,858	0,180	17,962	0,035	0,000	0,009	0,033	0,000	0,007
19	0,101	24,197	15,105	60,698	0,014	0,009	0,040	0,013	0,008	0,032
20	0,101	99,136	0,084	0,780	0,247	0,000	0,002	0,230	0,000	0,002
21	0,098	0,005	0,120	99,875	0,000	0,001	0,755	0,000	0,001	0,601

B.1.2 Análisis de capacidad

B.1.2.1 Curva de capacidad

Dirección +X

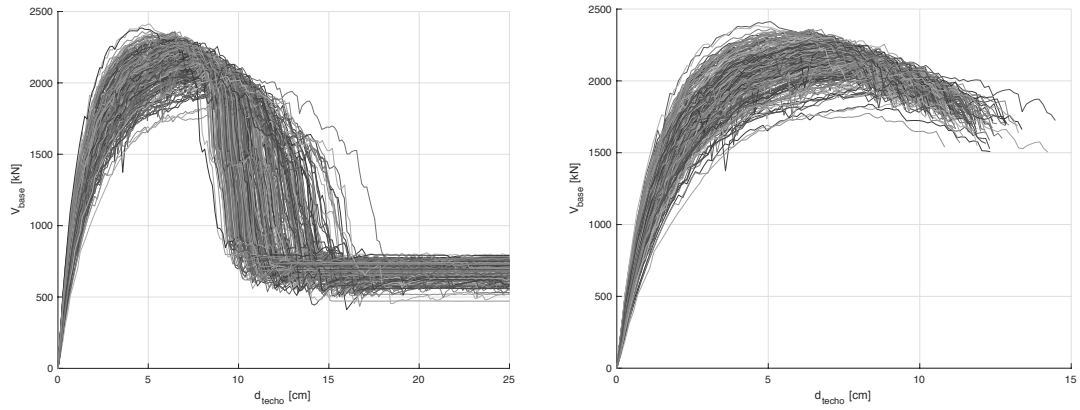


Fig. B-1 Curvas de capacidad originales (izq. - 3muri) y procesadas (der. - criterio de punto último) [Dir. +X] (fuente: preparado por el autor)

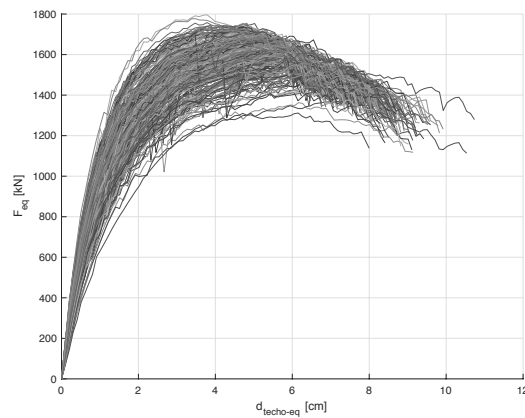


Fig. B-2 Curvas de capacidad de los sistemas equivalentes de 1GDL [Dir. +X, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +Y

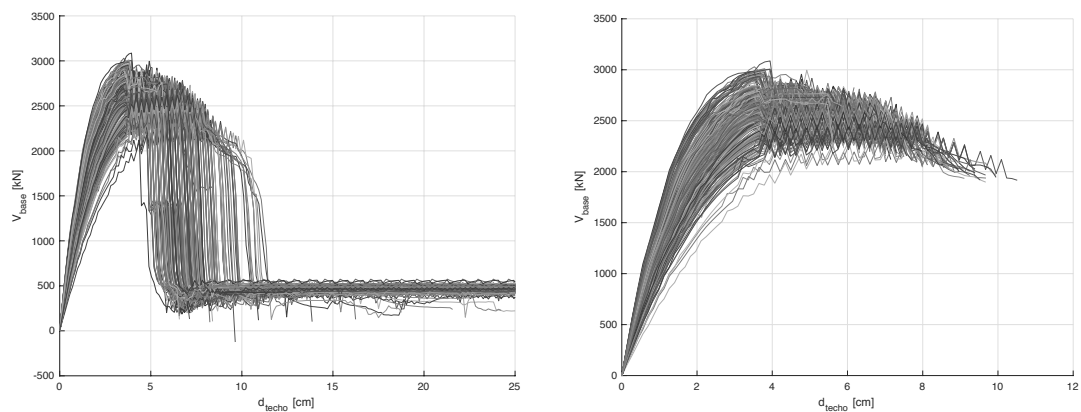


Fig. B-3 Curvas de capacidad originales (izq. - 3muri) y procesadas (der. - criterio de punto último) [Dir. +Y] (fuente: preparado por el autor)

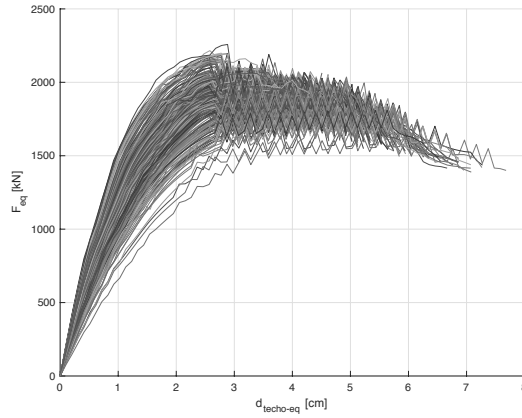


Fig. B-4 Curvas de capacidad de los sistemas equivalentes de 1DGL [Dir. +Y, N2] (fuente: preparado por el autor)

B.1.2.2 Curva de capacidad en formato aceleración-desplazamiento (ADRS)

Dirección +X

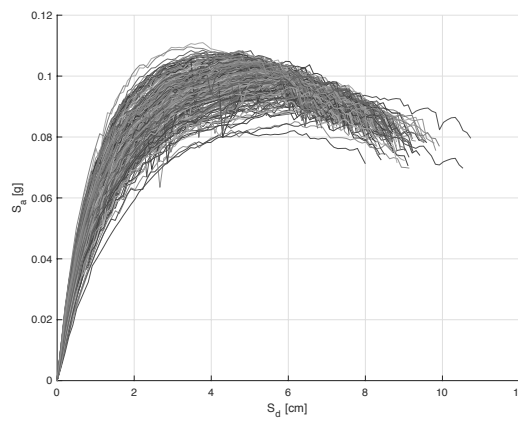


Fig. B-5 Curvas de capacidad en formato desplazamiento-aceleración (ADRS) [Dir. +Y, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +Y

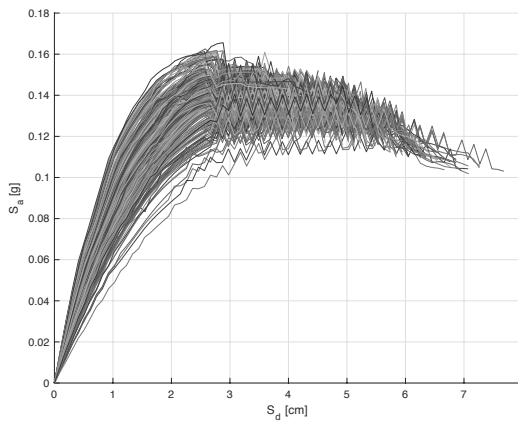


Fig. B-6 Curvas de capacidad en formato desplazamiento-aceleración (ADRS) [Dir. +Y, N2] (fuente: preparado por el autor)

B.1.2.3 Representación bilineal

Dirección +X

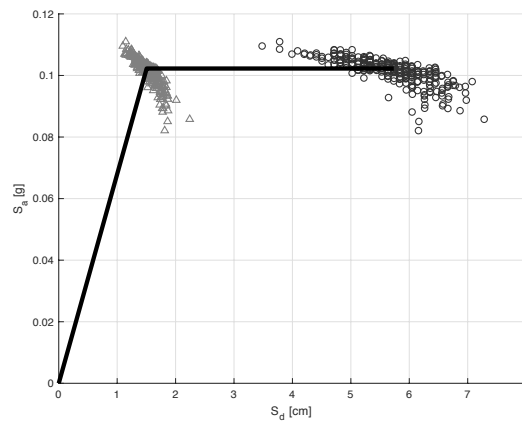


Fig. B-7 Representación bilinear promedio y nubes de valores de los puntos de fluencia y último [Dir. +X, N2]
(fuente: preparado por el autor)

Dirección +Y

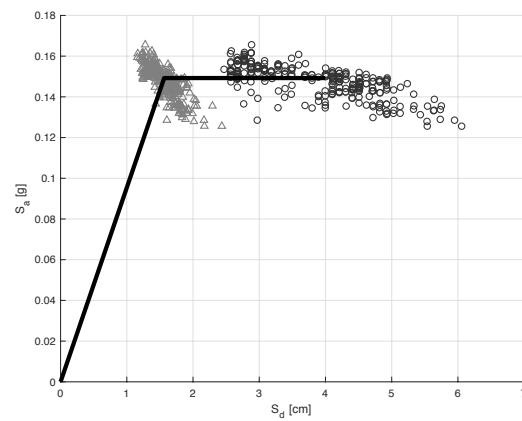


Fig. B-8 Representación bilinear promedio y nubes de valores de los puntos de fluencia y último [Dir. +Y, N2]
(fuente: preparado por el autor)

B.1.3 Fragilidad y daño esperado

B.1.3.1 Curvas de fragilidad

Dirección +X

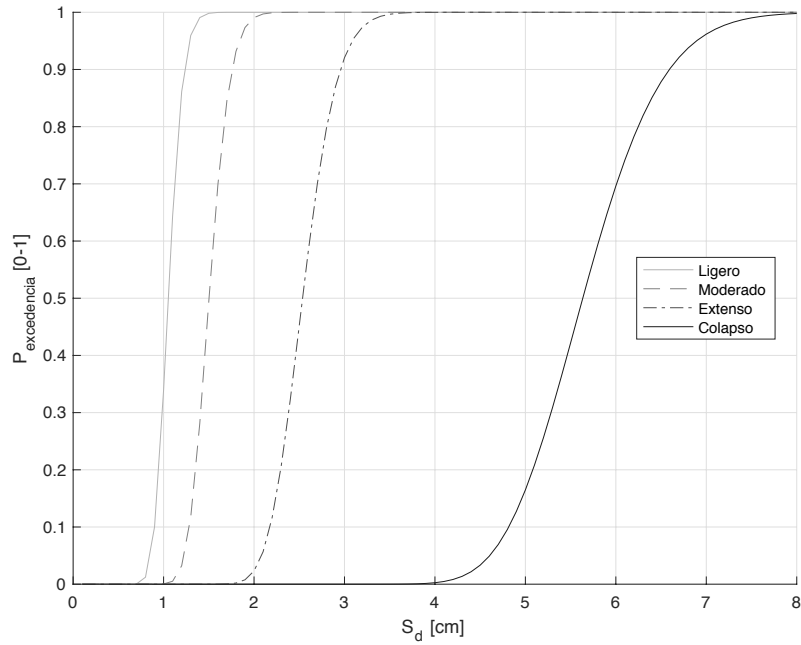


Fig. B-9 Curvas de fragilidad [Dir. +X, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +Y

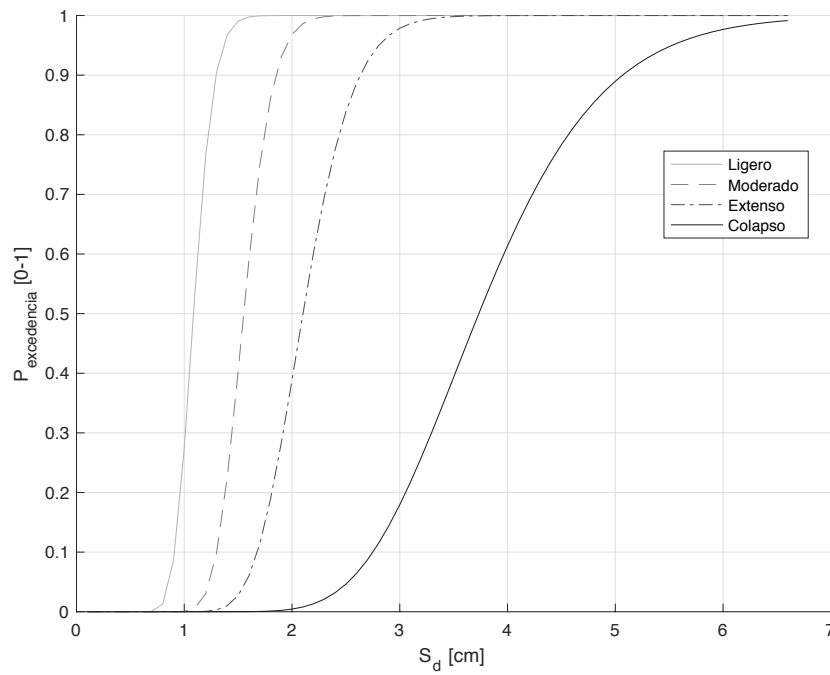


Fig. B-10 Curvas de fragilidad [Dir. +Y, N2] (fuente: preparado por el autor)

B.1.3.2 Estados de daño

Dirección +X

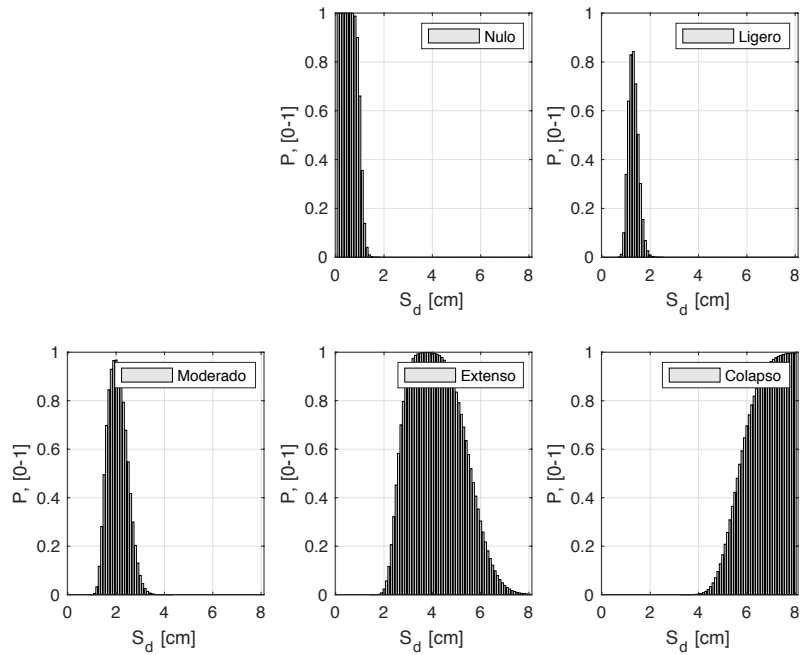


Fig. B-11 Probabilidades de ocurrencia de los distintos estados de daño para diversos desplazamientos espectrales posibles obtenidos a partir de las curvas de fragilidad [Dir. +X, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +Y

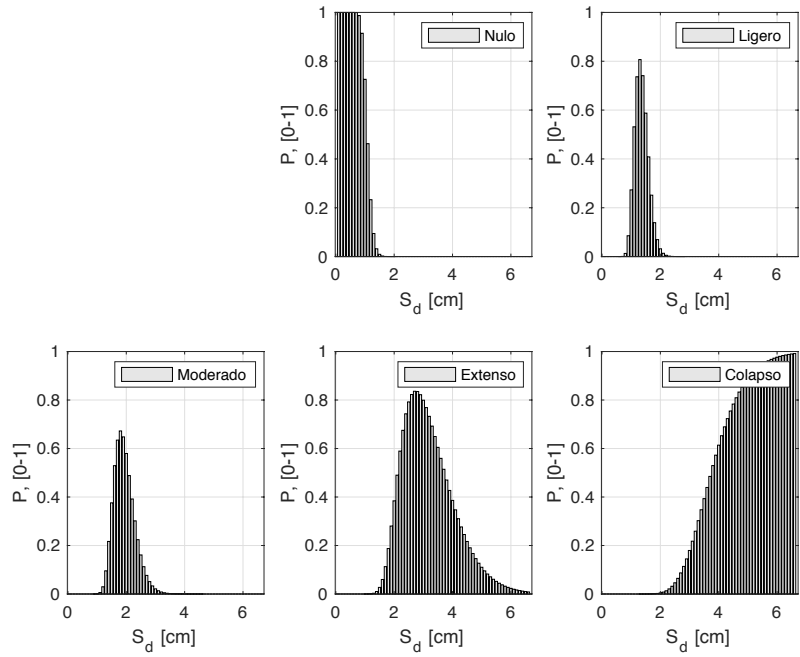


Fig. B-12 Probabilidades de ocurrencia de los distintos estados de daño para diversos desplazamientos espectrales posibles obtenidos a partir de las curvas de fragilidad [Dir. +Y, N2] (fuente: preparado por el autor)

B.1.3.3 Punto de desempeño

Dirección +X, $p_{ga} = 0.04 \text{ g}$

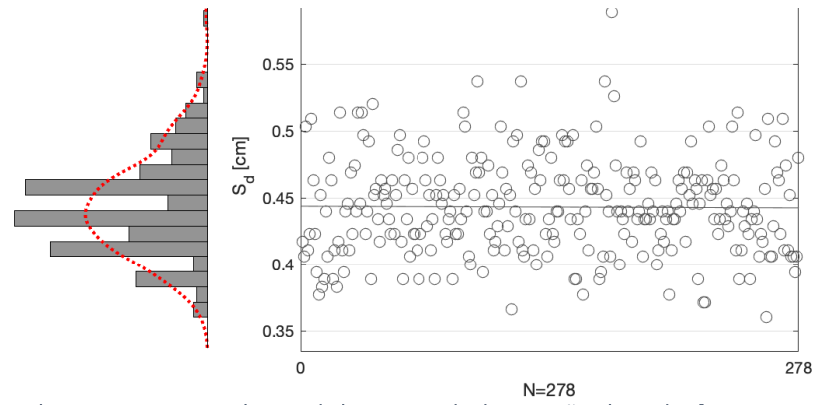


Fig. B-13 Desplazamientos espectrales, S_d , de los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, $p_{ga} = 0.04g$, N2] (fuente: preparado por el autor)

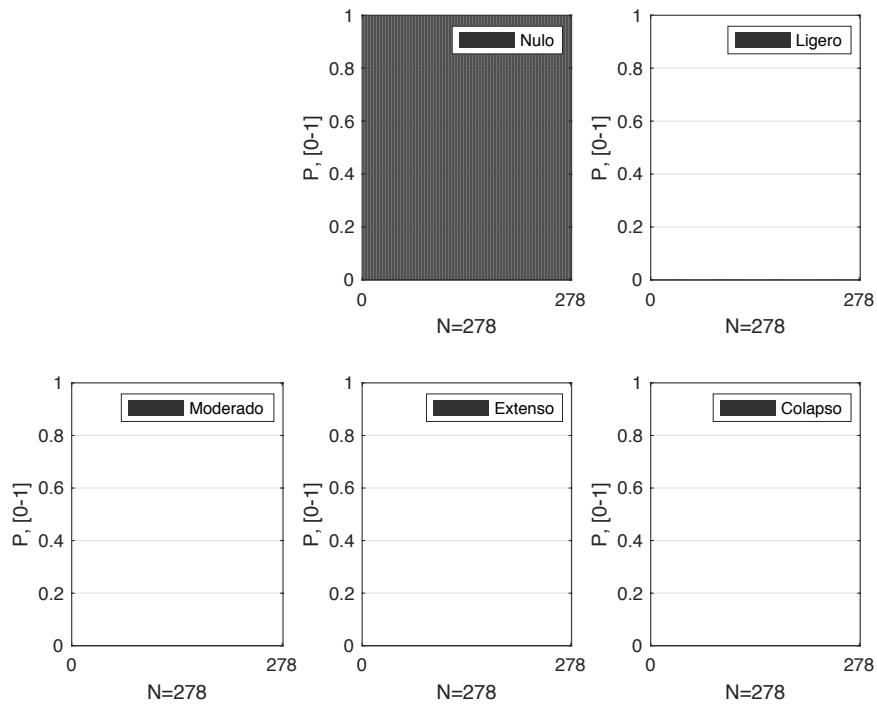


Fig. B-14 Probabilidades de pertenencia de los estados de daño nulo y no nulos para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, $p_{ga} = 0.04g$, N2] (fuente: preparado por el autor)

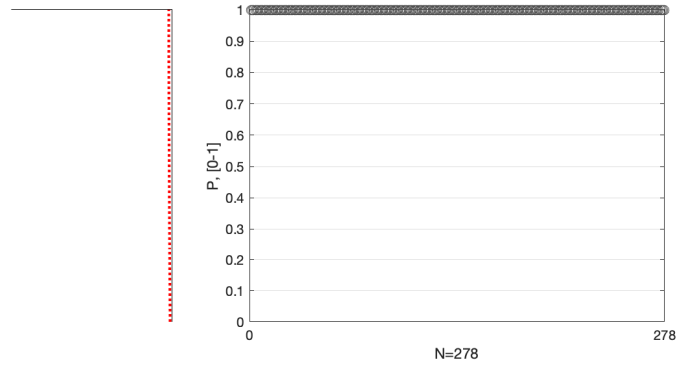


Fig. B-15 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Nulo para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.04g, N2] (fuente: preparado por el autor)

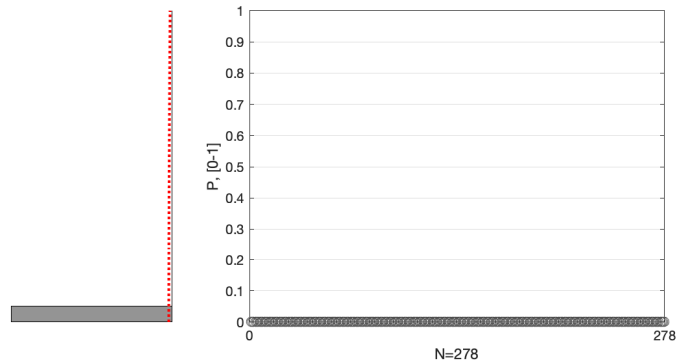


Fig. B-16 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Ligero para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.04g, N2] (fuente: preparado por el autor)

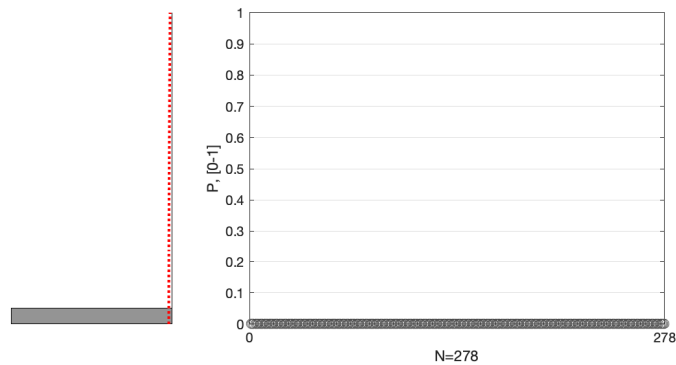


Fig. B-17 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Moderado para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.04g, N2] (fuente: preparado por el autor)

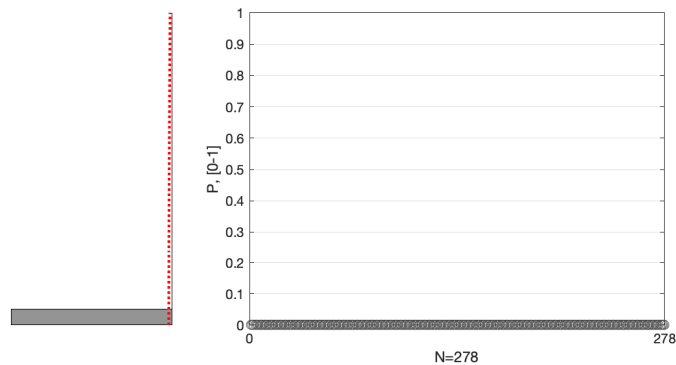


Fig. B-18 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Extenso para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.04g, N2] (fuente: preparado por el autor)

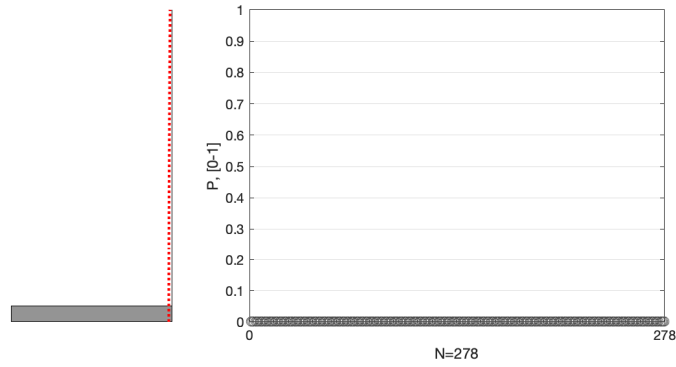


Fig. B-19 Probabilidades de pertenencia al estado de daño de Colapso para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.04g, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +Y, pga = 0.04 g

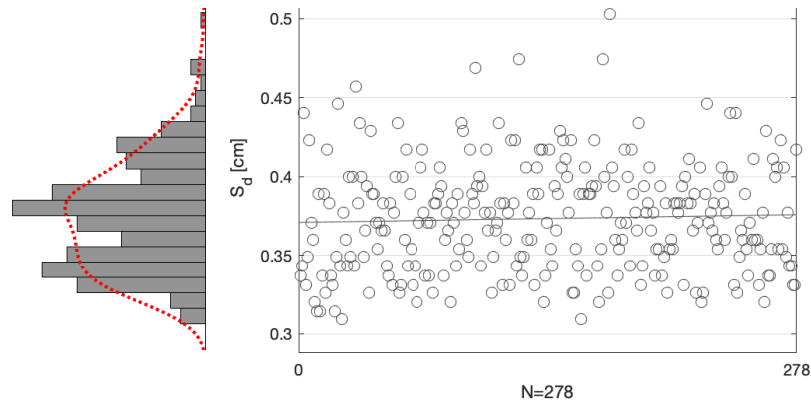


Fig. B-20 Desplazamientos espectrales, S_d , de los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0.04g, N2] (fuente: preparado por el autor)

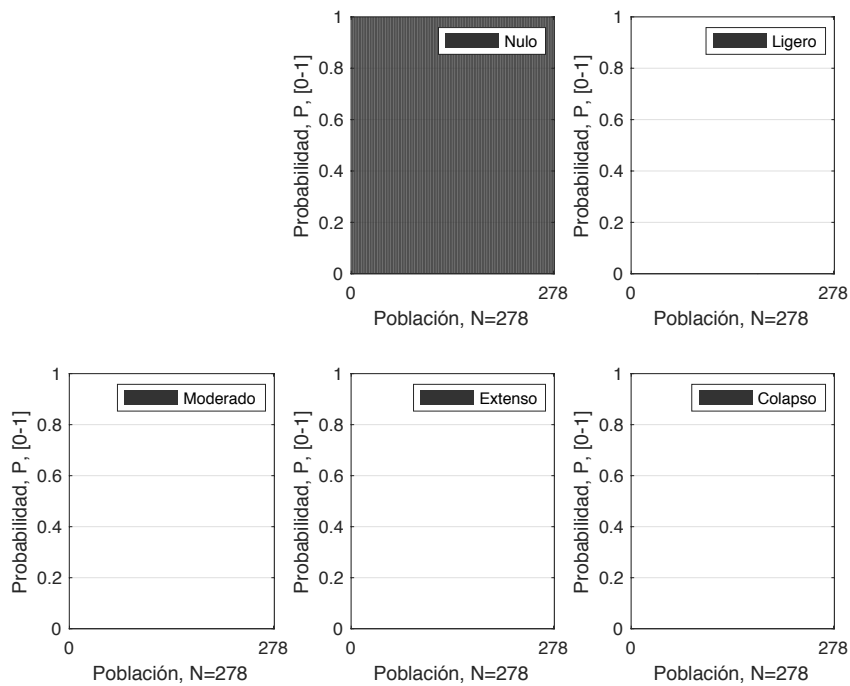


Fig. B-21 Probabilidades de pertenencia de los estados de daño nulo y no nulos para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0.04g, N2] (fuente: preparado por el autor)

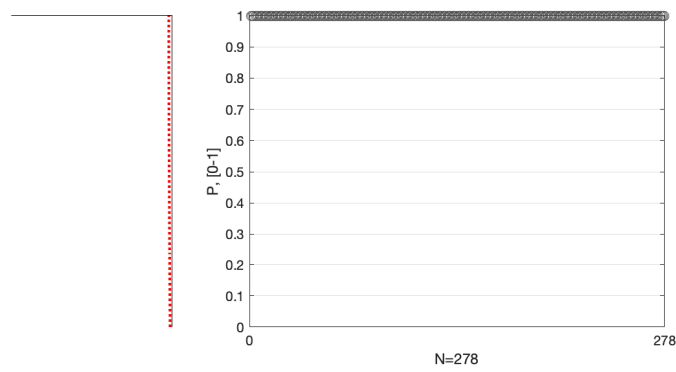


Fig. B-22 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Nulo para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0.04g, N2] (fuente: preparado por el autor)

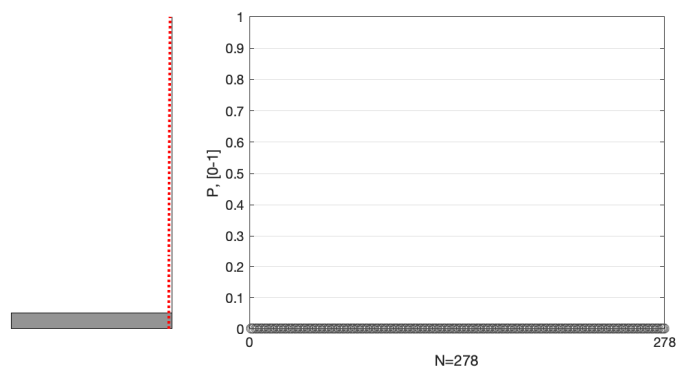


Fig. B-23 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Ligero para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0.04g, N2] (fuente: preparado por el autor)

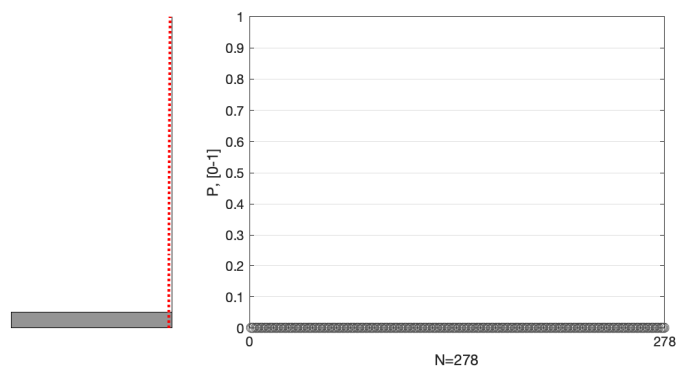


Fig. B-24 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Moderado para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0.04g, N2] (fuente: preparado por el autor)

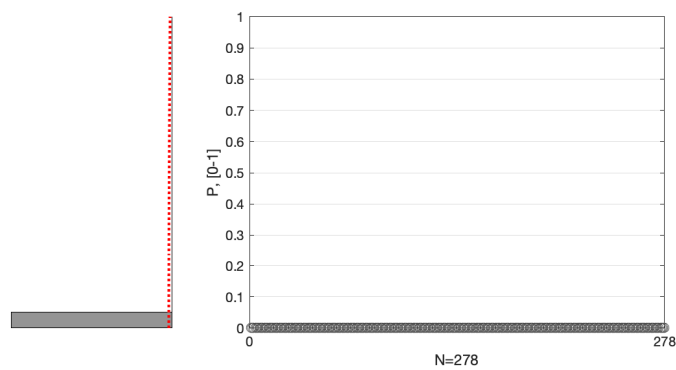


Fig. B-25 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Extenso para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0.04g, N2] (fuente: preparado por el autor)

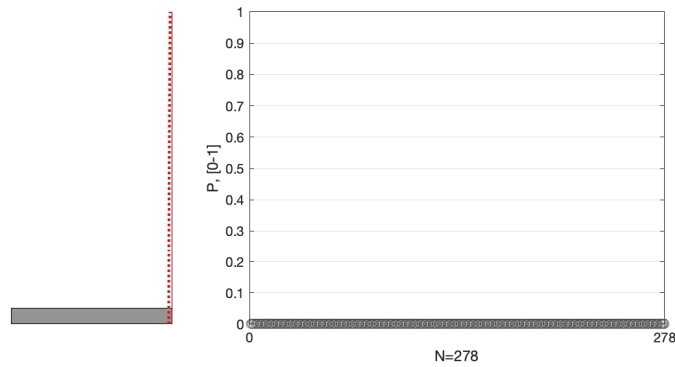


Fig. B-26 Probabilidades de pertenencia al estado de daño de Colapso para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0.04g, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +X, pga = 0.141 g

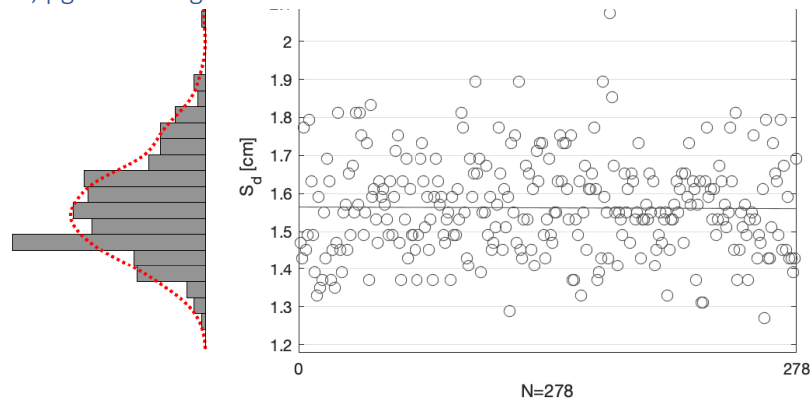


Fig. B-27 Desplazamientos espectrales, S_d , de los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.141g, N2] (fuente: preparado por el autor)

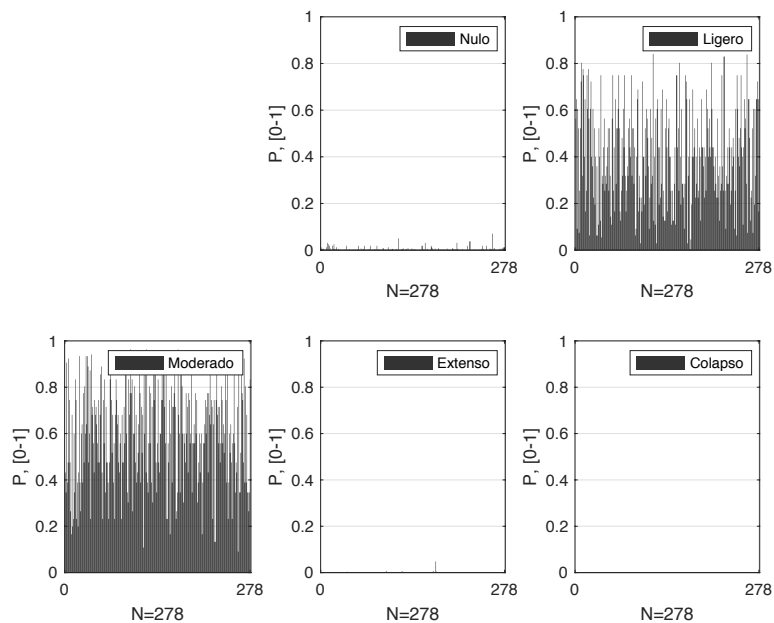


Fig. B-28 Probabilidades de pertenencia de los estados de daño nulo y no nulos para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.141g, N2] (fuente: preparado por el autor)

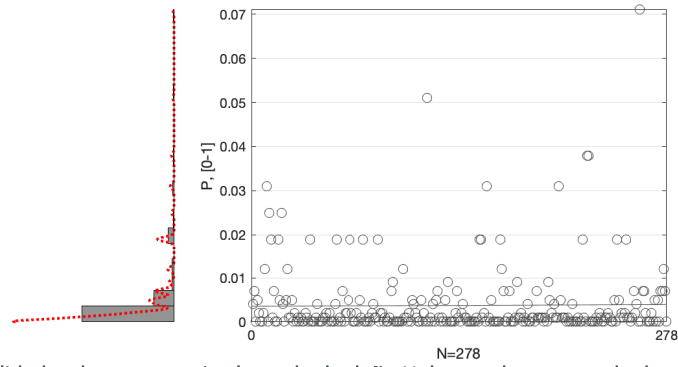


Fig. B-29 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Nulo para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.141g, N2] (fuente: preparado por el autor)

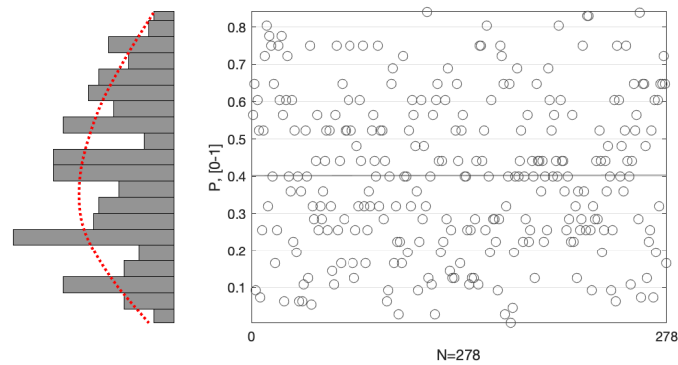


Fig. B-30 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Ligero para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0. 141g, N2] (fuente: preparado por el autor)

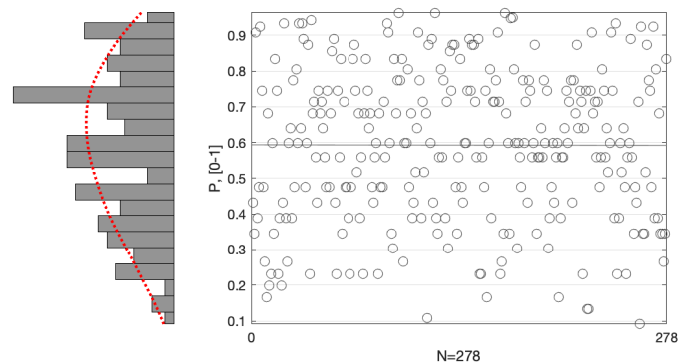


Fig. B-31 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Moderado para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0. 141g, N2] (fuente: preparado por el autor)

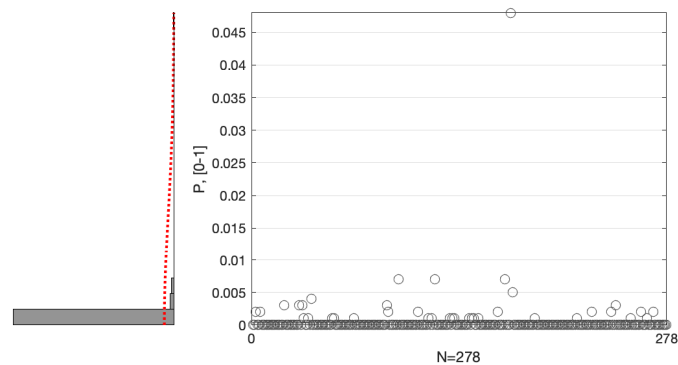


Fig. B-32 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Severo para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0. 141g, N2] (fuente: preparado por el autor)

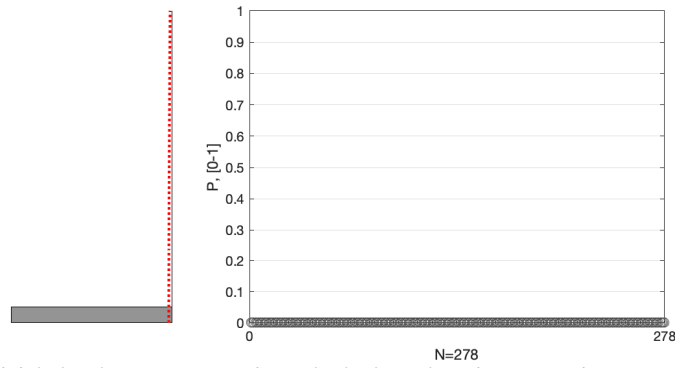


Fig. B-33 Probabilidades de pertenencia al estado de daño de Colapso para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0. 141g, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +Y, pga = 0.141 g

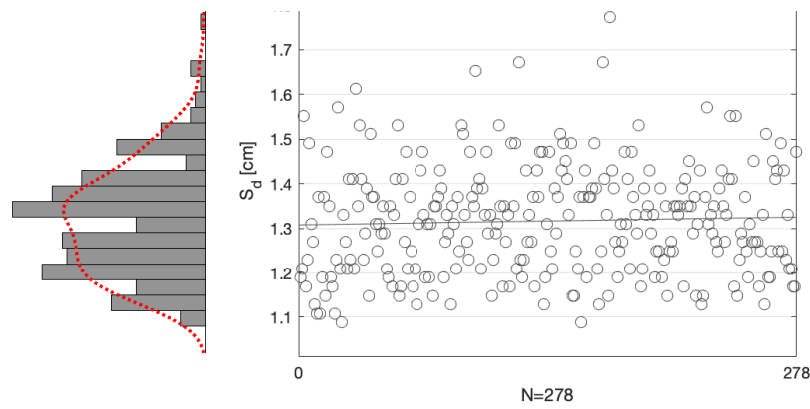


Fig. B-34 Desplazamientos espectrales, S_d , de los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0.141g, N2] (fuente: preparado por el autor)

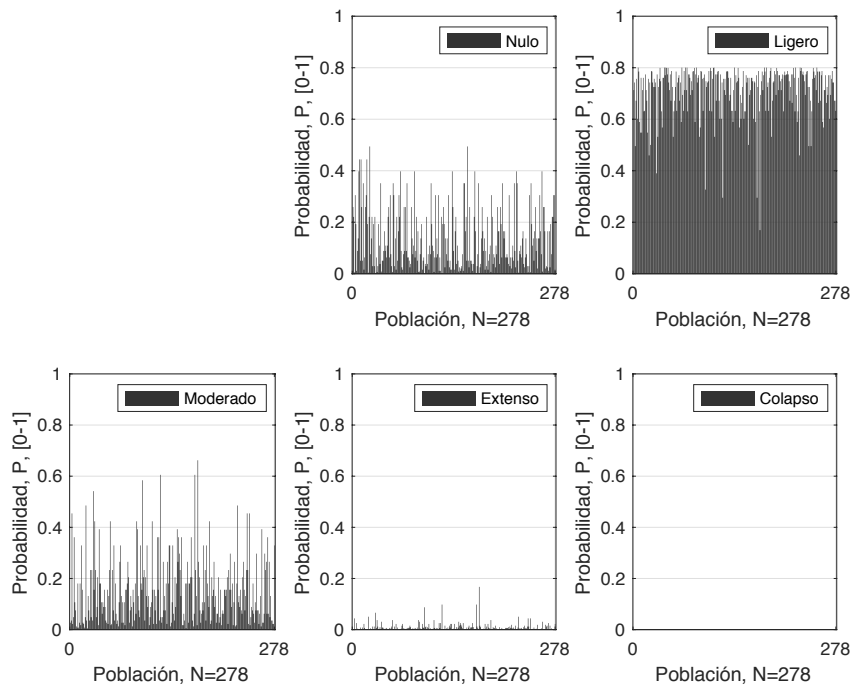


Fig. B-35 Probabilidades de pertenencia de los estados de daño nulo y no nulos para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0.141g, N2] (fuente: preparado por el autor)

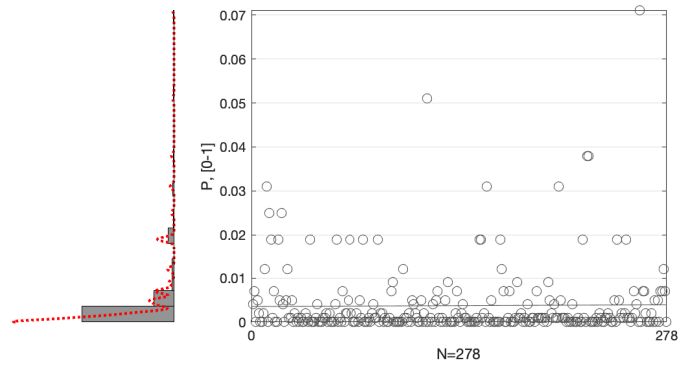


Fig. B-36 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Nulo para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0.141g, N2] (fuente: preparado por el autor)

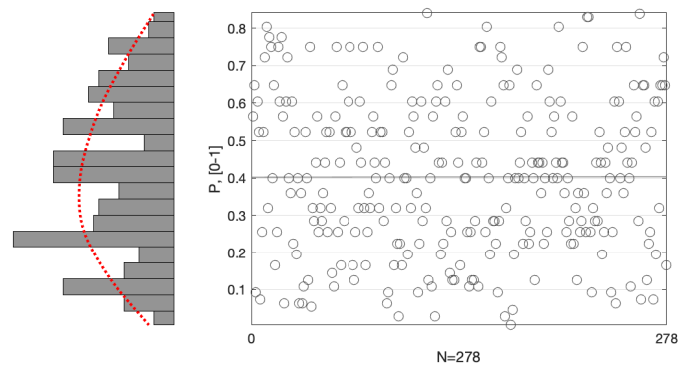


Fig. B-37 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Ligero para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0.141g, N2] (fuente: preparado por el autor)

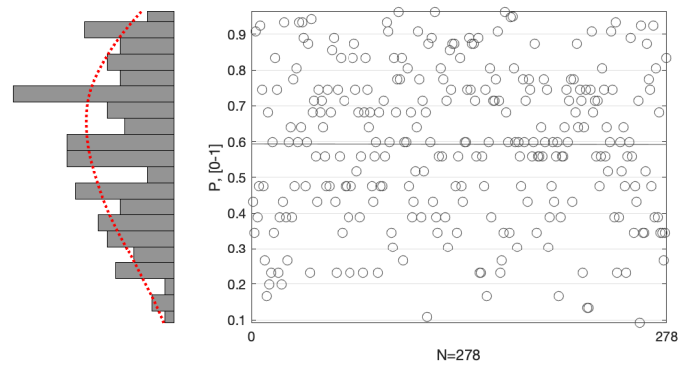


Fig. B-38 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Moderado para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0.141g, N2] (fuente: preparado por el autor)

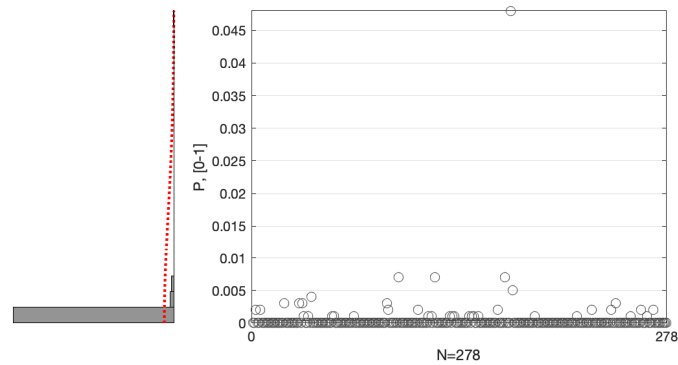


Fig. B-39 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Extenso para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0.141g, N2] (fuente: preparado por el autor)

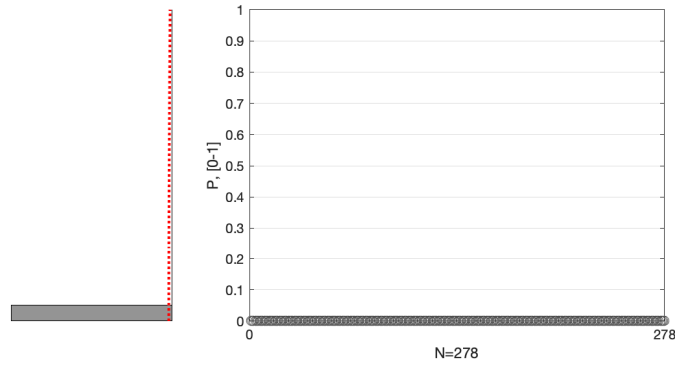


Fig. B-40 Probabilidades de pertenencia al estado de daño de Colapso para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0. 0.141g, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +X, pga = 0.194 g

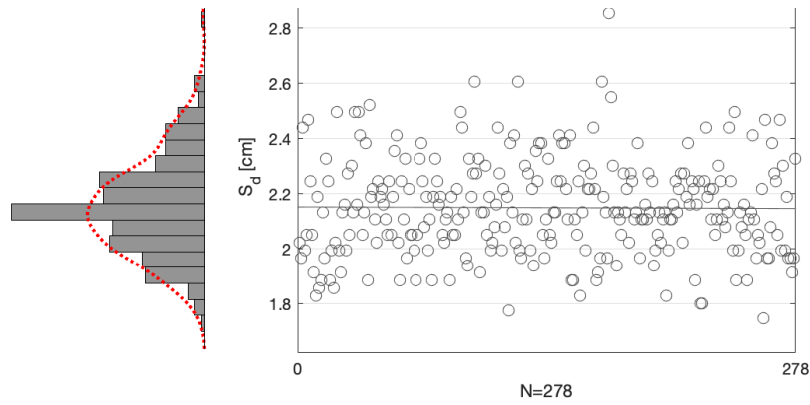


Fig. B-41 Desplazamientos espectrales, S_d , de los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.194g, N2] (fuente: preparado por el autor)

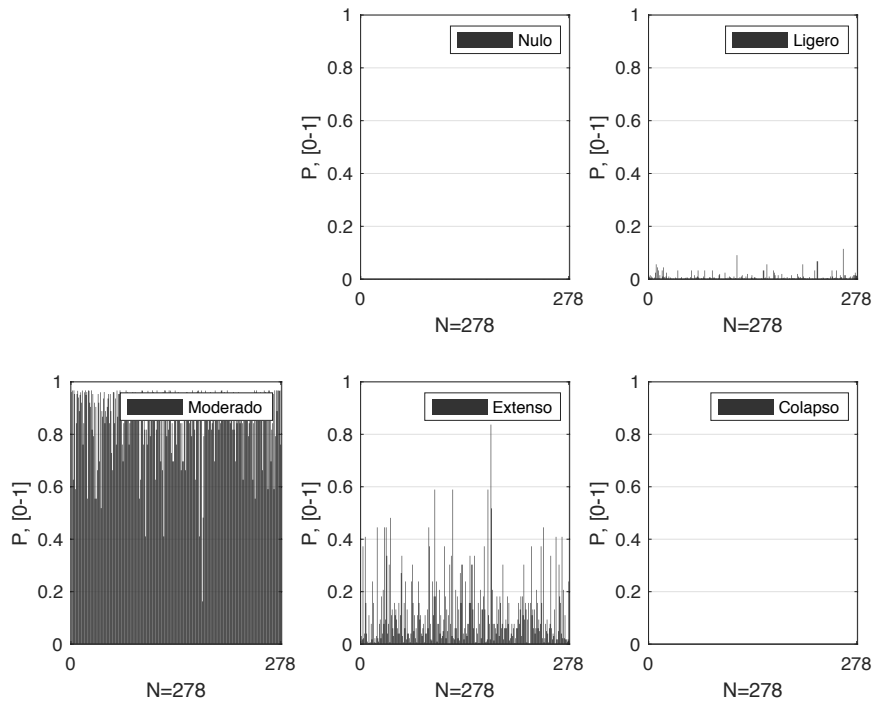


Fig. B-42 Probabilidades de pertenencia de los estados de daño nulo y no nulos para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.194g, N2] (fuente: preparado por el autor)

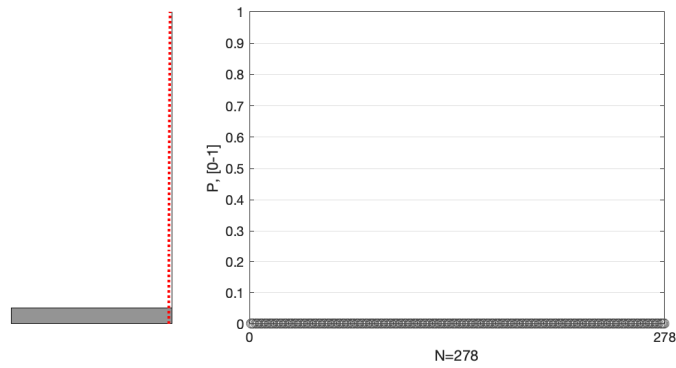


Fig. B-43 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Nulo para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.194g, N2] (fuente: preparado por el autor)

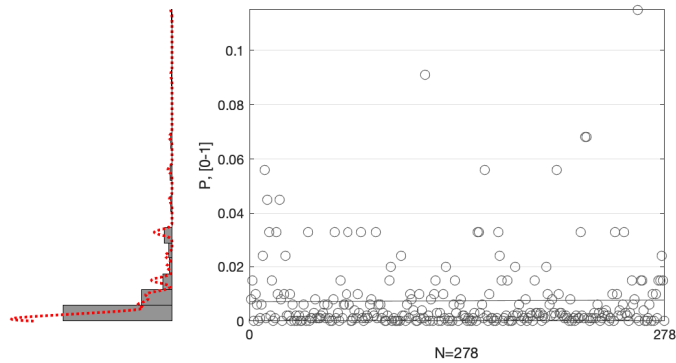


Fig. B-44 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Ligero para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.194g, N2] (fuente: preparado por el autor)

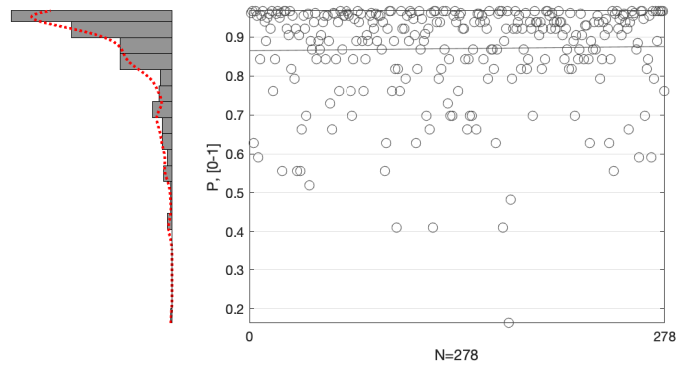


Fig. B-45 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Moderado para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.194g, N2] (fuente: preparado por el autor)

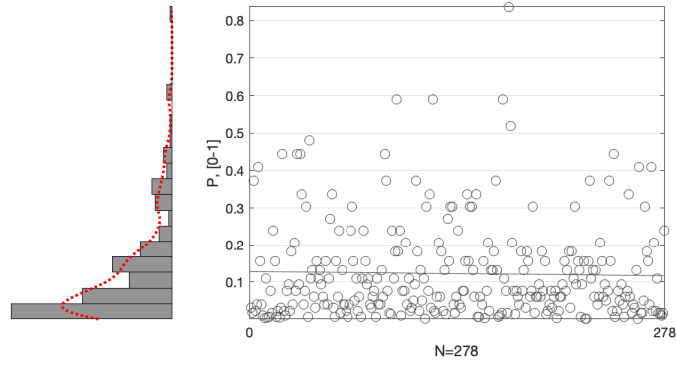


Fig. B-46 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Severo para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.194g, N2] (fuente: preparado por el autor)

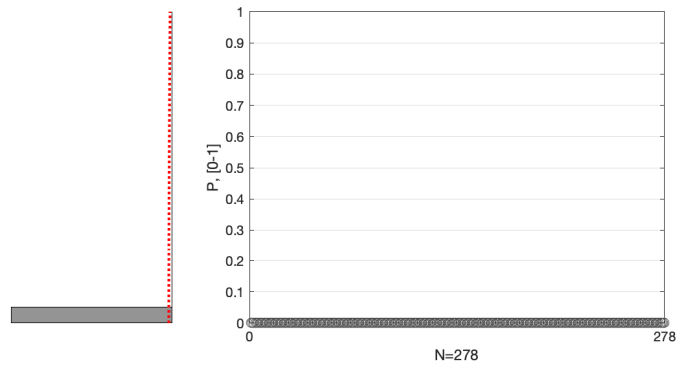


Fig. B-47 Probabilidades de pertenencia al estado de daño de Colapso para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.194g, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +Y, pga = 0.194 g

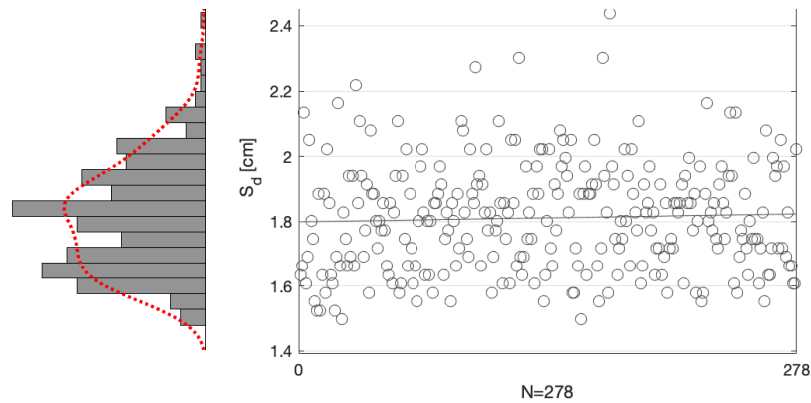


Fig. B-48 Desplazamientos espectrales, S_d , de los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0.194g, N2] (fuente: preparado por el autor)

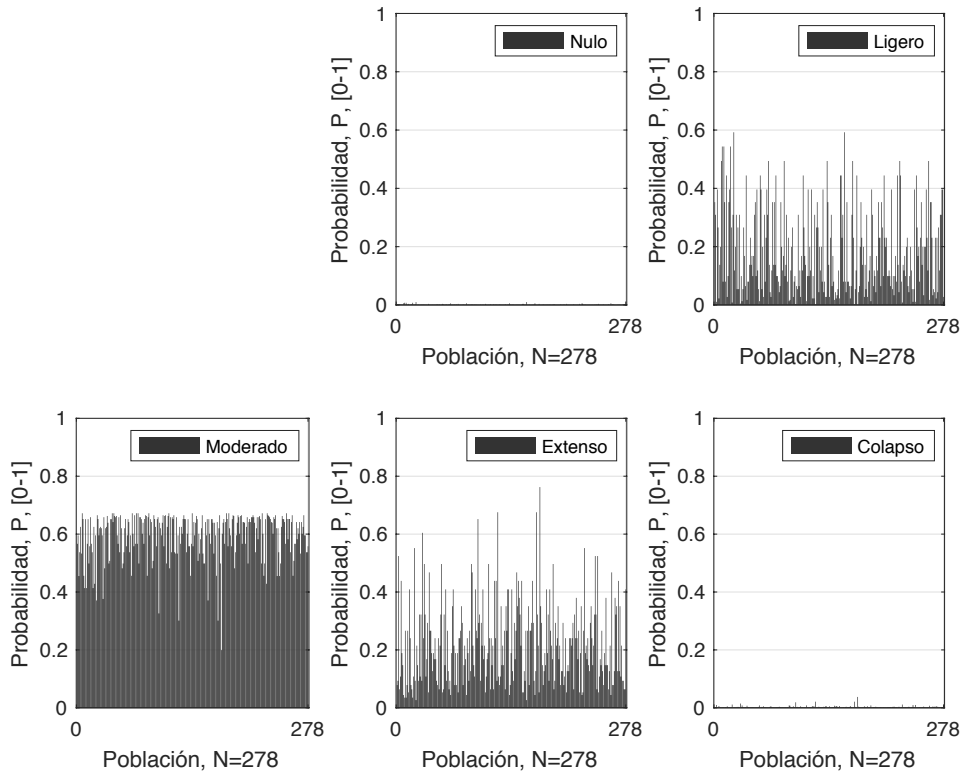


Fig. B-49 Probabilidades de pertenencia de los estados de daño nulo y no nulos para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0.194g, N2] (fuente: preparado por el autor)

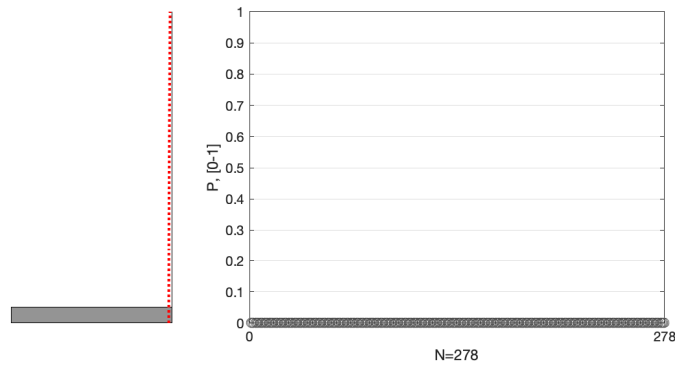


Fig. B-50 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Nulo para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0.194g, N2] (fuente: preparado por el autor)

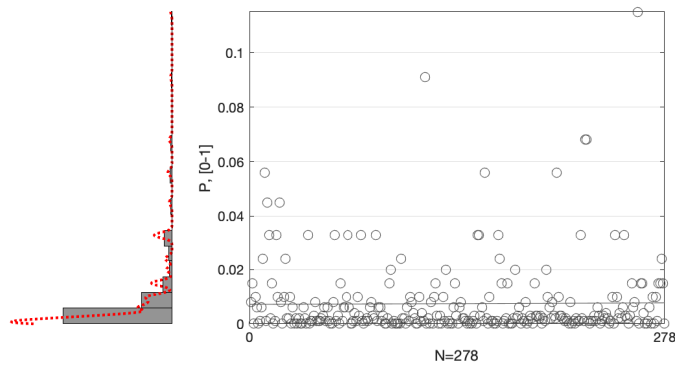


Fig. B-51 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Ligero para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0. 0. 194g, N2] (fuente: preparado por el autor)

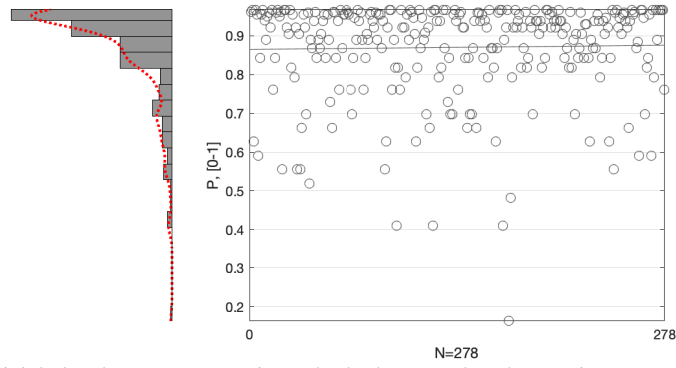


Fig. B-52 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Moderado para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0. 0. 194g, N2] (fuente: preparado por el autor)

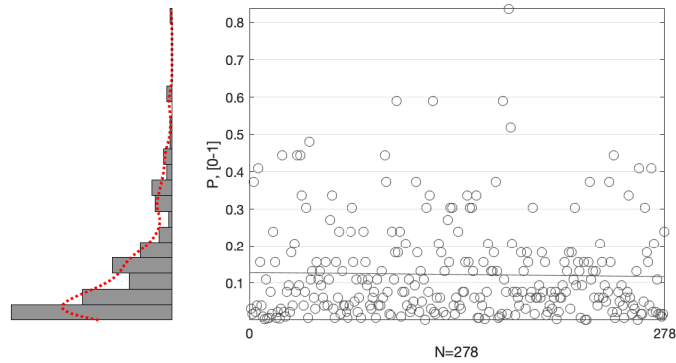


Fig. B-53 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Extenso para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0. 0. 194g, N2] (fuente: preparado por el autor)

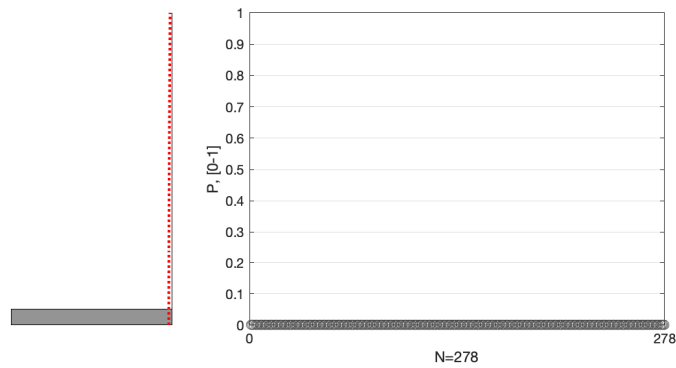


Fig. B-54 Probabilidades de pertenencia al estado de daño de Colapso para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0. 0. 194g, N2] (fuente: preparado por el autor)

B.1.3.4 Grado de daño medio

Dirección +X

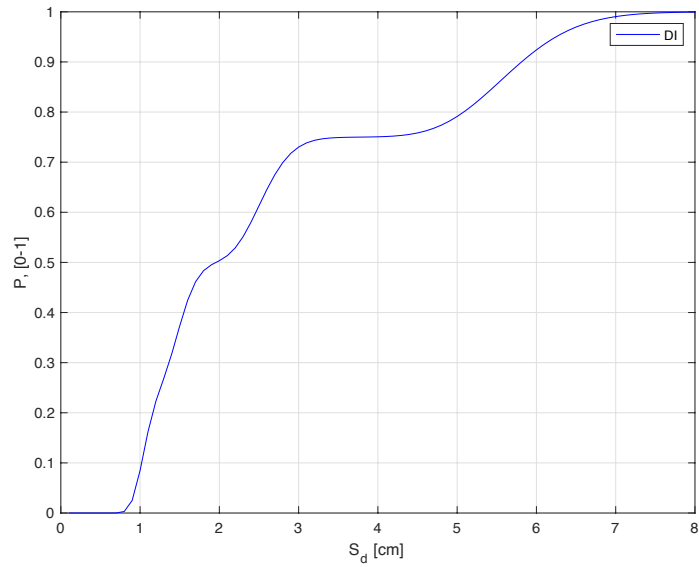


Fig. B-55 Curva del grado de daño medio (i.e. índice de Daño, DI) [Dir. +X, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +X, pga = 0.04 g

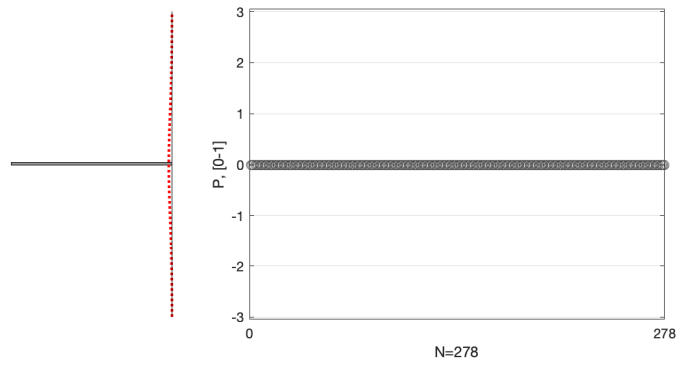


Fig. B-56 Probabilidades de ocurrencia de daño medio para los distintos puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.04g, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +X, pga = 0.141 g

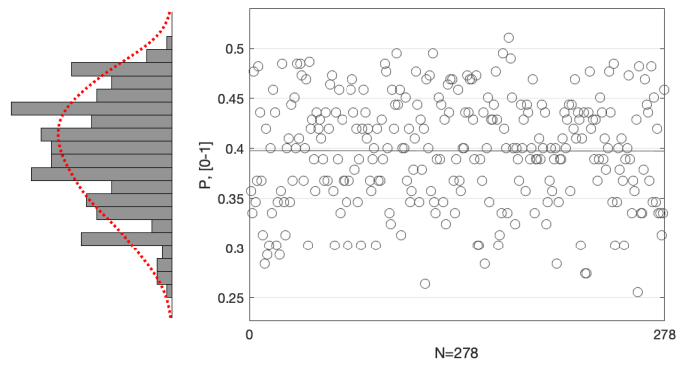


Fig. B-57 Probabilidades de ocurrencia de daño medio para los distintos puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.141g, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +X, pga = 0.194 g

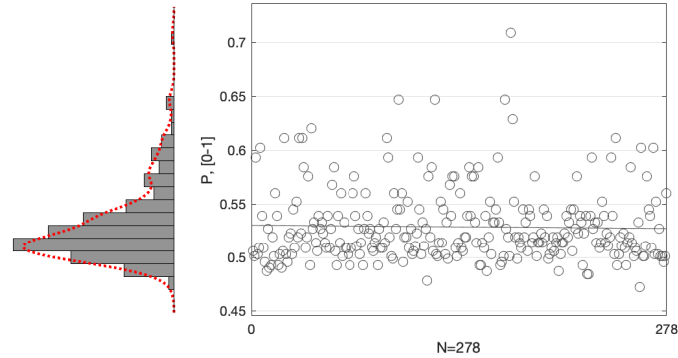


Fig. B-58 Probabilidades de ocurrencia de daño medio para los distintos puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.194g, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +Y

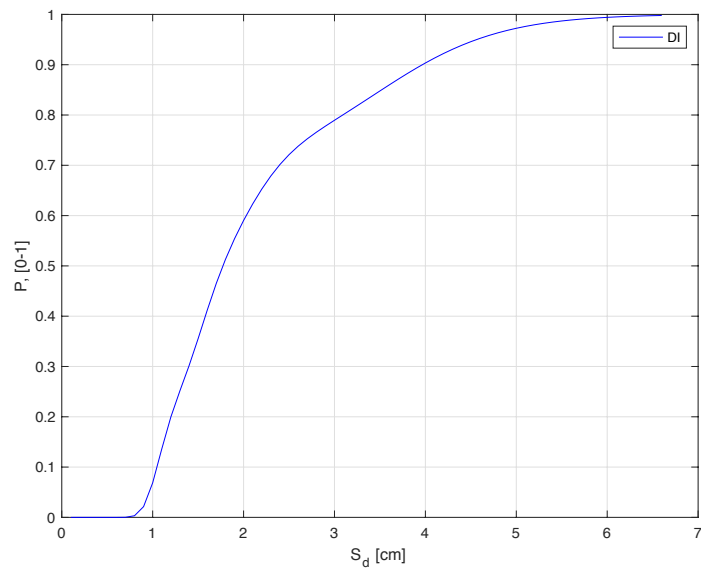


Fig. B-59 Curva del grado de daño medio (i.e. índice de Daño, DI) [Dir. +Y, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +Y, pga = 0.04 g

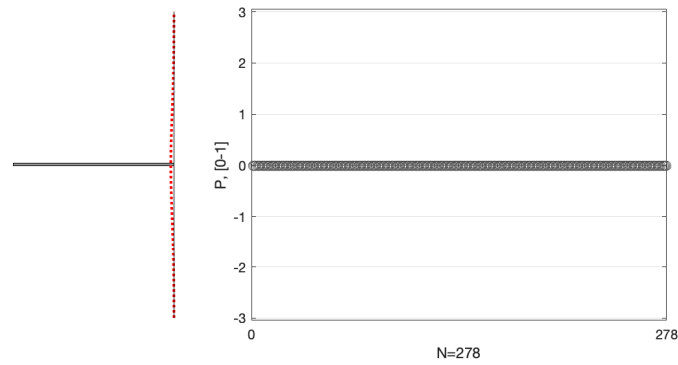


Fig. B-60 Probabilidades de ocurrencia de daño medio para los distintos puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0.04g, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +Y, pga = 0.141 g

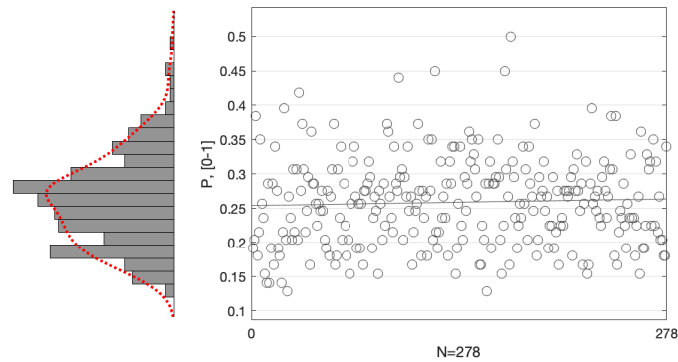


Fig. B-61 Probabilidades de ocurrencia de daño medio para los distintos puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0.141g, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +Y, pga = 0.194 g

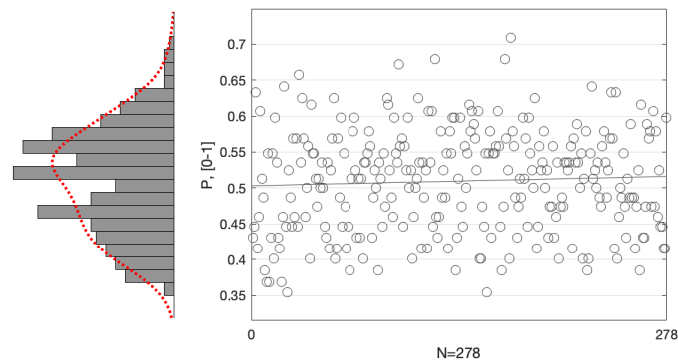


Fig. B-62 Probabilidades de ocurrencia de daño medio para los distintos puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0.194g, N2] (fuente: preparado por el autor)

B.1.4 Análisis dinámico incremental

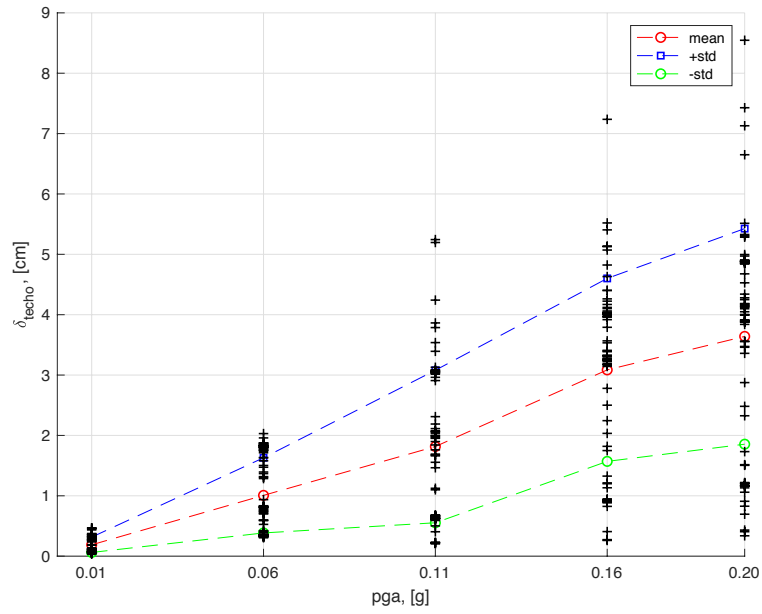


Fig. B-63 Desplazamiento en el techo vs pga de los distintos análisis dinámicos realizados en el edificio ED-01 en la dirección +X (fuente: preparado por el autor)

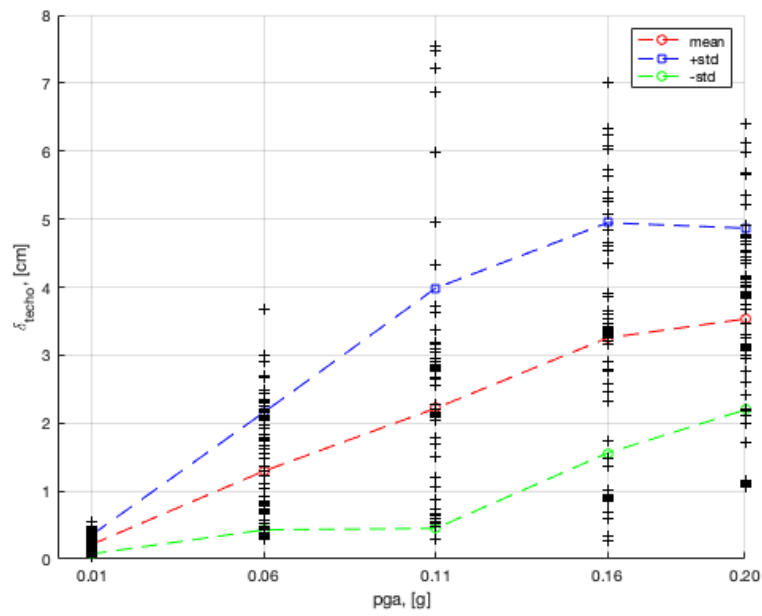


Fig. B-64 Desplazamiento en el techo vs pga de los distintos análisis dinámicos realizados en el edificio ED-01 en la dirección +Y (fuente: preparado por el autor)

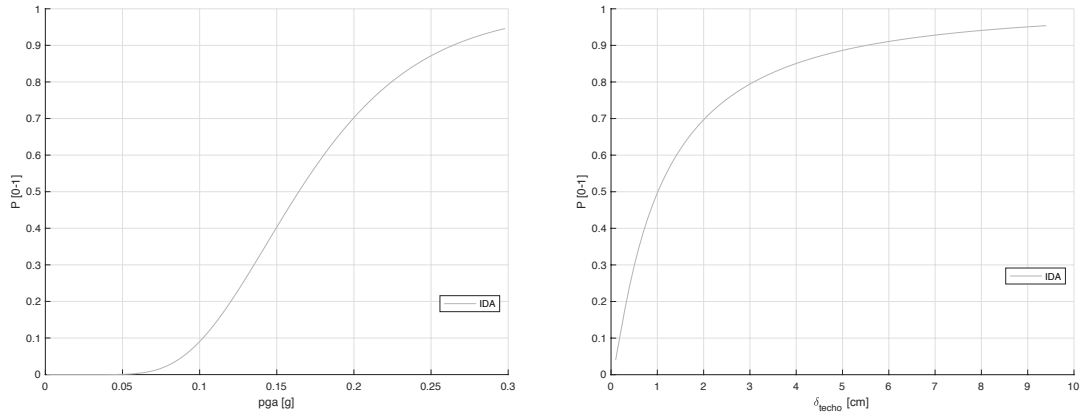


Fig. B-65 Curva de daño esperado para el edificio ED-01 y un $IM = pga$ (izq) ó $IM = S_d$ (der.) (fuente: preparado por el autor)

Tabla B-3 Estadísticas básicas de los desplazamientos en el techo, obtenidos para los conjuntos de puntos asociados a cada valor de pga del edificio ED-01 para cada dirección de análisis [cm] (fuente: preparado por el autor)

	Dir.	min	max	mean	median	std
$P_{0.01g}$	+X	0,04	0,55	0,22	0,19	0,14
	+Y	0,03	0,45	0,16	0,10	0,11
$P_{0.06g}$	+X	0,30	3,68	1,29	1,11	0,86
	+Y	0,31	2,03	0,89	0,71	0,55
$P_{0.11g}$	+X	0,30	7,55	2,22	2,13	1,77
	+Y	3,24	1,74	1,97	0,88	3,24
$P_{0.16g}$	+X	0,27	7,02	3,25	3,36	1,69
	+Y	3,99	2,23	2,47	1,17	3,99
$P_{0.20g}$	+X	6,41	3,53	3,87	1,34	6,41
	+Y	4,53	2,67	3,06	1,39	4,53

B.2 ED-02

B.2.1 Análisis modal

Tabla B-4 Resultados del análisis modal para el edificio aislado ED-02 (fuente: preparado por el autor)

# Modo	T [s]	f [rad/s]	ω [Hz]	Mx [kg]	My [kg]	Mz [kg]	ΣM [kg]
1	0,752	1,33	8,35	1128291,12	4,76	1,95	1128297,82
2	0,619	1,62	10,15	36,16	1130244,38	81,69	1130362,23
3	0,579	1,73	10,86	255174,43	70,44	2,44	255247,31
4	0,260	3,84	24,12	126447,59	0,08	0,49	126448,15
5	0,205	4,89	30,70	14,33	239337,92	436,33	239788,58
6	0,199	5,02	31,52	19693,39	108,80	0,55	19802,74
7	0,146	6,85	43,01	14220,10	2,92	95,83	14318,85
8	0,137	7,30	45,85	2,95	389,69	1193469,06	1193861,70
9	0,122	8,20	51,52	0,47	29399,17	82828,84	112228,48
10	0,116	8,65	54,32	5268,17	64,86	46,63	5379,67
11	0,113	8,82	55,39	1,41	65512,69	16610,98	82125,09
12	0,110	9,11	57,24	3008,14	73,35	13,68	3095,17
13	0,104	9,62	60,44	3,20	4,72	31,49	39,41
14	0,100	9,97	62,64	0,03	89,43	6757,01	6846,47
15	0,096	10,37	65,14	43,43	92,44	195,84	331,71

16	0,094	10,62	66,70	0,81	3337,83	6865,09	10203,72
17	0,090	11,12	69,84	513,23	36,35	5,71	555,30
18	0,089	11,30	70,98	327,87	77,69	6,86	412,42
19	0,087	11,52	72,39	186,93	196,86	3,89	387,68
20	0,086	11,63	73,05	0,20	7146,45	469,76	7616,41
21	0,083	12,00	75,41	0,43	1184,93	798,42	1983,78

Tabla B-5 Resultados del análisis modal para el edificio aislado ED-02 (continuación) (fuente: preparado por el autor)

# Modo	T [s]	IFx [%]	IFy [%]	IFz [%]	RAMx [%]	RAMy [%]	RAMz [%]	AAMx [%]	AAMy [%]	AAMz [%]
1	0,752	99,999	0,000	0,000	72,641	0,000	0,000	67,943	0,000	0,000
2	0,619	0,003	99,990	0,007	0,002	76,504	0,006	0,002	68,061	0,005
3	0,579	99,971	0,028	0,001	16,429	0,005	0,000	15,366	0,004	0,000
4	0,260	100,000	0,000	0,000	8,141	0,000	0,000	7,614	0,000	0,000
5	0,205	0,006	99,812	0,182	0,001	16,200	0,033	0,001	14,412	0,026
6	0,199	99,448	0,549	0,003	1,268	0,007	0,000	1,186	0,007	0,000
7	0,146	99,310	0,020	0,669	0,916	0,000	0,007	0,856	0,000	0,006
8	0,137	0,000	0,033	99,967	0,000	0,026	91,193	0,000	0,023	71,868
9	0,122	0,000	26,196	73,804	0,000	1,990	6,329	0,000	1,770	4,988
10	0,116	97,928	1,206	0,867	0,339	0,004	0,004	0,317	0,004	0,003
11	0,113	0,002	79,772	20,226	0,000	4,434	1,269	0,000	3,945	1,000
12	0,110	97,188	2,370	0,442	0,194	0,005	0,001	0,181	0,004	0,001
13	0,104	8,113	11,980	79,907	0,000	0,000	0,002	0,000	0,000	0,002
14	0,100	0,000	1,306	98,693	0,000	0,006	0,516	0,000	0,005	0,407
15	0,096	13,092	27,868	59,040	0,003	0,006	0,015	0,003	0,006	0,012
16	0,094	0,008	32,712	67,280	0,000	0,226	0,525	0,000	0,201	0,413
17	0,090	92,425	6,547	1,028	0,033	0,002	0,000	0,031	0,002	0,000
18	0,089	79,499	18,837	1,664	0,021	0,005	0,001	0,020	0,005	0,000
19	0,087	48,216	50,780	1,004	0,012	0,013	0,000	0,011	0,012	0,000
20	0,086	0,003	93,830	6,168	0,000	0,484	0,036	0,000	0,430	0,028
21	0,083	0,022	59,731	40,247	0,000	0,080	0,061	0,000	0,071	0,048

B.2.2 Análisis de capacidad

B.2.2.1 Curva de capacidad

Dirección +X

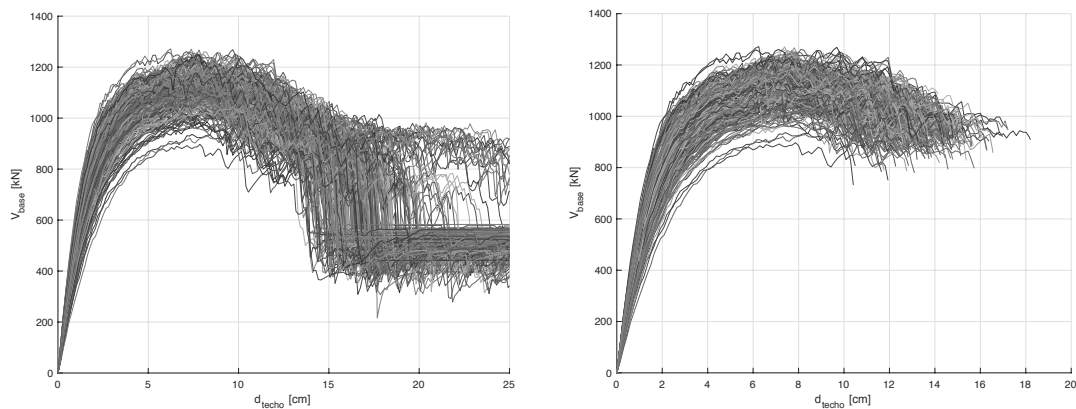


Fig. B-66 Curvas de capacidad originales (izq. – 3muri) y procesadas (der. - criterio de punto último) [Dir. +X] (fuente: preparado por el autor)

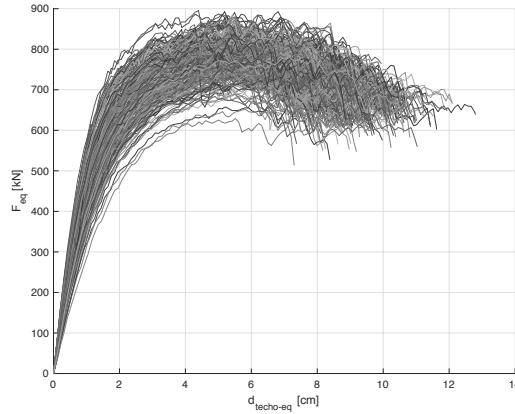


Fig. B-67 Curvas de capacidad de los sistemas equivalentes de 1GDL [Dir. +X, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +Y

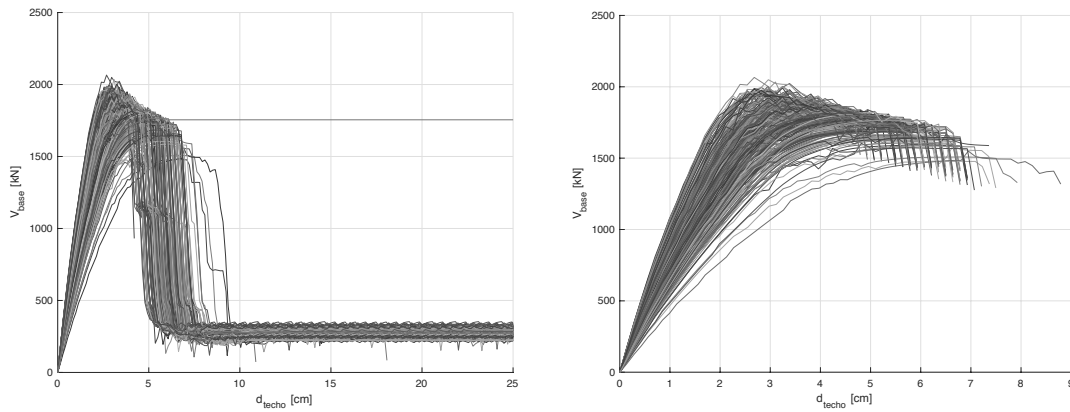


Fig. B-68 Curvas de capacidad originales (izq. - 3muri) y procesadas (der. - criterio de punto último) [Dir. +Y] (fuente: preparado por el autor)

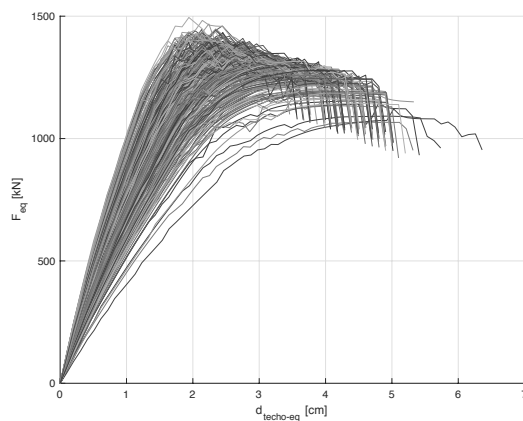


Fig. B-69 Curvas de capacidad de los sistemas equivalentes de 1GDL [Dir. +Y, N2] (fuente: preparado por el autor)

B.2.2.2 Curva de capacidad en formato aceleración-desplazamiento (ADRS)

Dirección +X

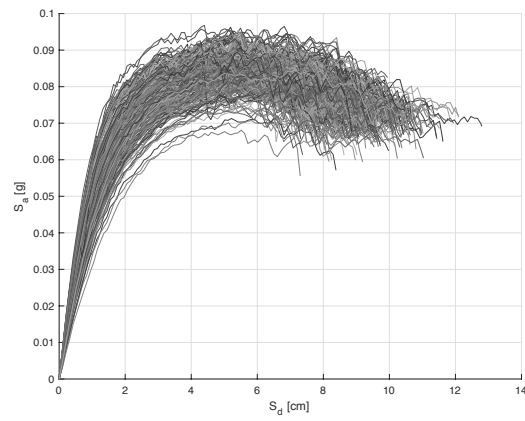


Fig. B-70 Curvas de capacidad en formato desplazamiento-aceleración (ADRS) [Dir. +Y, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +Y

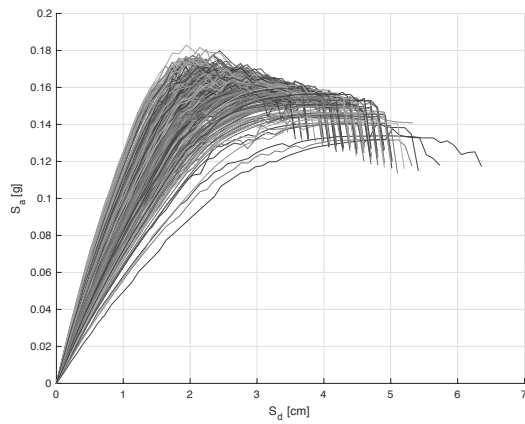


Fig. B-71 Curvas de capacidad en formato desplazamiento-aceleración (ADRS) [Dir. +Y, N2] (fuente: preparado por el autor)

B.2.2.3 Representación bilineal

Dirección +X

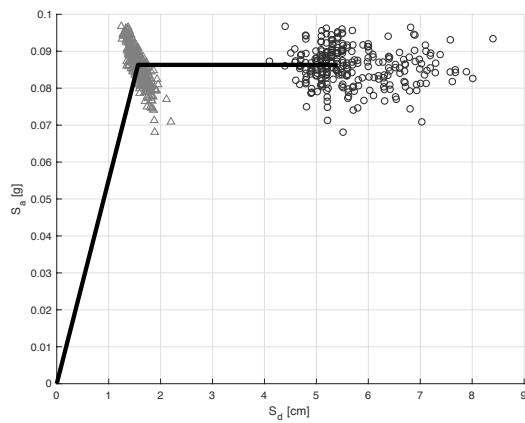


Fig. B-72 Representación bilineal promedio y nubes de valores de los puntos de fluencia y último [Dir. +X, N2]
(fuente: preparado por el autor)

Dirección +Y

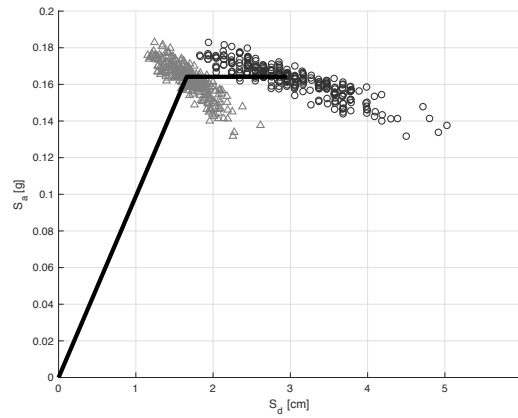


Fig. B-73 Representación bilineal promedio y nubes de valores de los puntos de fluencia y último [Dir. +Y, N2]
(fuente: preparado por el autor)

B.2.3 Fragilidad y daño esperado

B.2.3.1 Curvas de fragilidad

Dirección +X

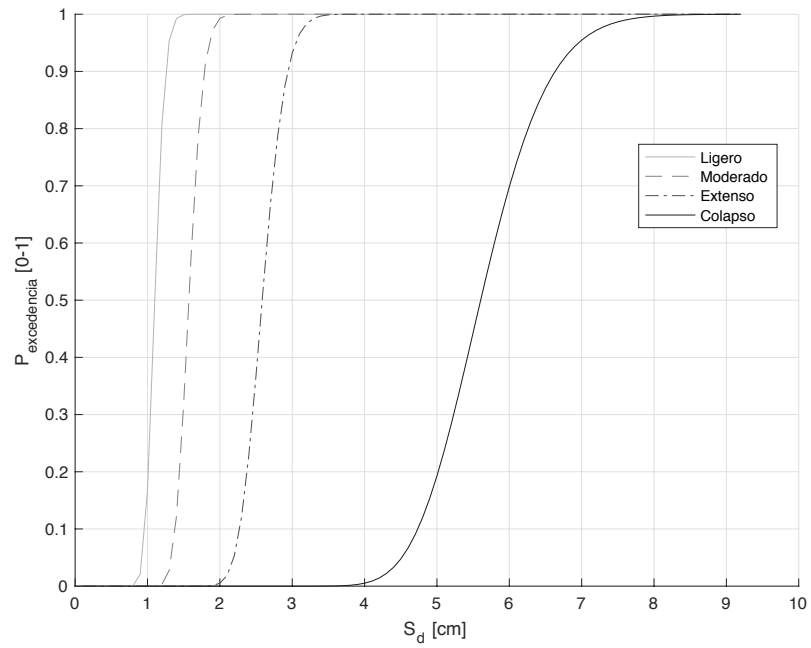


Fig. B-74 Curvas de fragilidad [Dir. +X, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +Y

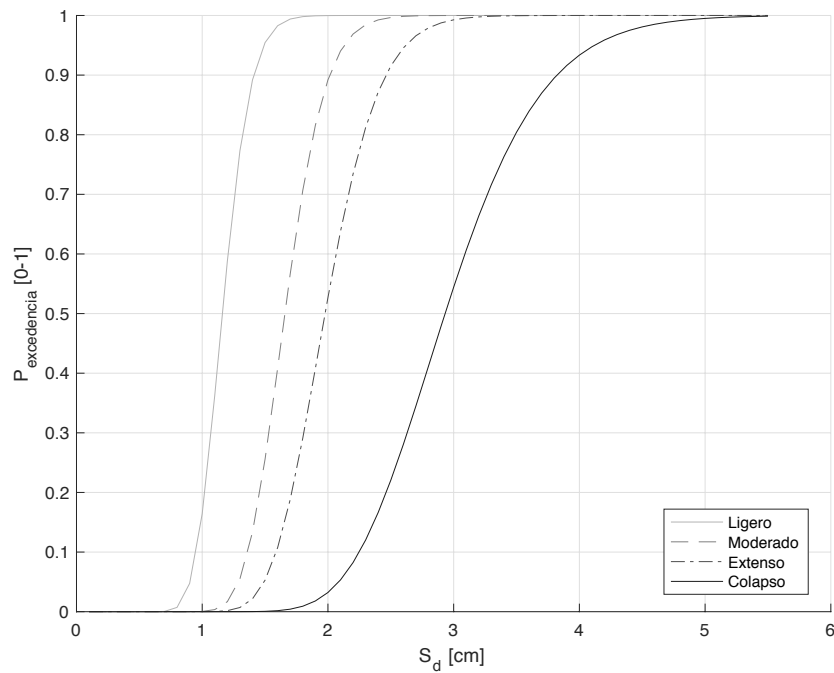


Fig. B-75 Curvas de fragilidad [Dir. +Y, N2] (fuente: preparado por el autor)

B.2.3.2 Estados de daño

Dirección +X

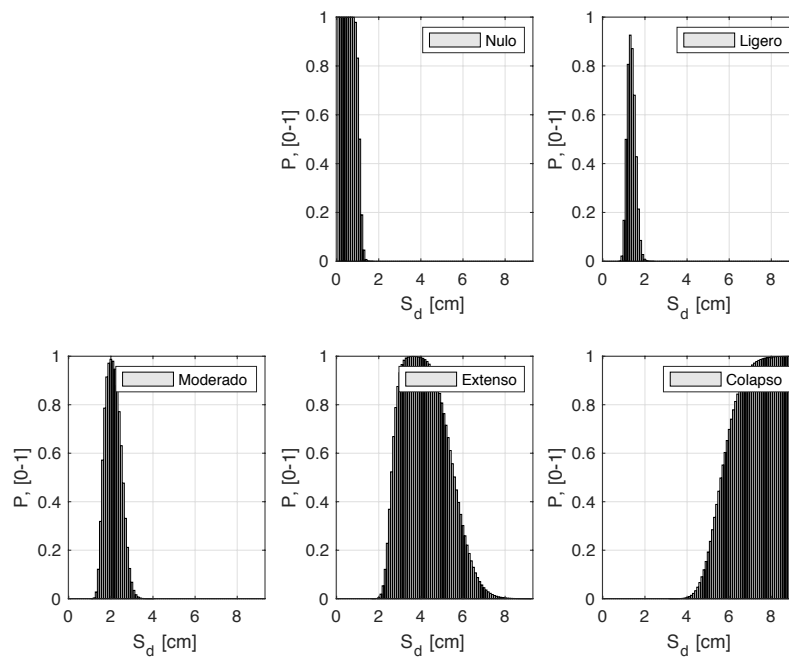


Fig. B-76 Probabilidades de ocurrencia de los distintos estados de daño para diversos desplazamientos espectrales posibles obtenidos a partir de las curvas de fragilidad [Dir. +X, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +Y

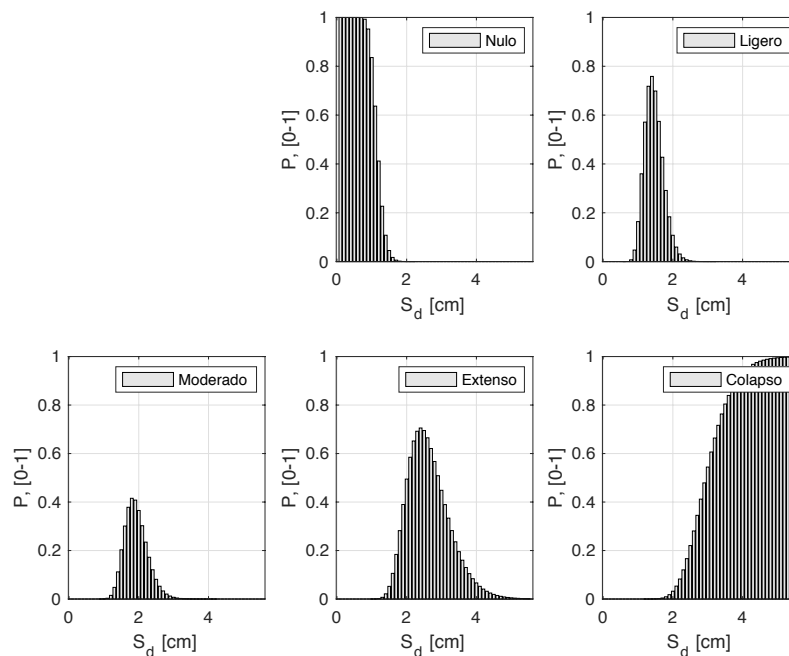


Fig. B-77 Probabilidades de ocurrencia de los distintos estados de daño para diversos desplazamientos espectrales posibles obtenidos a partir de las curvas de fragilidad [Dir. +Y, N2] (fuente: preparado por el autor)

B.2.3.3 Punto de desempeño

Dirección +X, pga = 0.04 g

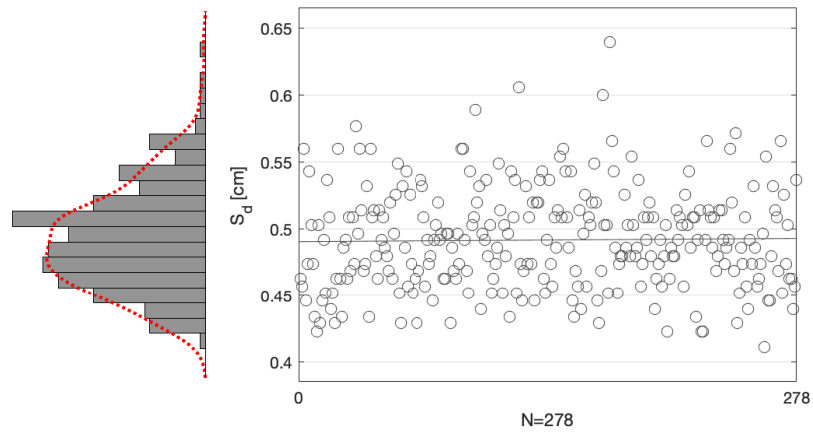


Fig. B-78 Desplazamientos espectrales, S_d , de los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.04g, N2] (fuente: preparado por el autor)

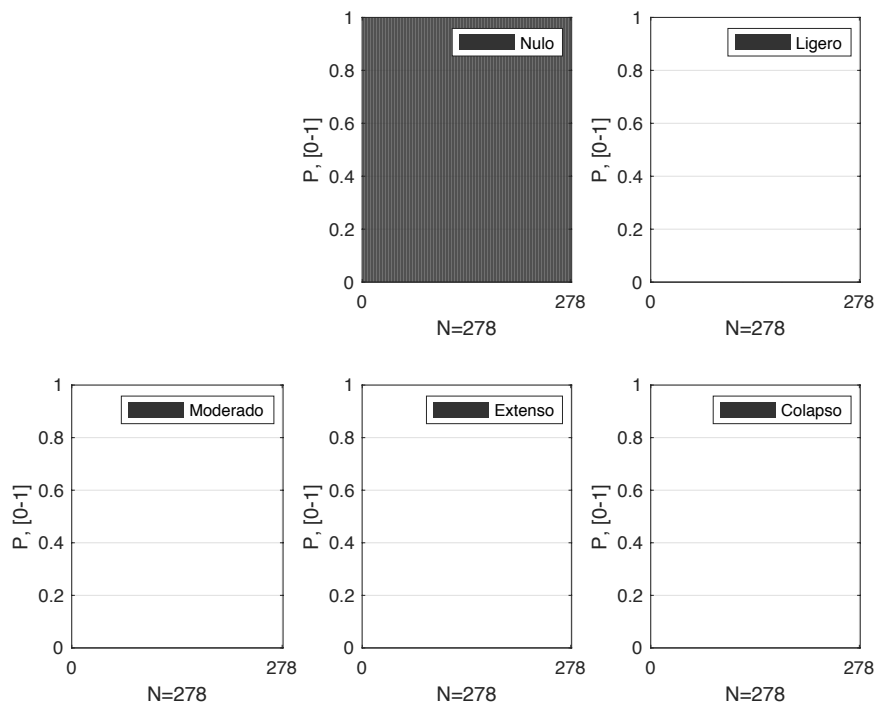


Fig. B-79 Probabilidades de pertenencia de los estados de daño nulo y no nulos para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.04g, N2] (fuente: preparado por el autor)

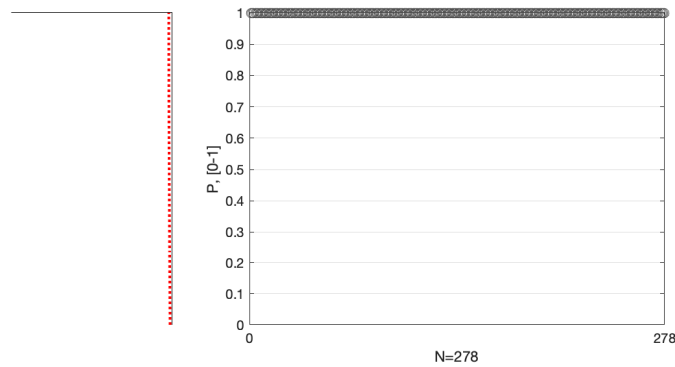


Fig. B-80 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Nulo para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, $p_{ga}=0.04g$, N2] (fuente: preparado por el autor)

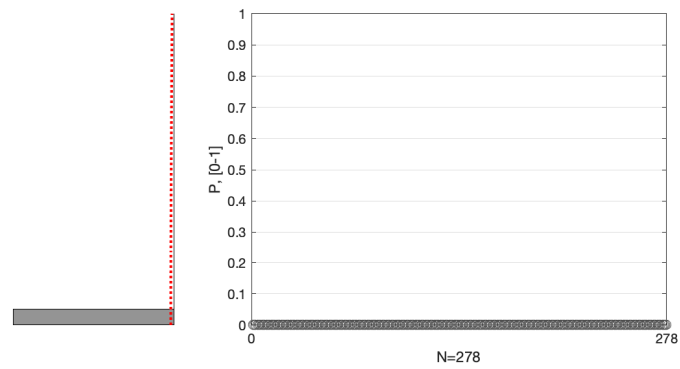


Fig. B-81 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Ligero para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, $p_{ga}=0.04g$, N2] (fuente: preparado por el autor)

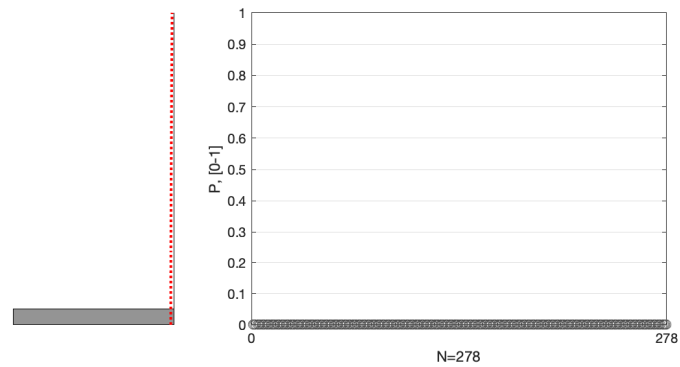


Fig. B-82 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Moderado para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, $p_{ga}=0.04g$, N2] (fuente: preparado por el autor)

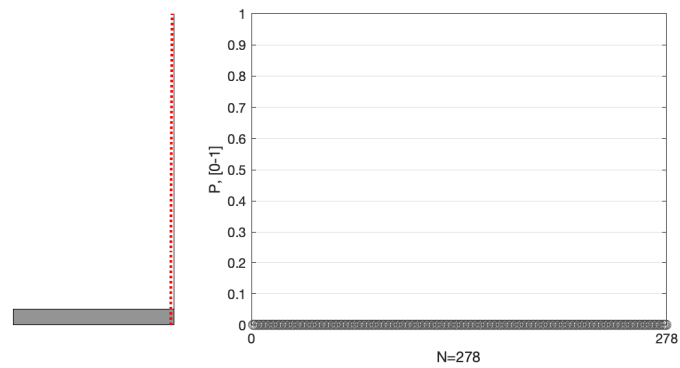


Fig. B-83 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Extenso para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, $p_{ga}=0.04g$, N2] (fuente: preparado por el autor)

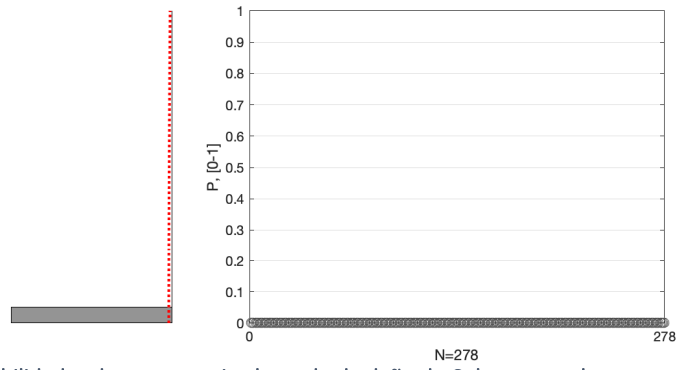


Fig. B-84 Probabilidades de pertenencia al estado de daño de Colapso para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.04g, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +Y, pga = 0.04 g

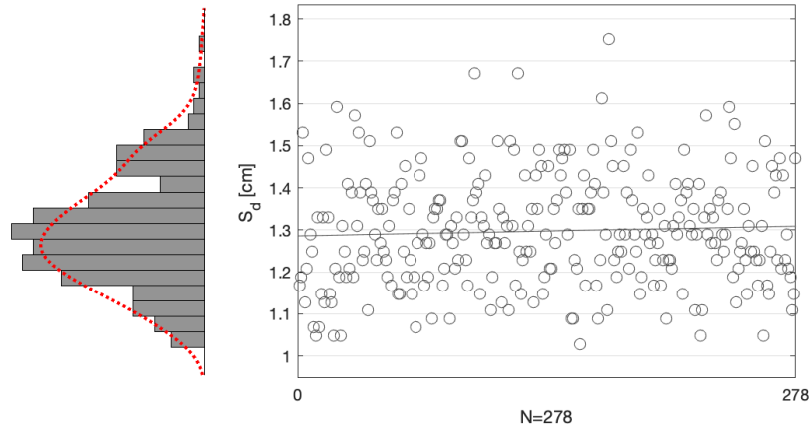


Fig. B-85 Desplazamientos espectrales, S_d , de los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0.04g, N2] (fuente: preparado por el autor)

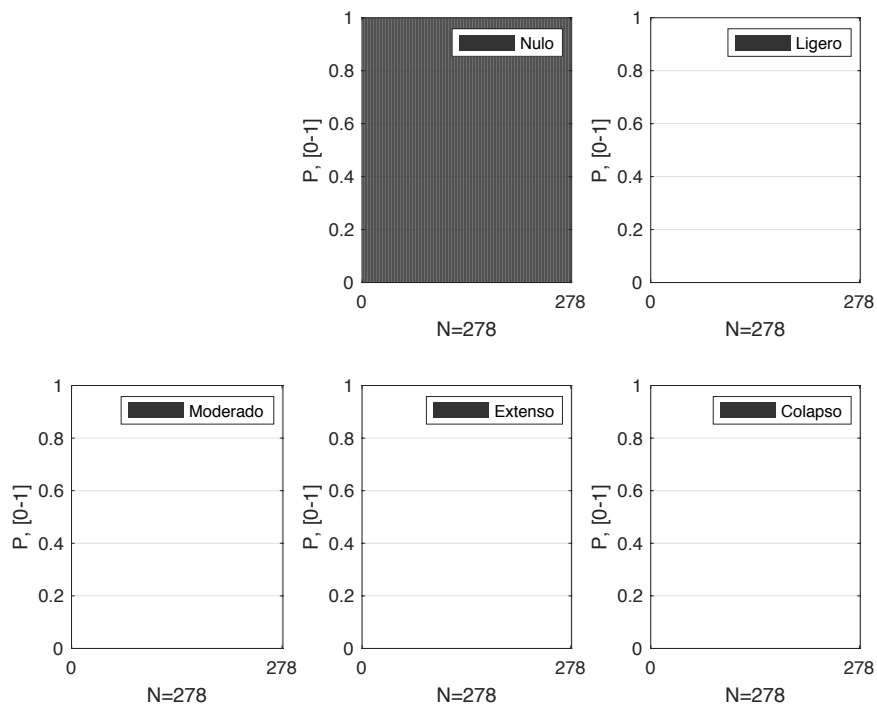


Fig. B-86 Probabilidades de pertenencia de los estados de daño nulo y no nulos para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0.04g, N2] (fuente: preparado por el autor)

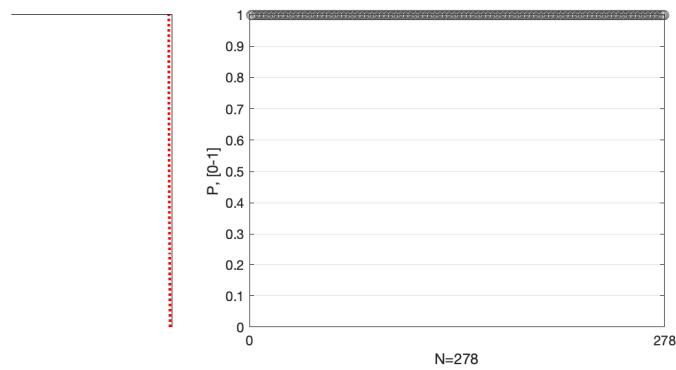


Fig. B-87 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Nulo para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0.04g, N2] (fuente: preparado por el autor)

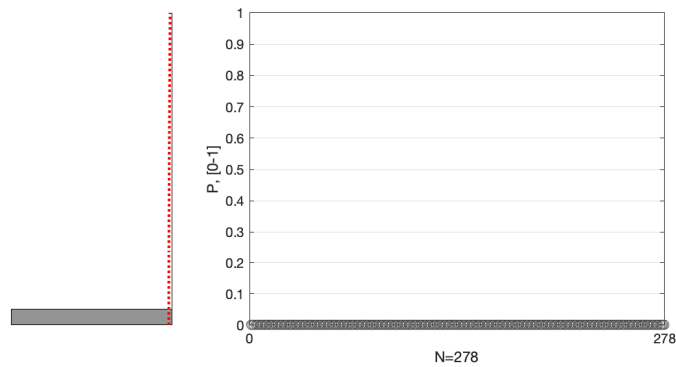


Fig. B-88 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Ligero para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0.04g, N2] (fuente: preparado por el autor)

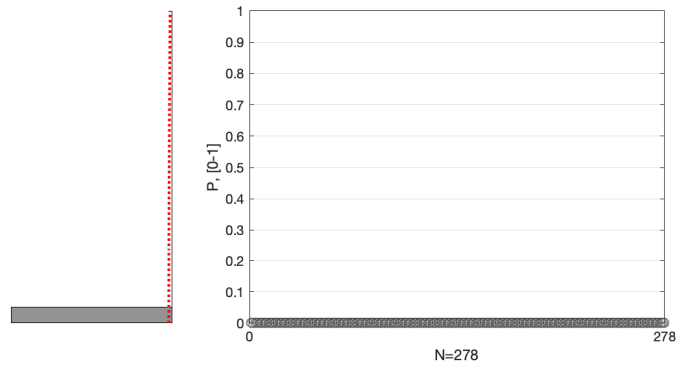


Fig. B-89 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Moderado para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0.04g, N2] (fuente: preparado por el autor)

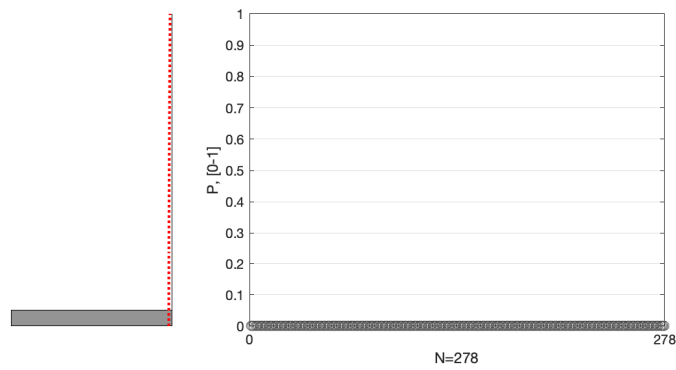


Fig. B-90 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Extenso para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0.04g, N2] (fuente: preparado por el autor)

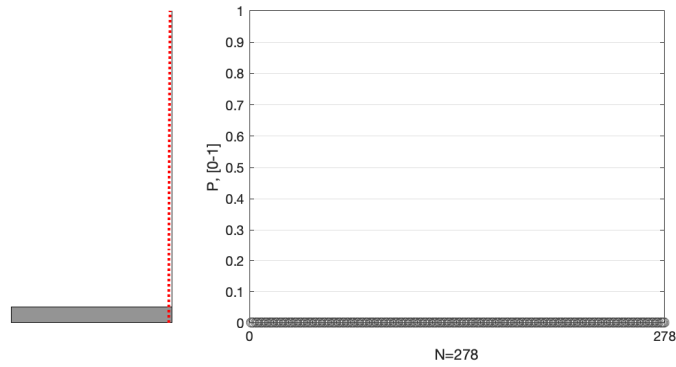


Fig. B-91 Probabilidades de pertenencia al estado de daño de Colapso para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0.04g, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +X, pga = 0.141 g

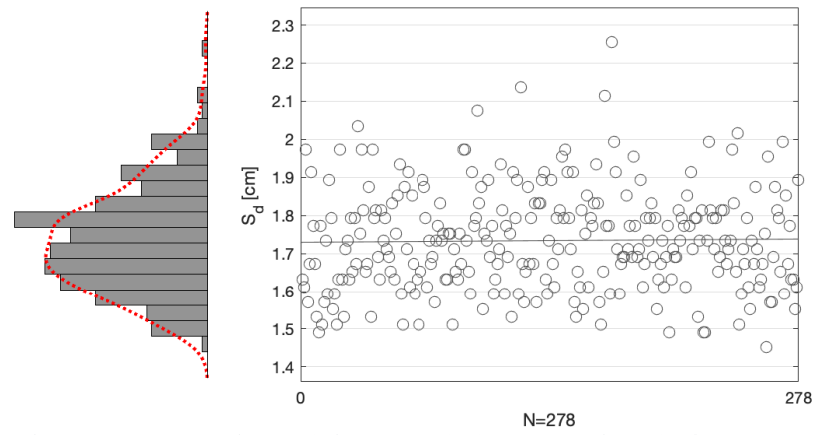


Fig. B-92 Desplazamientos espectrales, S_d , de los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.141g, N2] (fuente: preparado por el autor)

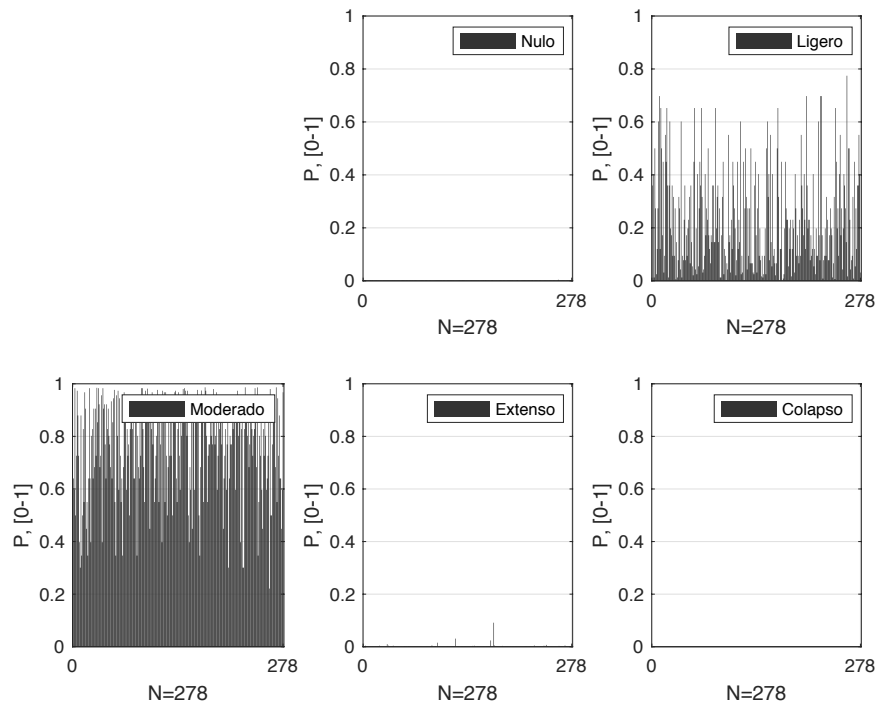


Fig. B-93 Probabilidades de pertenencia de los estados de daño nulo y no nulos para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.141g, N2] (fuente: preparado por el autor)

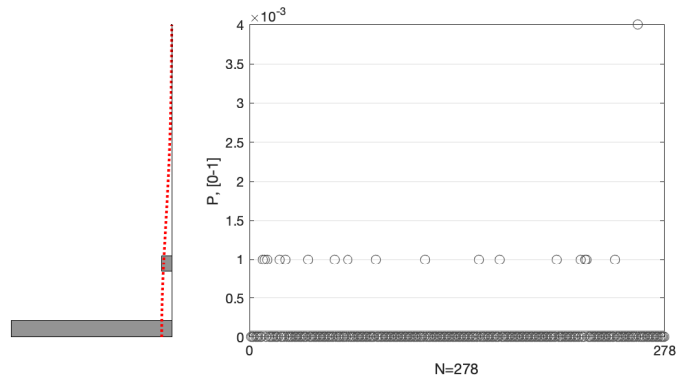


Fig. B-94 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Nulo para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.141g, N2] (fuente: preparado por el autor)

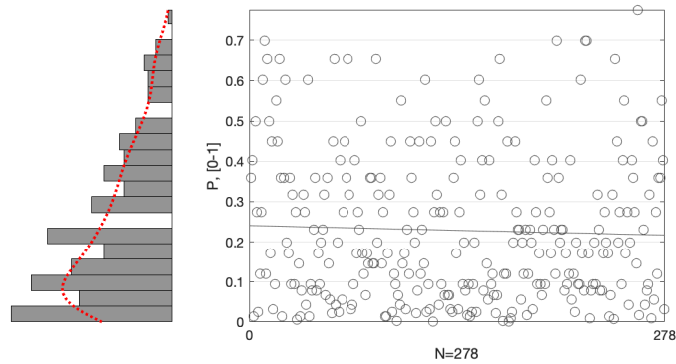


Fig. B-95 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Ligero para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0. 141g, N2] (fuente: preparado por el autor)

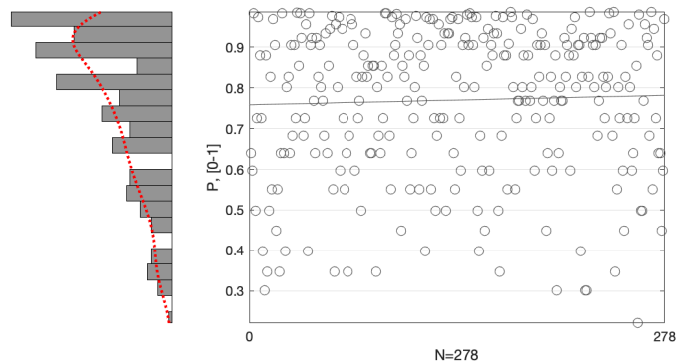


Fig. B-96 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Moderado para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0. 141g, N2] (fuente: preparado por el autor)

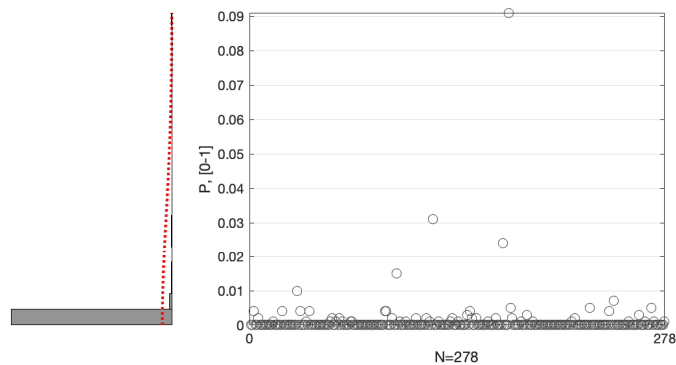


Fig. B-97 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Severo para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0. 141g, N2] (fuente: preparado por el autor)

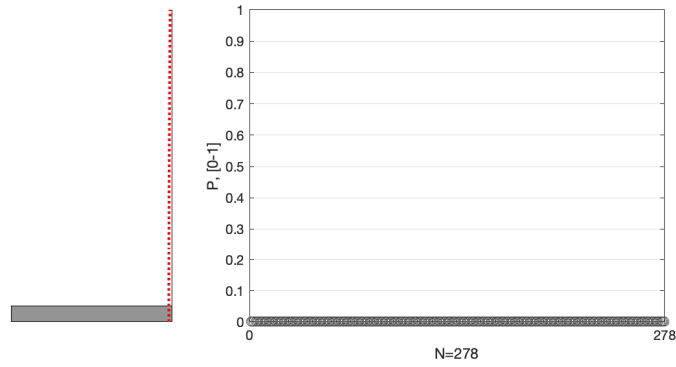


Fig. B-98 Probabilidades de pertenencia al estado de daño de Colapso para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.141g, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +Y, pga = 0.141 g

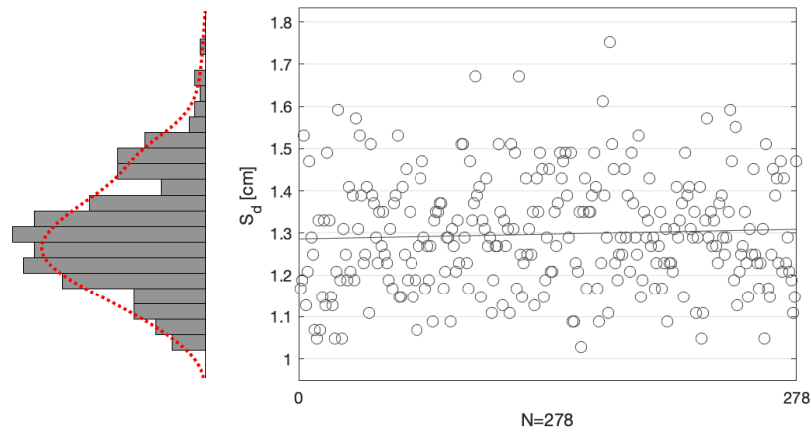


Fig. B-99 Desplazamientos espectrales, S_d , de los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0.141g, N2] (fuente: preparado por el autor)

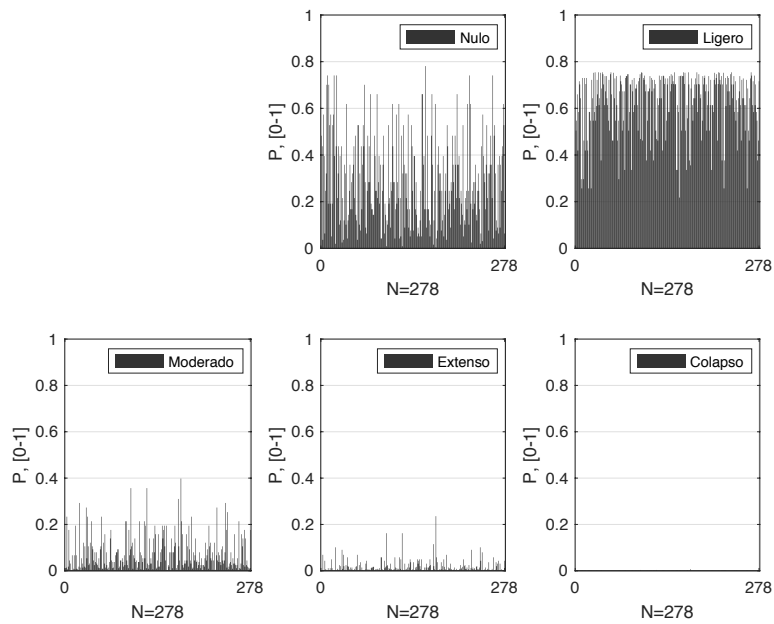


Fig. B-100 Probabilidades de pertenencia de los estados de daño nulo y no nulos para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0.141g, N2] (fuente: preparado por el autor)

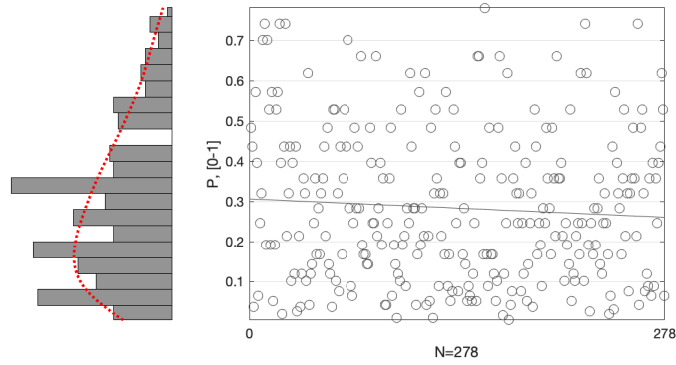


Fig. B-101 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Nulo para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0.141g, N2] (fuente: preparado por el autor)

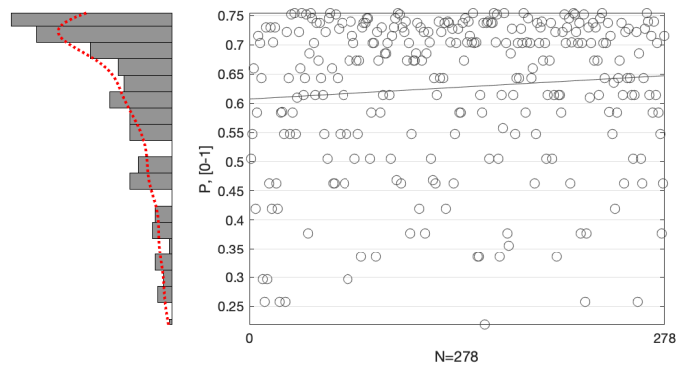


Fig. B-102 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Ligero para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0. 0.141g, N2] (fuente: preparado por el autor)

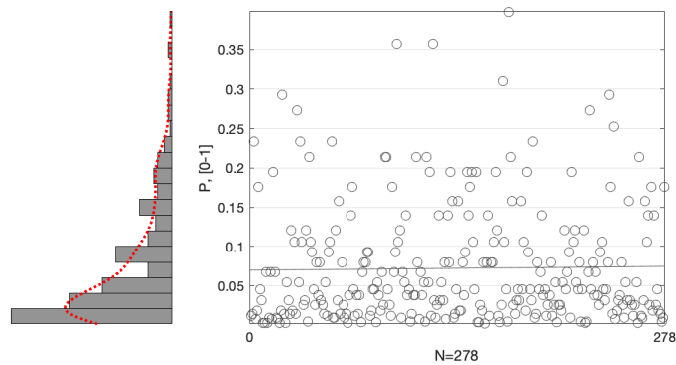


Fig. B-103 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Moderado para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0. 0.141g, N2] (fuente: preparado por el autor)

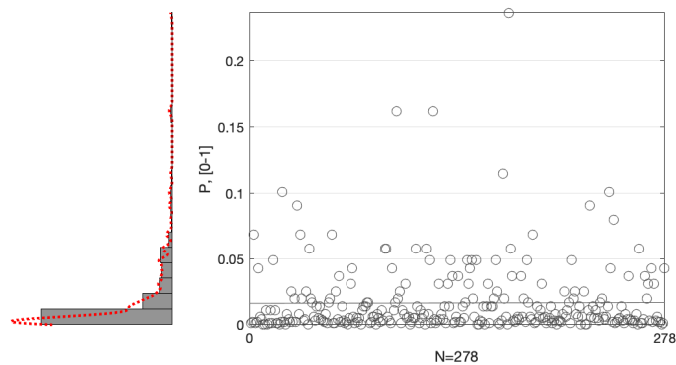


Fig. B-104 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Extenso para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0. 0.141g, N2] (fuente: preparado por el autor)

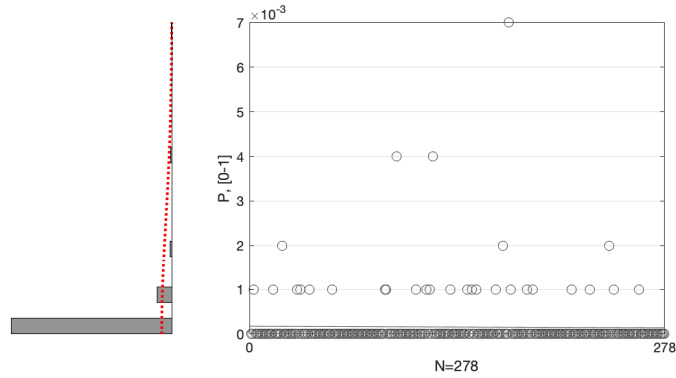


Fig. B-105 Probabilidades de pertenencia al estado de daño de Colapso para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0. 0.141g, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +X, pga = 0.194 g

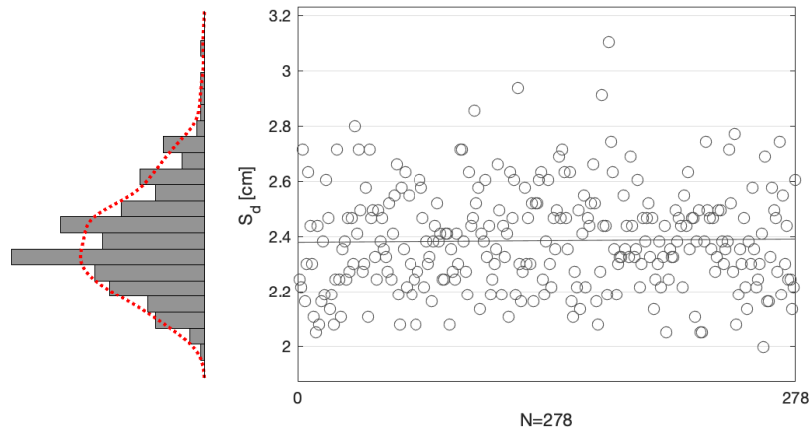


Fig. B-106 Desplazamientos espectrales, S_d , de los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.194g, N2] (fuente: preparado por el autor)

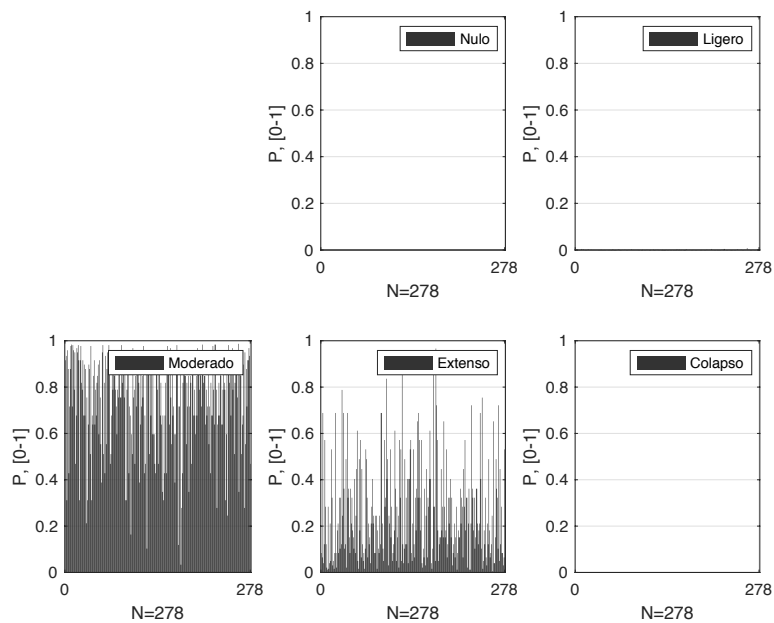


Fig. B-107 Probabilidades de pertenencia de los estados de daño nulo y no nulos para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.194g, N2] (fuente: preparado por el autor)

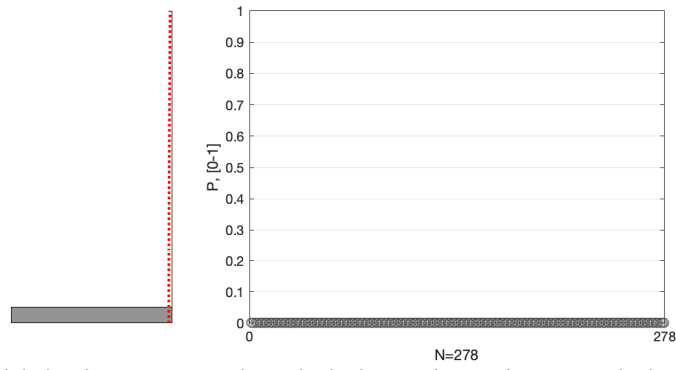


Fig. B-108 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Nulo para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.194g, N2] (fuente: preparado por el autor)

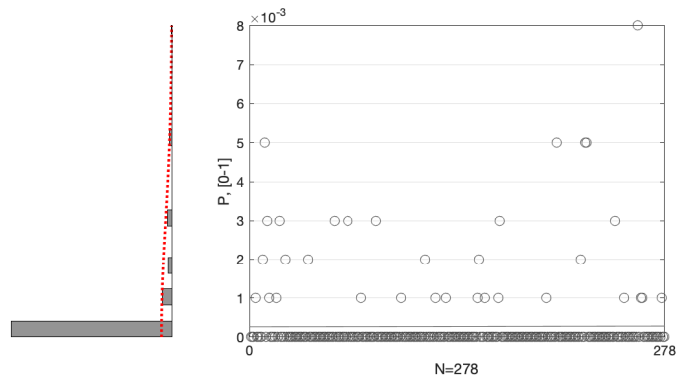


Fig. B-109 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Ligero para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.194g, N2] (fuente: preparado por el autor)

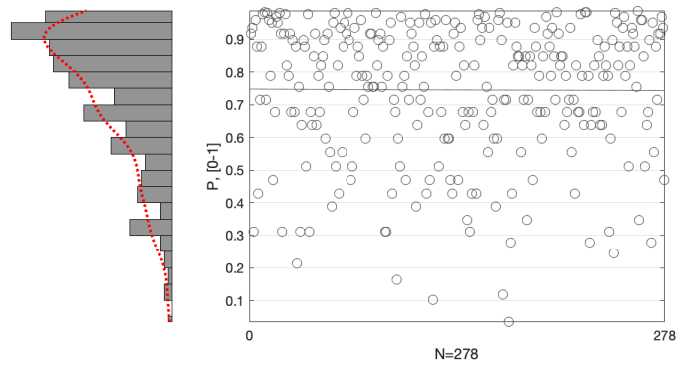


Fig. B-110 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Moderado para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.194g, N2] (fuente: preparado por el autor)

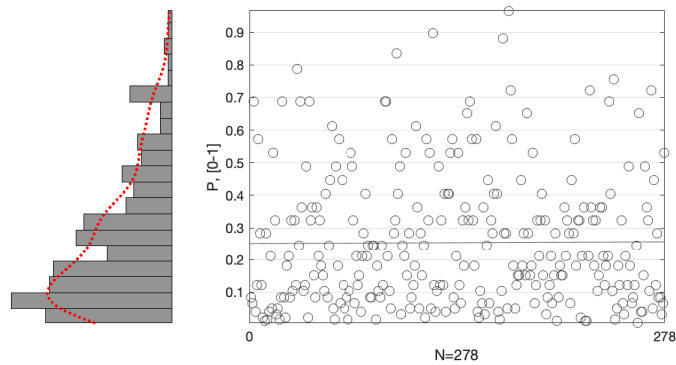


Fig. B-111 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Severo para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.194g, N2] (fuente: preparado por el autor)

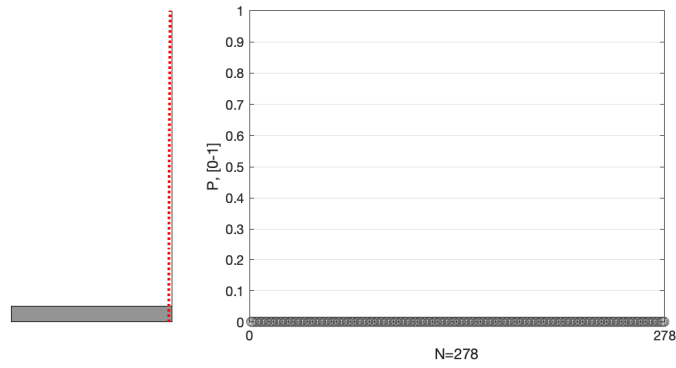


Fig. B-112 Probabilidades de pertenencia al estado de daño de Colapso para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.194g, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +Y, pga = 0. 194 g

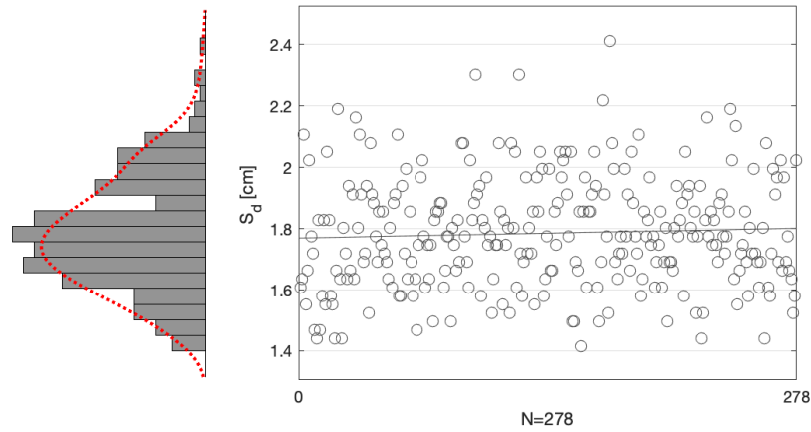


Fig. B-113 Desplazamientos espectrales, S_d , de los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0.194g, N2] (fuente: preparado por el autor)

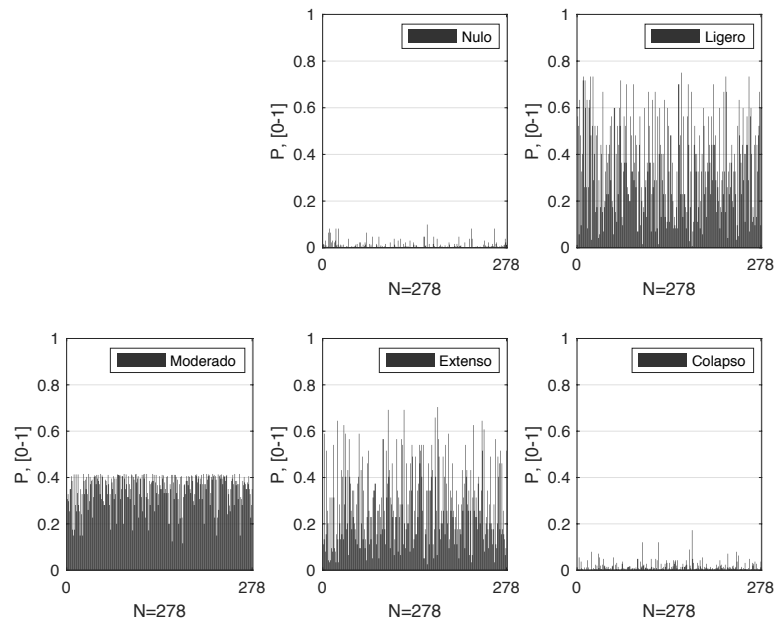


Fig. B-114 Probabilidades de pertenencia de los estados de daño nulo y no nulos para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0.194g, N2] (fuente: preparado por el autor)

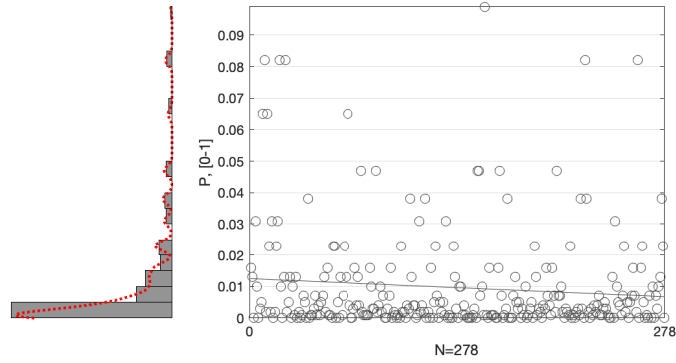


Fig. B-115 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Nulo para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0.194g, N2] (fuente: preparado por el autor)

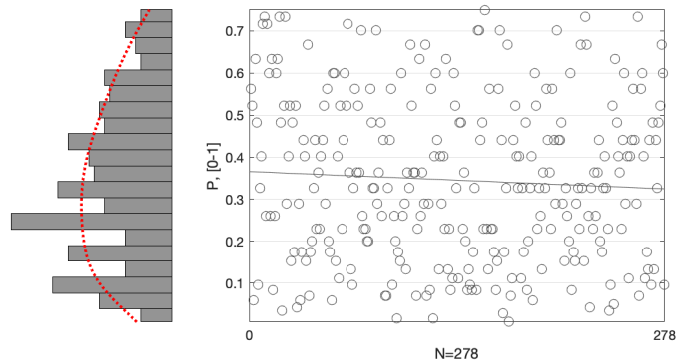


Fig. B-116 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Ligero para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0. 0. 194g, N2] (fuente: preparado por el autor)

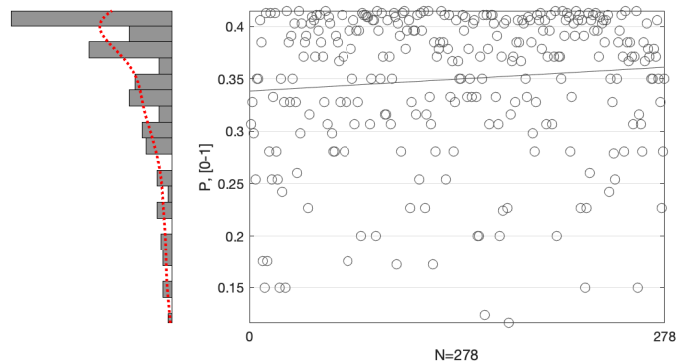


Fig. B-117 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Moderado para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0. 0. 194g, N2] (fuente: preparado por el autor)

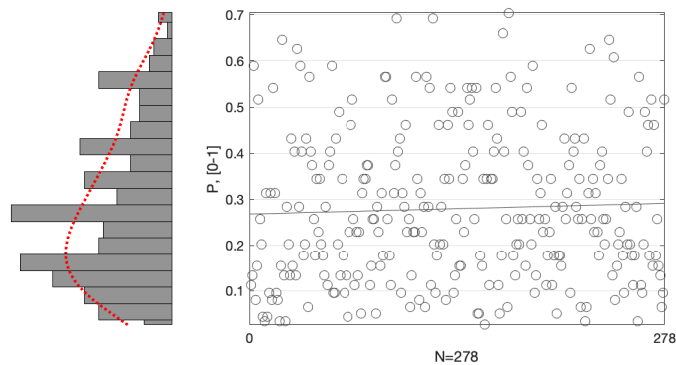


Fig. B-118 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Extenso para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0. 0. 194g, N2] (fuente: preparado por el autor)

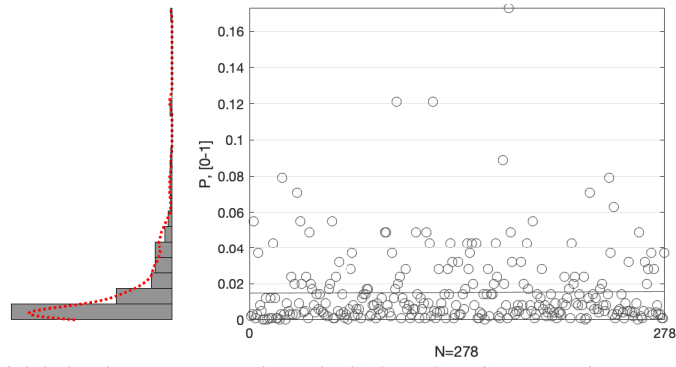


Fig. B-119 Probabilidades de pertenencia al estado de daño de Colapso para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0. 0. 194g, N2] (fuente: preparado por el autor)

B.2.3.4 Grado de daño medio

Dirección +X

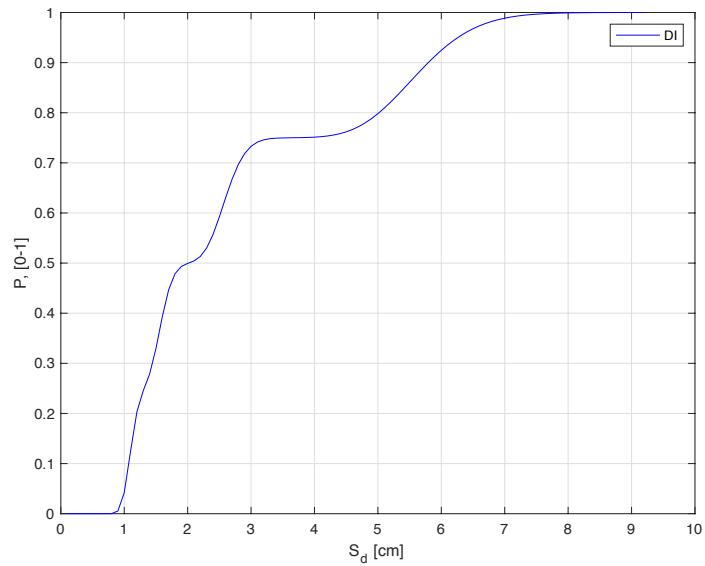


Fig. B-120 Curva del grado de daño medio (i.e. índice de Daño, DI) [Dir. +X, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +X, pga = 0.04 g

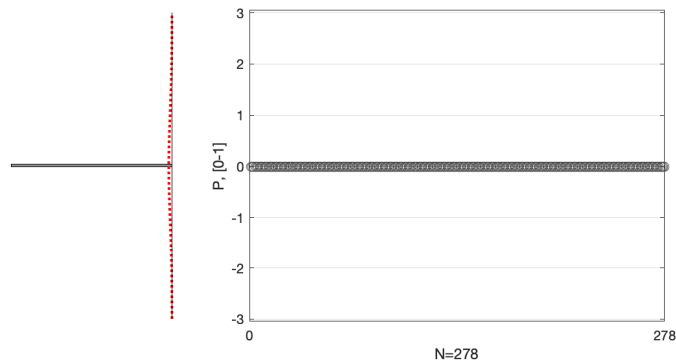


Fig. B-121 Probabilidades de ocurrencia de daño medio para los distintos puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.04g, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +X, $p_{ga} = 0.141 \text{ g}$

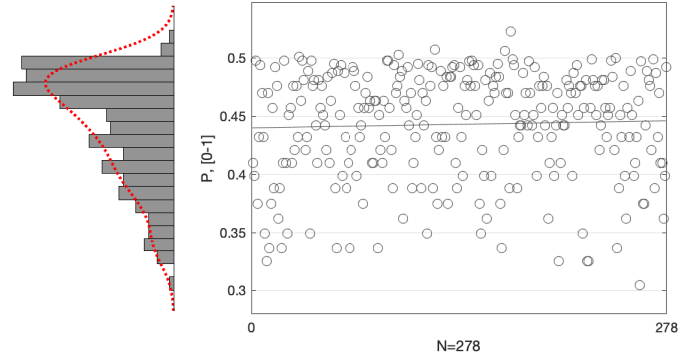


Fig. B-122 Probabilidades de ocurrencia de daño medio para los distintos puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, $p_{ga}= 0.141\text{g}$, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +X, $p_{ga} = 0.194 \text{ g}$

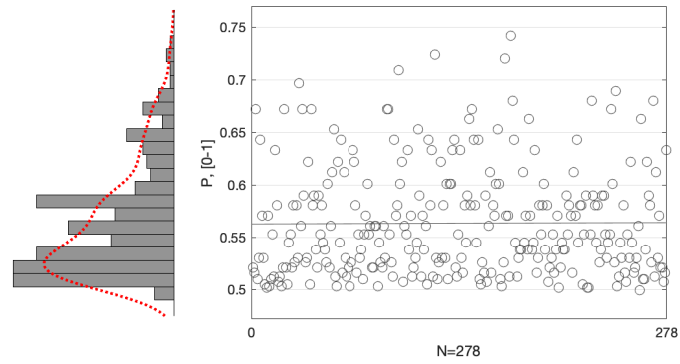


Fig. B-123 Probabilidades de ocurrencia de daño medio para los distintos puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, $p_{ga}= 0.194\text{g}$, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +Y

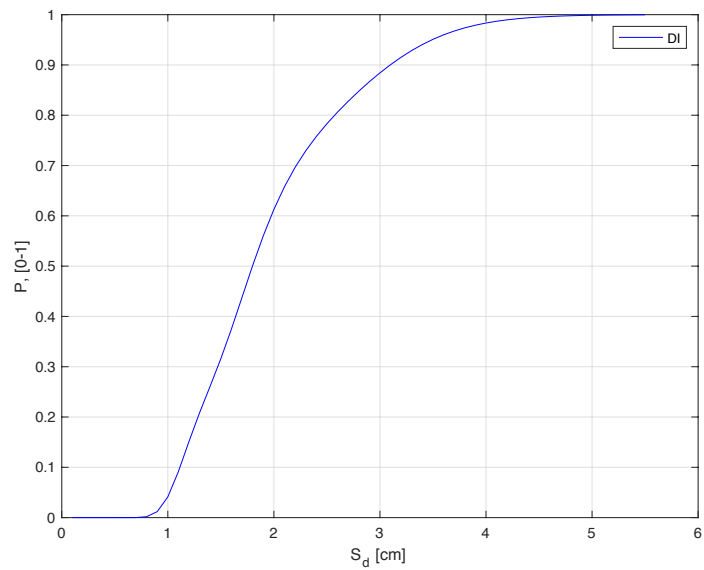


Fig. B-124 Curva del grado de daño medio (i.e. índice de Daño, DI) [Dir. +Y, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +Y, pga = 0.04 g

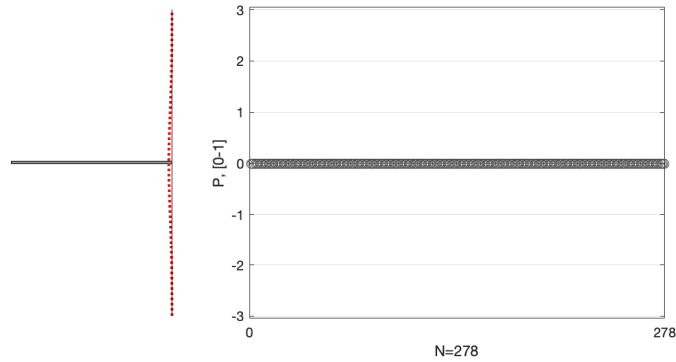


Fig. B-125 Probabilidades de ocurrencia de daño medio para los distintos puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0.04g, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +Y, pga = 0.141 g

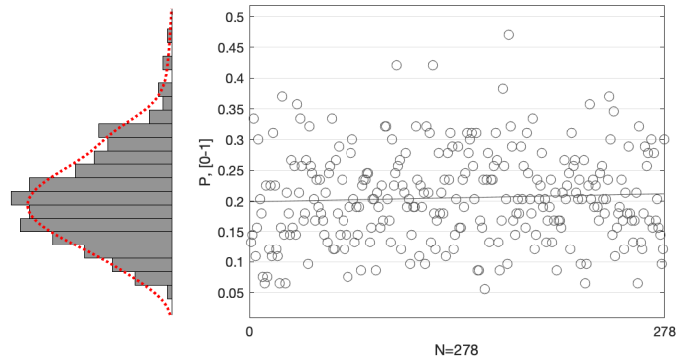


Fig. B-126 Probabilidades de ocurrencia de daño medio para los distintos puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0.141g, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +Y, pga = 0.194 g

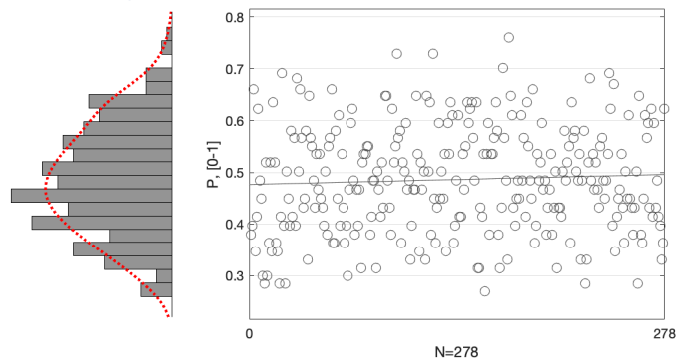


Fig. B-127 Probabilidades de ocurrencia de daño medio para los distintos puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0.194g, N2] (fuente: preparado por el autor)

B.2.4 Análisis dinámico incremental

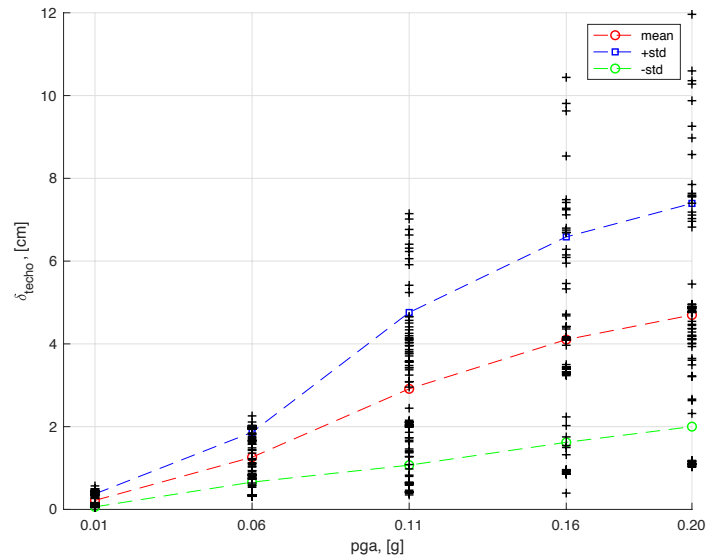


Fig. B-128 Desplazamiento en el techo vs pga de los distintos análisis dinámicos realizados en el edificio ED-02 en la dirección +X (fuente: preparado por el autor)

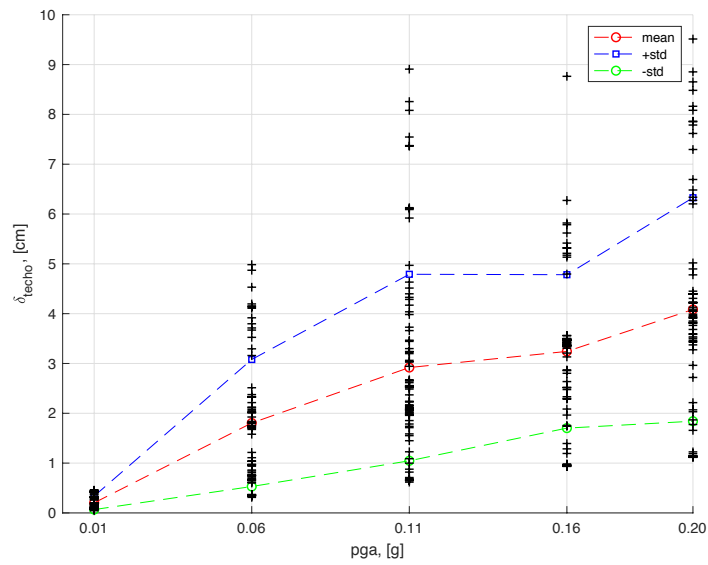


Fig. B-129 Desplazamiento en el techo vs pga de los distintos análisis dinámicos realizados en el edificio ED-02 en la dirección +Y (fuente: preparado por el autor)

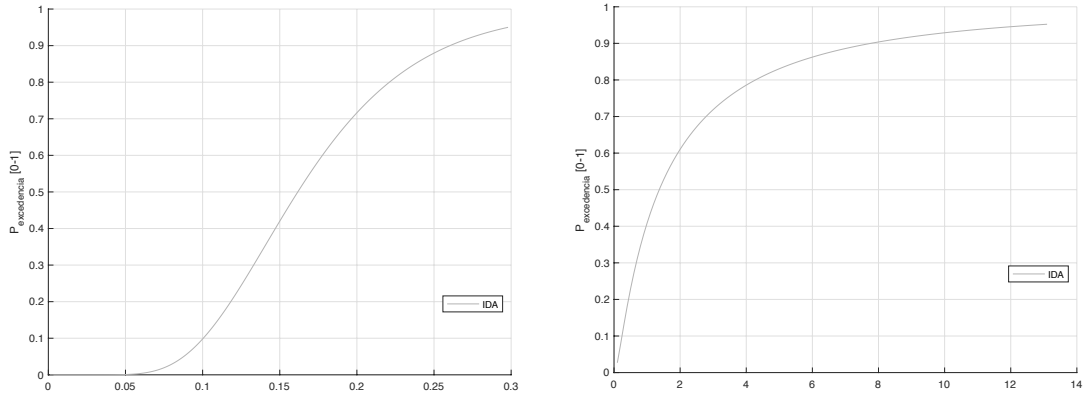


Fig. B-130 Curva de daño esperado para el edificio ED-02 y un $IM = pga$ (izq) ó $IM = S_d$ (der.) (fuente: preparado por el autor)

Tabla B-6 Estadísticas básicas de los conjuntos de puntos asociados a cada valor de pga del edificio ED-02 en ambas direcciones principales [cm] (fuente: preparado por el autor)

	Dir.	min	max	mean	median	std
$P_{0.01g}$	+X	0,05	0,57	0,22	0,13	0,16
	+Y	0,04	0,46	0,20	0,13	0,14
$P_{0.06g}$	+X	0,32	2,26	1,26	1,21	0,60
	+Y	0,31	4,98	1,81	1,73	1,27
$P_{0.11g}$	+X	0,35	7,15	2,91	2,96	1,84
	+Y	0,62	8,91	2,92	2,49	1,87
$P_{0.16g}$	+X	0,39	10,44	4,10	3,50	2,48
	+Y	0,93	8,76	3,24	3,36	1,54
$P_{0.20g}$	+X	1,02	11,96	4,70	4,46	2,70
	+Y	1,12	9,51	4,08	3,91	2,24

B.3 ED-03

B.3.1 Análisis modal

Tabla B-7 Resultados del análisis modal para el edificio aislado ED-03 (fuente: preparado por el autor)

# Modo	T [s]	f [rad/s]	ω [Hz]	Mx [kg]	My [kg]	Mz [kg]	ΣM [kg]
1	0,723	1,38	8,69	1083369,88	2986,08	7,87	1086363,83
2	0,591	1,69	10,63	6784,02	947867,44	69,03	954720,49
3	0,543	1,84	11,58	35712,40	8165,05	1,74	43879,19
4	0,253	3,95	24,84	158926,34	330,42	1,41	159258,17
5	0,195	5,14	32,28	668,61	198652,23	1745,55	201066,39
6	0,184	5,43	34,10	1038,73	5047,95	298,46	6385,14
7	0,139	7,19	45,17	27350,34	132,13	50443,23	77925,70
8	0,135	7,43	46,70	1190,85	2068,66	845620,03	848879,54
9	0,124	8,10	50,87	34,63	3397,44	104336,01	107768,09
10	0,116	8,60	54,01	146,57	13533,77	56657,83	70338,18
11	0,111	8,98	56,42	527,86	2432,78	6447,68	9408,32
12	0,109	9,18	57,66	393,40	12305,77	28,28	12727,45
13	0,107	9,35	58,74	2,18	55756,56	3899,94	59658,69
14	0,103	9,74	61,19	3283,64	340,04	689,15	4312,83
15	0,094	10,63	66,78	2248,23	130,83	405,14	2784,20
16	0,089	11,24	70,61	398,98	207,54	2,01	608,52
17	0,083	12,05	75,72	148,25	34636,06	1855,90	36640,22
18	0,081	12,31	77,34	160,05	3131,86	8063,14	11355,05
19	0,080	12,56	78,95	1088,41	1939,49	1022,28	4050,18
20	0,077	12,91	81,12	9,24	1388,36	2652,35	4049,94
21	0,076	13,18	82,81	95,78	194,44	983,11	1273,33

Tabla B-8 Resultados del análisis modal para el edificio aislado ED-03 (continuación) (fuente: preparado por el autor)

# Modo	T [s]	IFx [%]	IFy [%]	IFz [%]	RAMx [%]	RAMy [%]	RAMz [%]	AAMx [%]	AAMy [%]	AAMz [%]
1	0,723	99,724	0,275	0,001	81,852	0,231	0,001	75,924	0,209	0,001
2	0,591	0,711	99,282	0,007	0,513	73,214	0,006	0,475	66,428	0,005
3	0,543	81,388	18,608	0,004	2,698	0,631	0,000	2,503	0,572	0,000
4	0,253	99,792	0,207	0,001	12,007	0,026	0,000	11,138	0,023	0,000
5	0,195	0,333	98,799	0,868	0,051	15,344	0,161	0,047	13,922	0,122
6	0,184	16,268	79,058	4,674	0,078	0,390	0,028	0,073	0,354	0,021
7	0,139	35,098	0,170	64,732	2,066	0,010	4,648	1,917	0,009	3,535
8	0,135	0,140	0,244	99,616	0,090	0,160	77,921	0,083	0,145	59,262
9	0,124	0,032	3,153	96,815	0,003	0,262	9,614	0,002	0,238	7,312
10	0,116	0,208	19,241	80,551	0,011	1,045	5,221	0,010	0,948	3,971
11	0,111	5,611	25,858	68,532	0,040	0,188	0,594	0,037	0,170	0,452
12	0,109	3,091	96,687	0,222	0,030	0,951	0,003	0,028	0,862	0,002
13	0,107	0,004	93,459	6,537	0,000	4,307	0,359	0,000	3,907	0,273
14	0,103	76,137	7,884	15,979	0,248	0,026	0,064	0,230	0,024	0,048
15	0,094	80,750	4,699	14,551	0,170	0,010	0,037	0,158	0,009	0,028
16	0,089	65,565	34,105	0,330	0,030	0,016	0,000	0,028	0,015	0,000
17	0,083	0,405	94,530	5,065	0,011	2,675	0,171	0,010	2,427	0,130
18	0,081	1,409	27,581	71,009	0,012	0,242	0,743	0,011	0,219	0,565
19	0,080	26,873	47,886	25,240	0,082	0,150	0,094	0,076	0,136	0,072
20	0,077	0,228	34,281	65,491	0,001	0,107	0,244	0,001	0,097	0,186
21	0,076	7,522	15,270	77,208	0,007	0,015	0,091	0,007	0,014	0,069

B.3.2 Análisis de capacidad

B.3.2.1 Curva de capacidad

Dirección +X

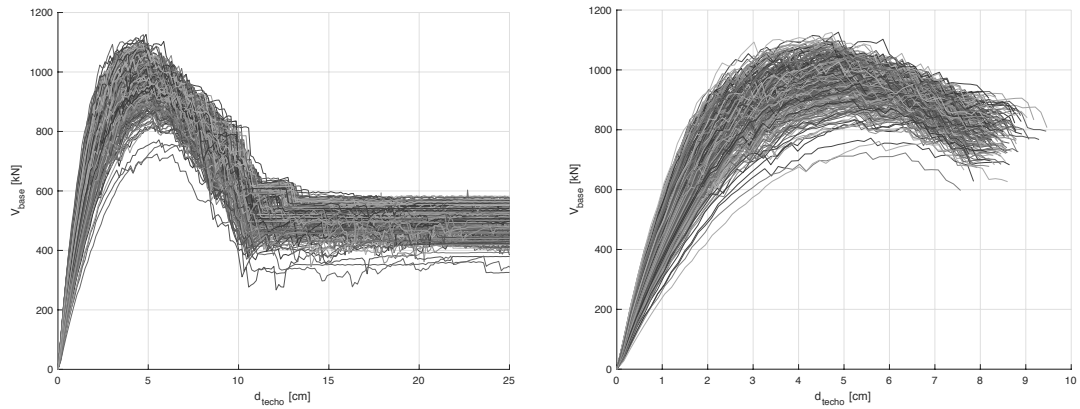


Fig. B-131 Curvas de capacidad originales (izq. - 3muri) y procesadas (der. - criterio de punto último) [Dir. +X] (fuente: preparado por el autor)

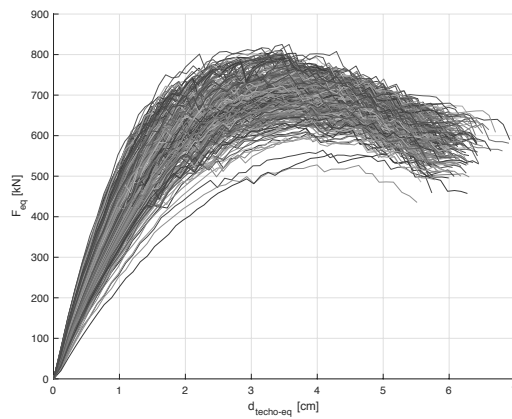


Fig. B-132 Curvas de capacidad de los sistemas equivalentes de 1GDL [Dir. +X, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +Y

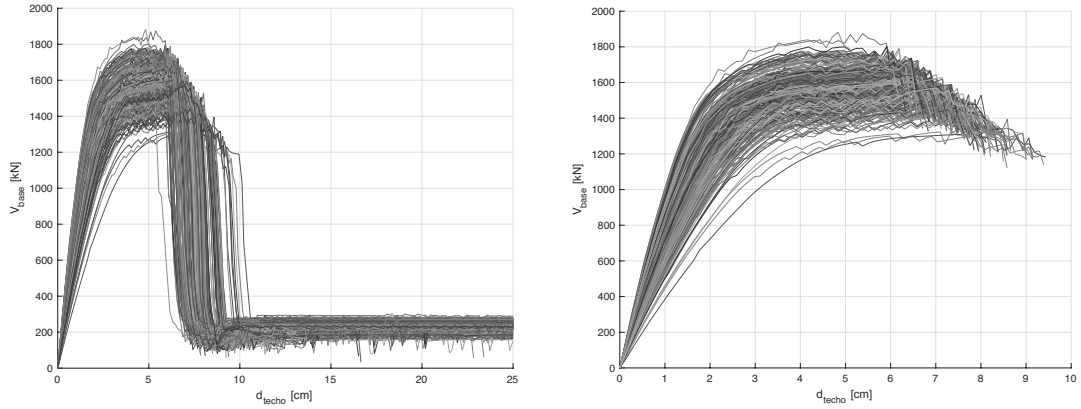


Fig. B-133 Curvas de capacidad originales (izq. - 3muri) y procesadas (der. - criterio de punto último) [Dir. +Y] (fuente: preparado por el autor)

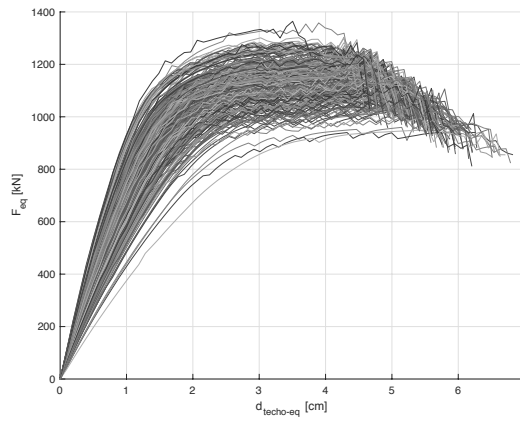


Fig. B-134 Curvas de capacidad de los sistemas equivalentes de 1GDL [Dir. +Y, N2] (fuente: preparado por el autor)

B.3.2.2 Curva de capacidad en formato aceleración-desplazamiento (ADRS)

Dirección +X

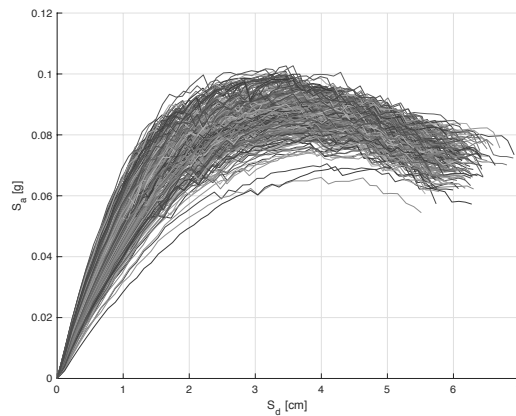


Fig. B-135 Curvas de capacidad en formato desplazamiento-aceleración (ADRS) [Dir. +Y, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +Y

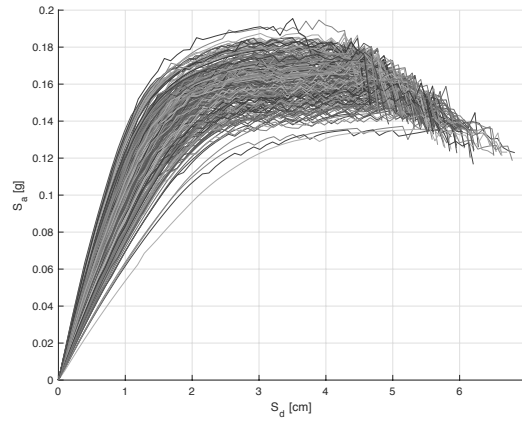


Fig. B-136 Curvas de capacidad en formato desplazamiento-aceleración (ADRS) [Dir. +Y, N2] (fuente: preparado por el autor)

B.3.2.3 Representación bilineal

Dirección +X

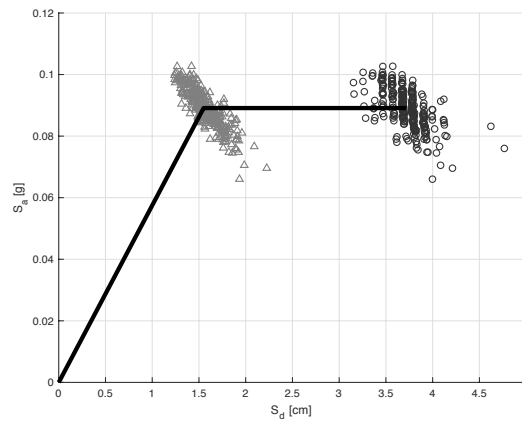


Fig. B-137 Representación bilineal promedio y nubes de valores de los puntos de fluencia y último [Dir. +X, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +Y

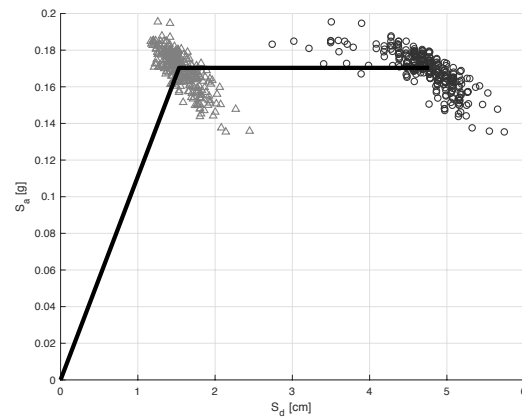


Fig. B-138 Representación bilineal promedio y nubes de valores de los puntos de fluencia y último [Dir. +Y, N2] (fuente: preparado por el autor)

B.3.3 Fragilidad y daño esperado

B.3.3.1 Curvas de fragilidad

Dirección +X

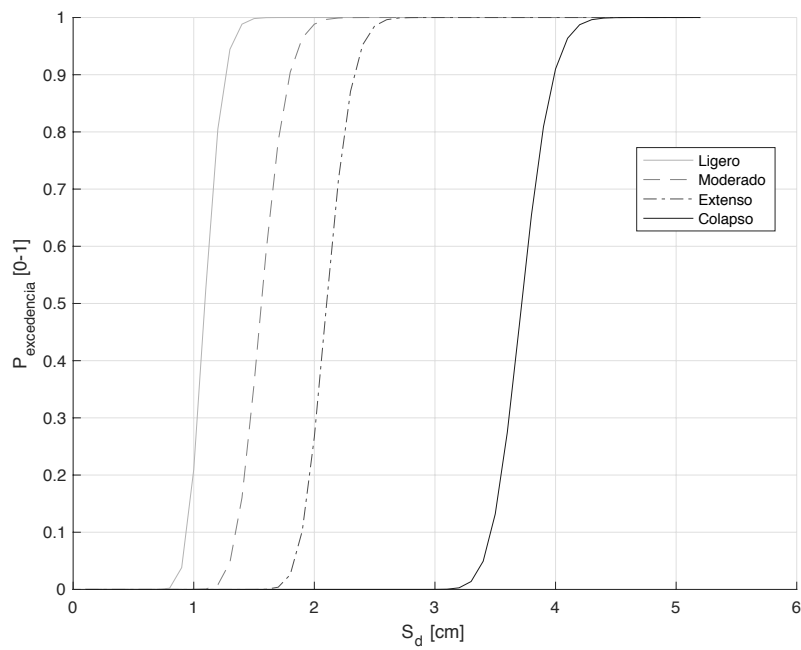


Fig. B-139 Curvas de fragilidad [Dir. +X, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +Y

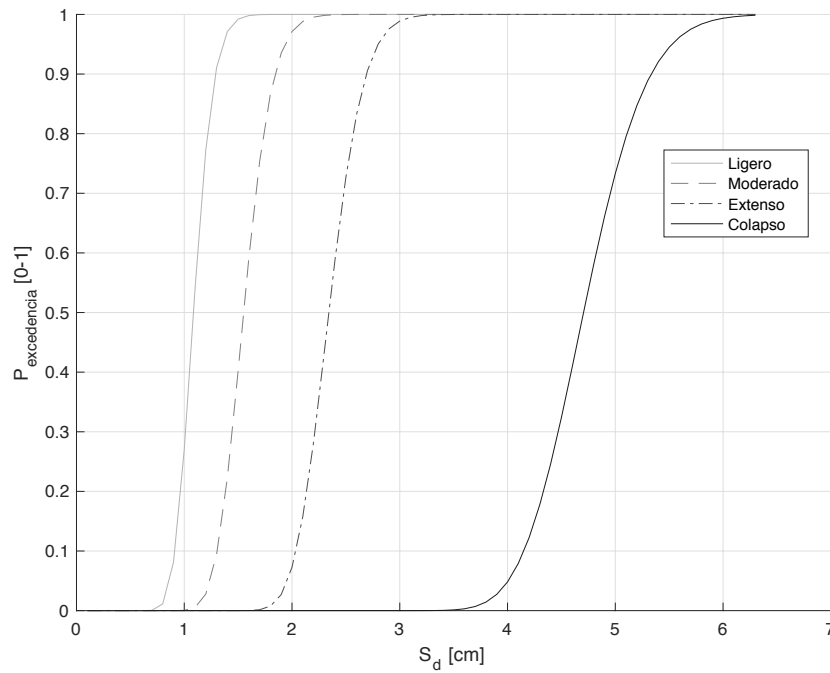


Fig. B-140 Curvas de fragilidad [Dir. +Y, N2] (fuente: preparado por el autor)

B.3.3.2 Estados de daño

Dirección +X

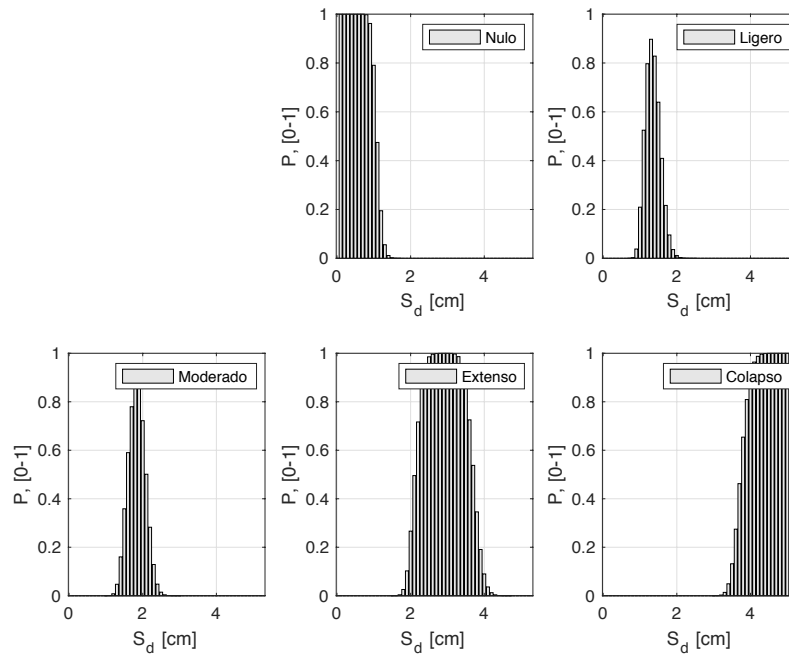


Fig. B-141 Probabilidades de ocurrencia de los distintos estados de daño para diversos desplazamientos espectrales posibles obtenidos a partir de las curvas de fragilidad [Dir. +X, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +Y

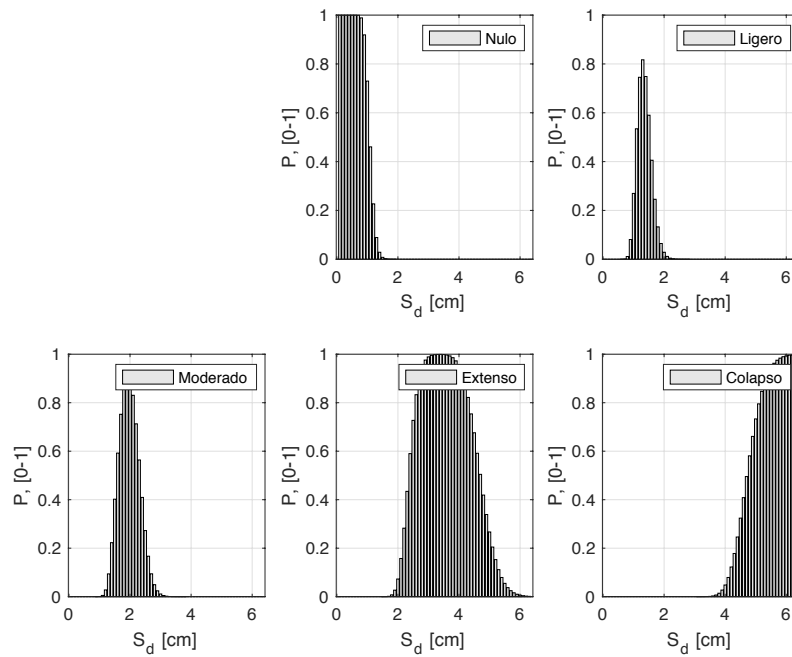


Fig. B-142 Probabilidades de ocurrencia de los distintos estados de daño para diversos desplazamientos espectrales posibles obtenidos a partir de las curvas de fragilidad [Dir. +Y, N2] (fuente: preparado por el autor)

B.3.3.3 Punto de desempeño

Dirección +X, $p_{ga} = 0.04 g$

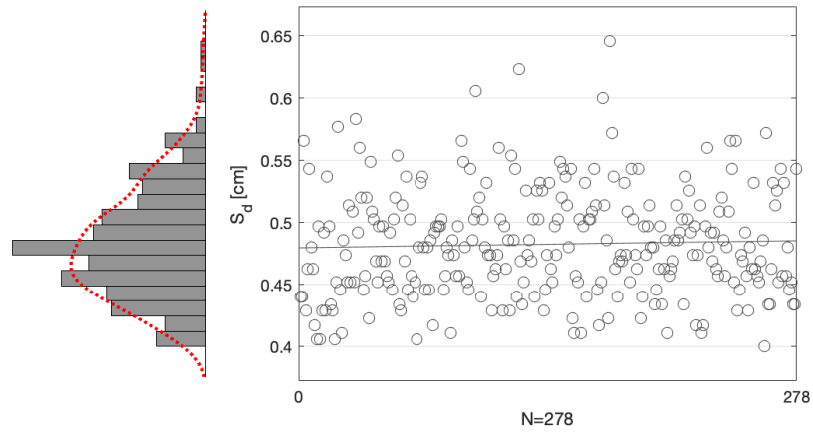


Fig. B-143 Desplazamientos espectrales, S_d , de los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, $p_{ga} = 0.04g$, N2] (fuente: preparado por el autor)

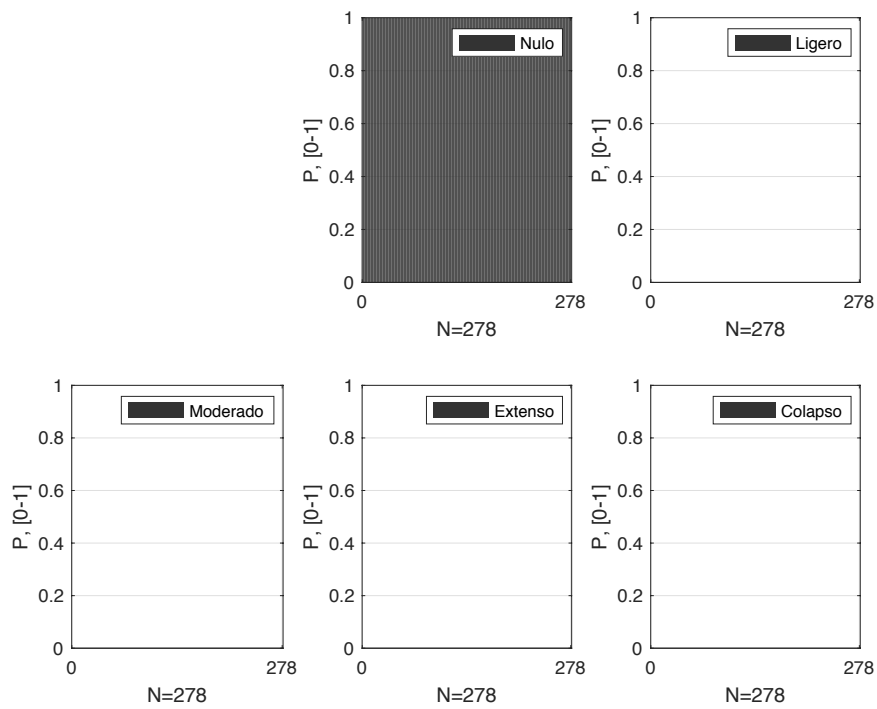


Fig. B-144 Probabilidades de pertenencia de los estados de daño nulo y no nulos para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.04g, N2] (fuente: preparado por el autor)

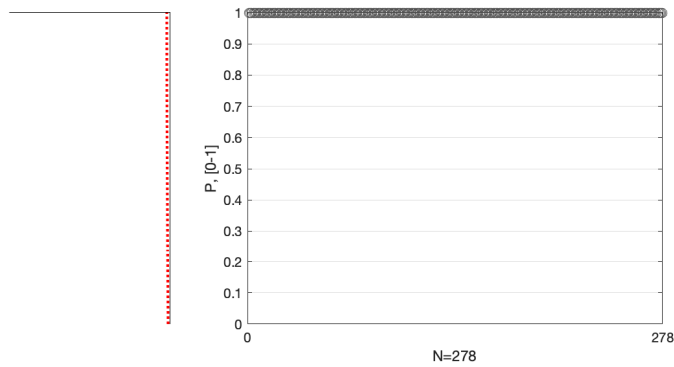


Fig. B-145 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Nulo para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.04g, N2] (fuente: preparado por el autor)

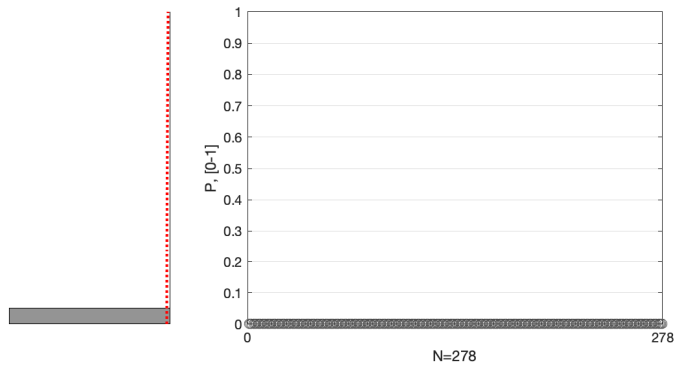


Fig. B-146 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Ligero para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.04g, N2] (fuente: preparado por el autor)

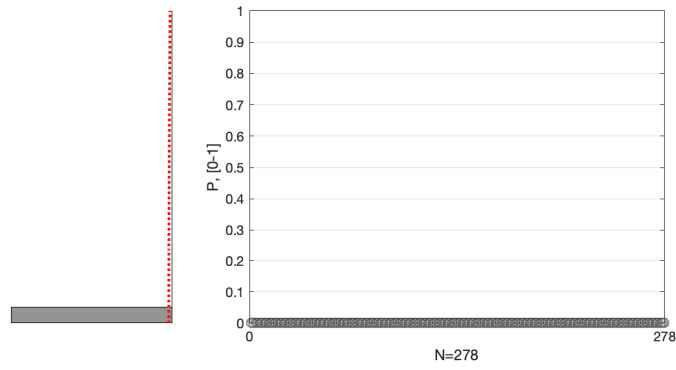


Fig. B-147 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Moderado para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.04g, N2] (fuente: preparado por el autor)

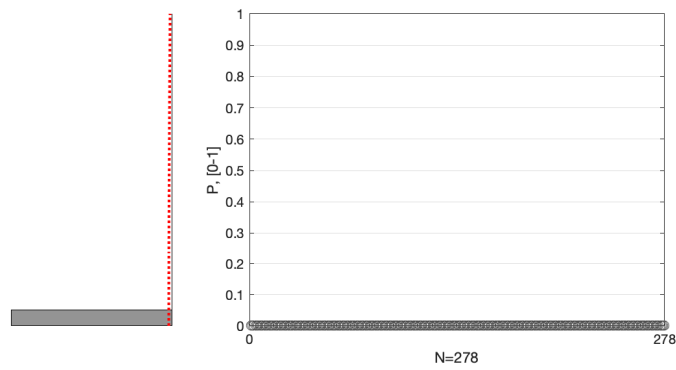


Fig. B-148 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Extenso para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.04g, N2] (fuente: preparado por el autor)

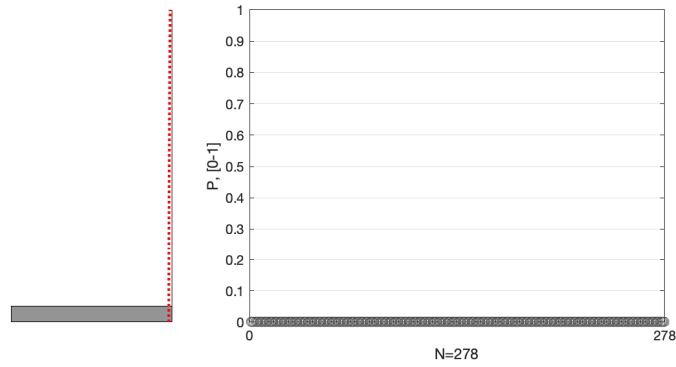


Fig. B-149 Probabilidades de pertenencia al estado de daño de Colapso para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.04g, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +Y, pga = 0.04 g

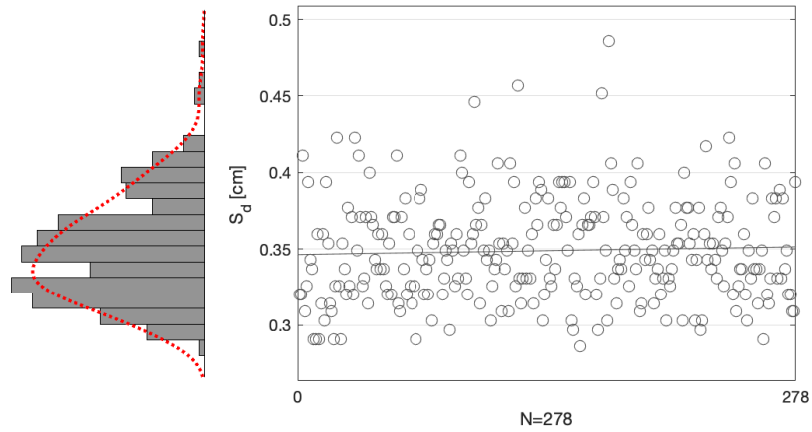


Fig. B-150 Desplazamientos espectrales, S_d , de los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, $p_{ga} = 0.04g$, N2] (fuente: preparado por el autor)

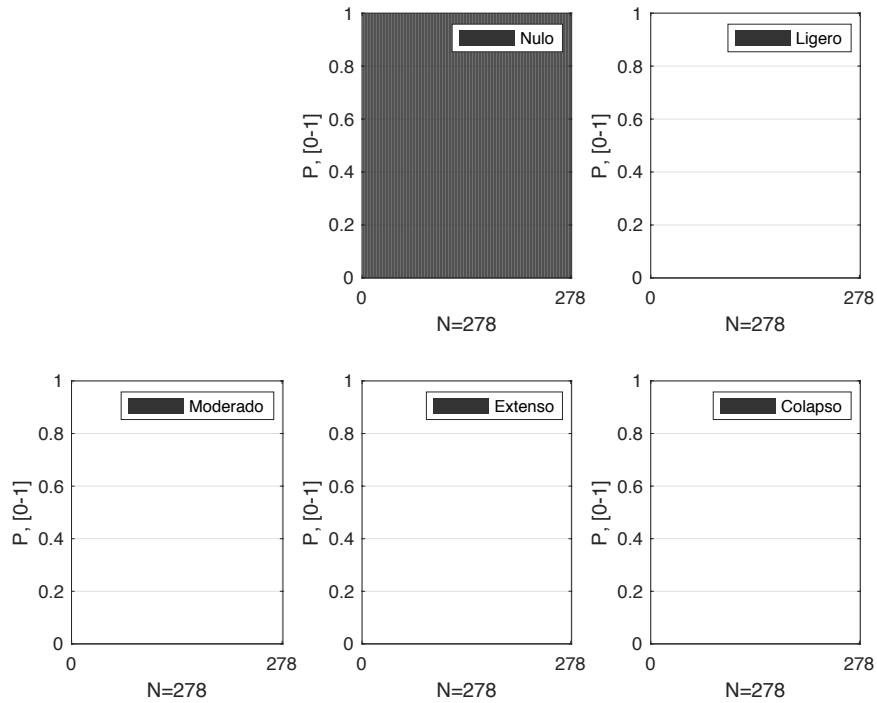


Fig. B-151 Probabilidades de pertenencia de los estados de daño nulo y no nulos para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, $p_{ga} = 0.04g$, N2] (fuente: preparado por el autor)

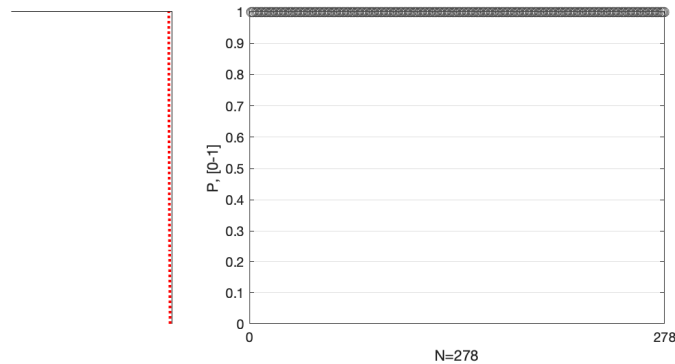


Fig. B-152 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Nulo para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0.04g, N2] (fuente: preparado por el autor)

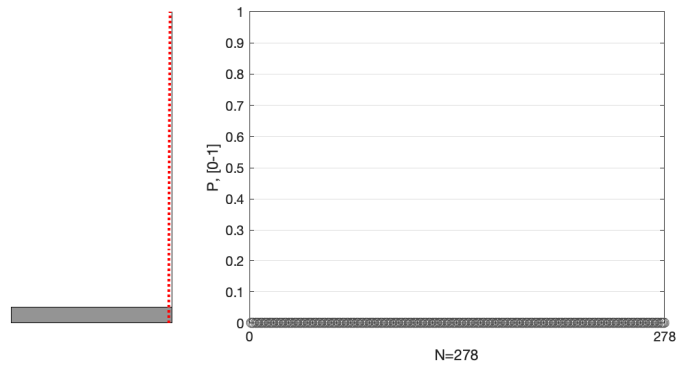


Fig. B-153 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Ligero para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0.04g, N2] (fuente: preparado por el autor)

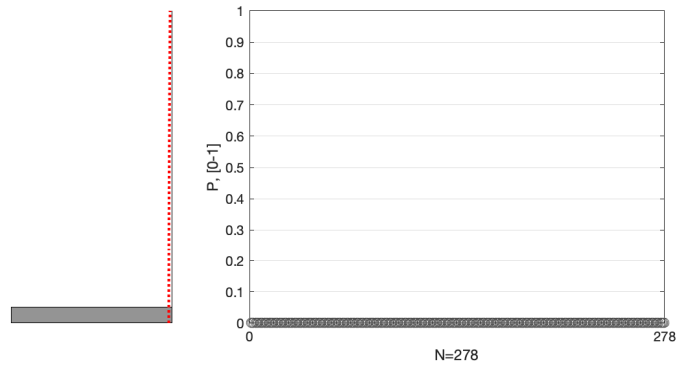


Fig. B-154 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Moderado para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0.04g, N2] (fuente: preparado por el autor)

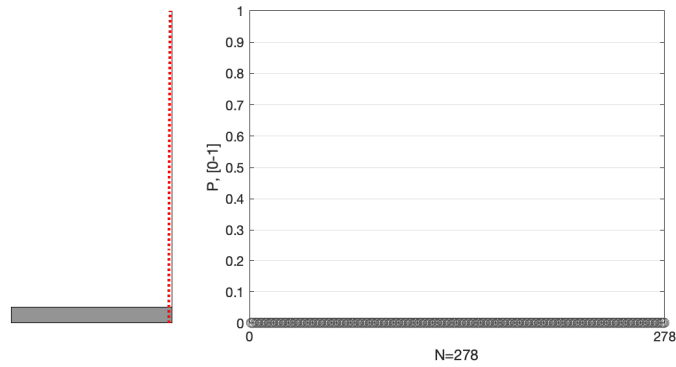


Fig. B-155 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Extenso para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0.04g, N2] (fuente: preparado por el autor)

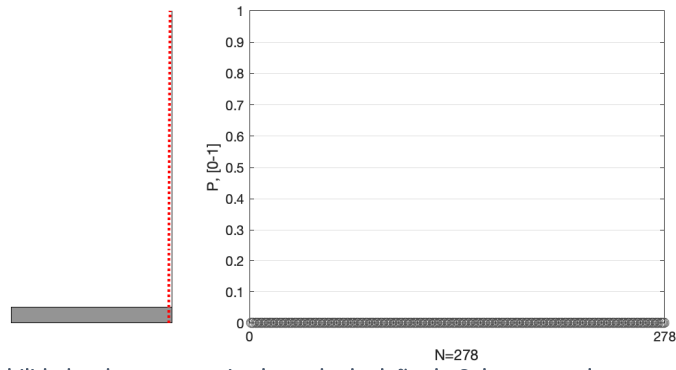


Fig. B-156 Probabilidades de pertenencia al estado de daño de Colapso para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0.04g, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +X, pga = 0.141 g

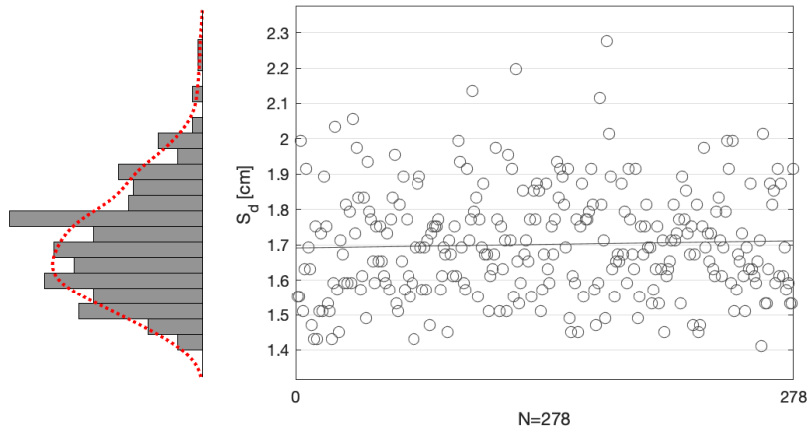


Fig. B-157 Desplazamientos espectrales, S_d , de los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.141g, N2] (fuente: preparado por el autor)

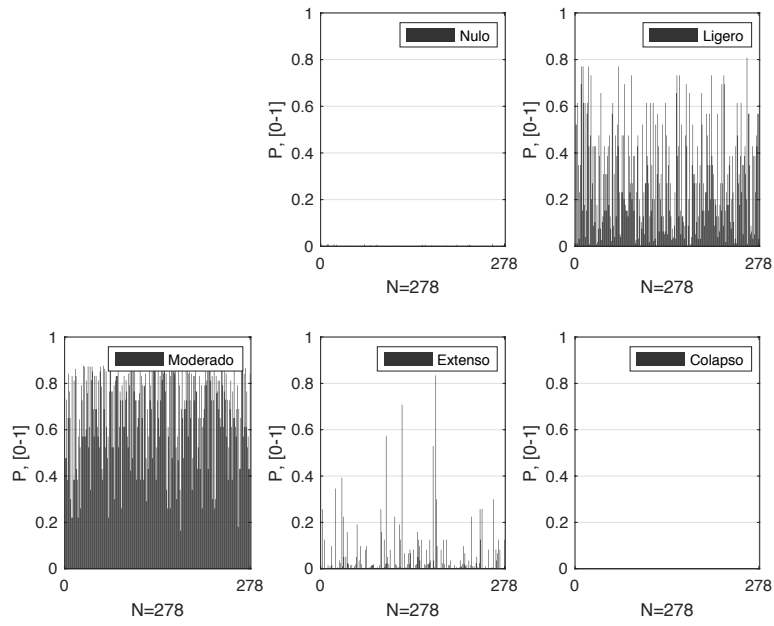


Fig. B-158 Probabilidades de pertenencia de los estados de daño nulo y no nulos para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.141g, N2] (fuente: preparado por el autor)

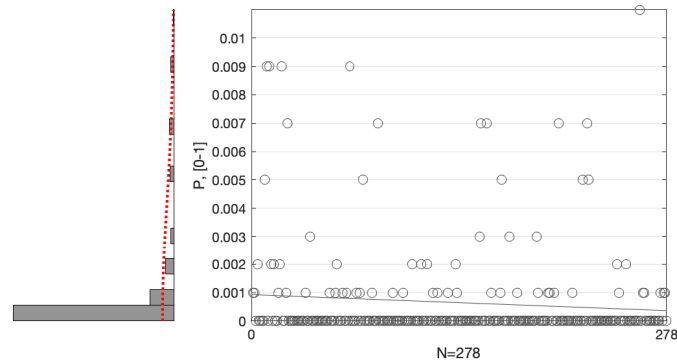


Fig. B-159 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Nulo para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.141g, N2] (fuente: preparado por el autor)

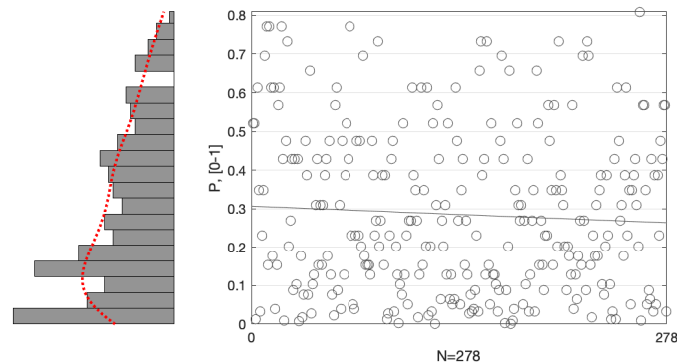


Fig. B-160 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Ligero para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0. 141g, N2] (fuente: preparado por el autor)

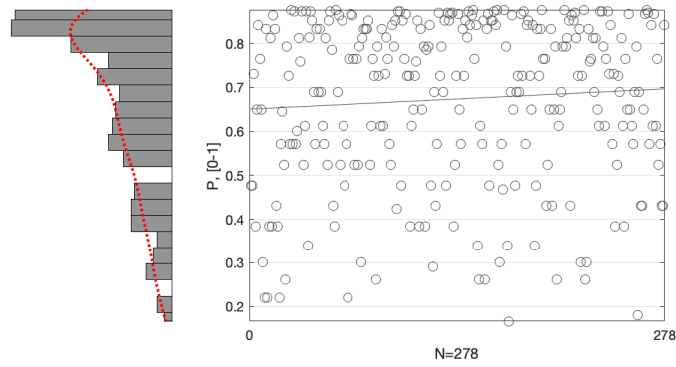


Fig. B-161 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Moderado para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0. 141g, N2] (fuente: preparado por el autor)

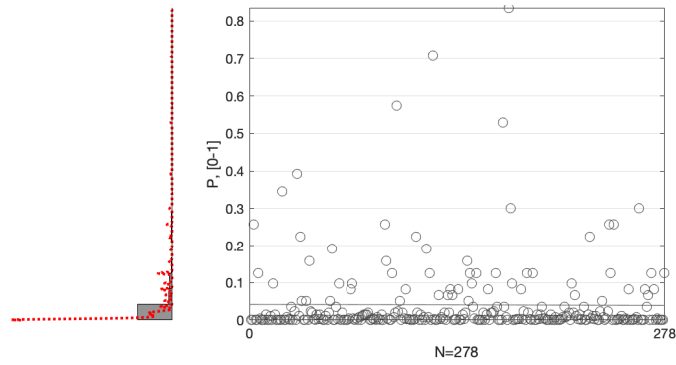


Fig. B-162 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Severo para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0. 141g, N2] (fuente: preparado por el autor)

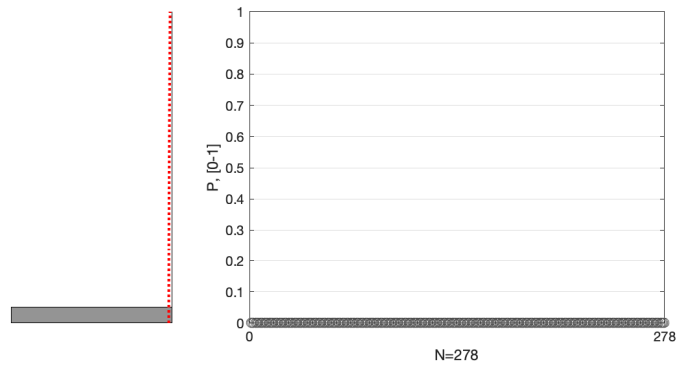


Fig. B-163 Probabilidades de pertenencia al estado de daño de Colapso para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0. 141g, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +Y, pga = 0.141 g

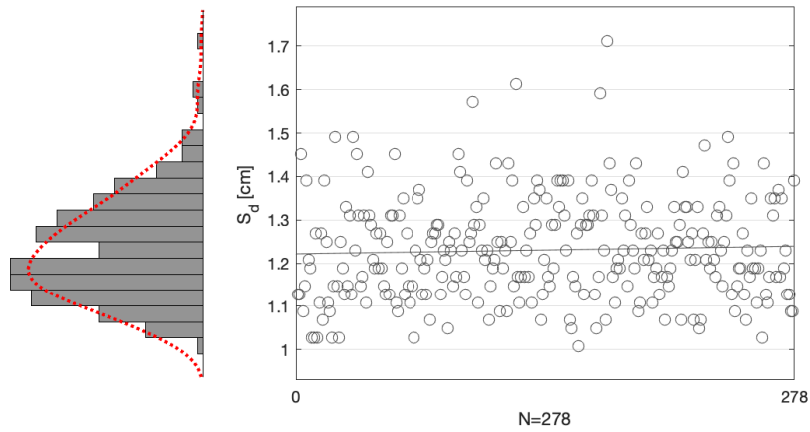


Fig. B-164 Desplazamientos espectrales, S_d , de los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0.141g, N2] (fuente: preparado por el autor)

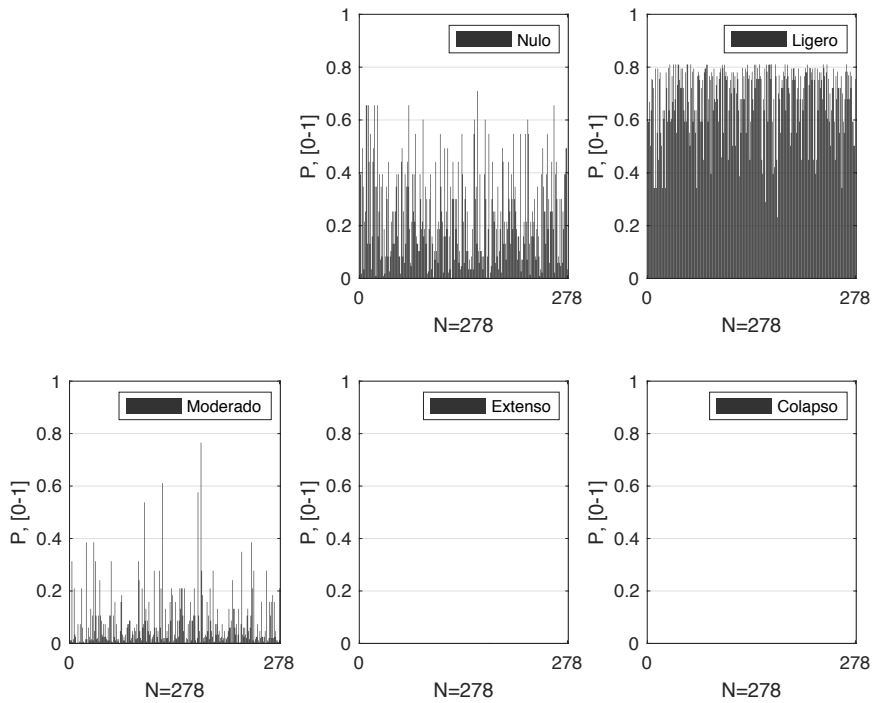


Fig. B-165 Probabilidades de pertenencia de los estados de daño nulo y no nulos para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0.141g, N2] (fuente: preparado por el autor)

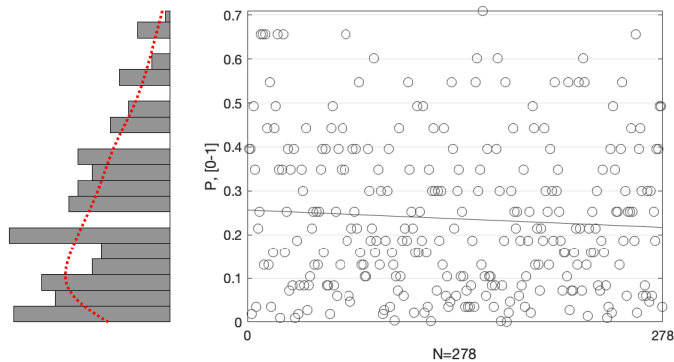


Fig. B-166 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Nulo para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0.141g, N2] (fuente: preparado por el autor)

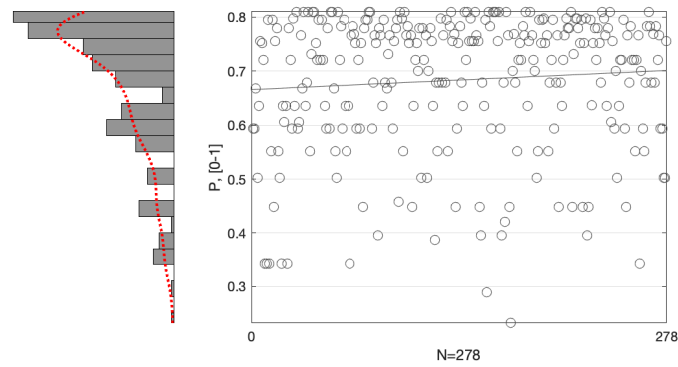


Fig. B-167 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Ligero para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0. 0.141g, N2] (fuente: preparado por el autor)

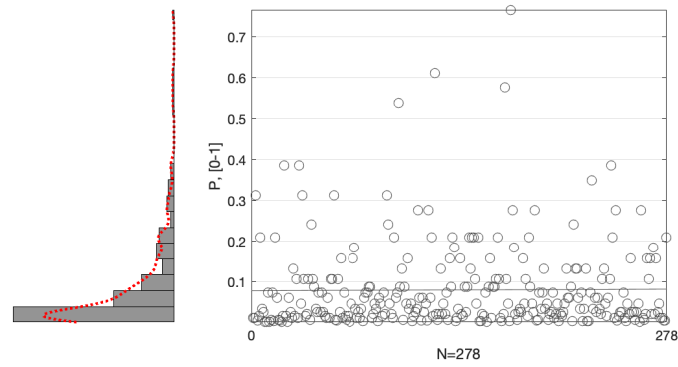


Fig. B-168 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Moderado para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0. 0.141g, N2] (fuente: preparado por el autor)

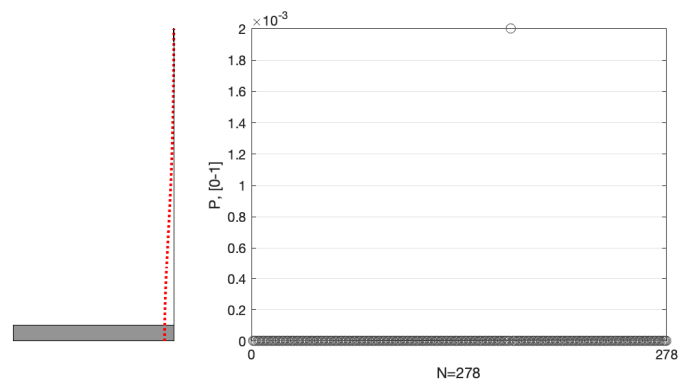


Fig. B-169 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Extenso para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0. 0.141g, N2] (fuente: preparado por el autor)

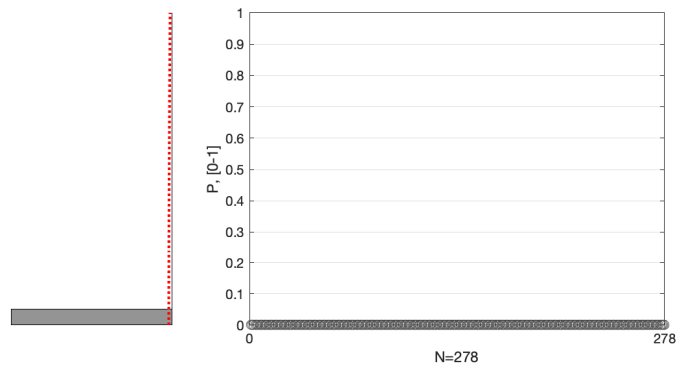


Fig. B-170 Probabilidades de pertenencia al estado de daño de Colapso para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0. 0.141g, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +X, pga = 0.194 g

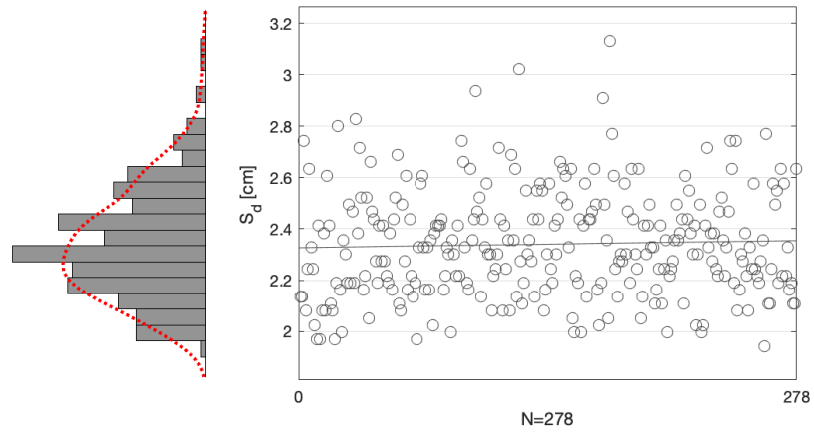


Fig. B-171 Desplazamientos espectrales, S_d , de los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.194g, N2] (fuente: preparado por el autor)

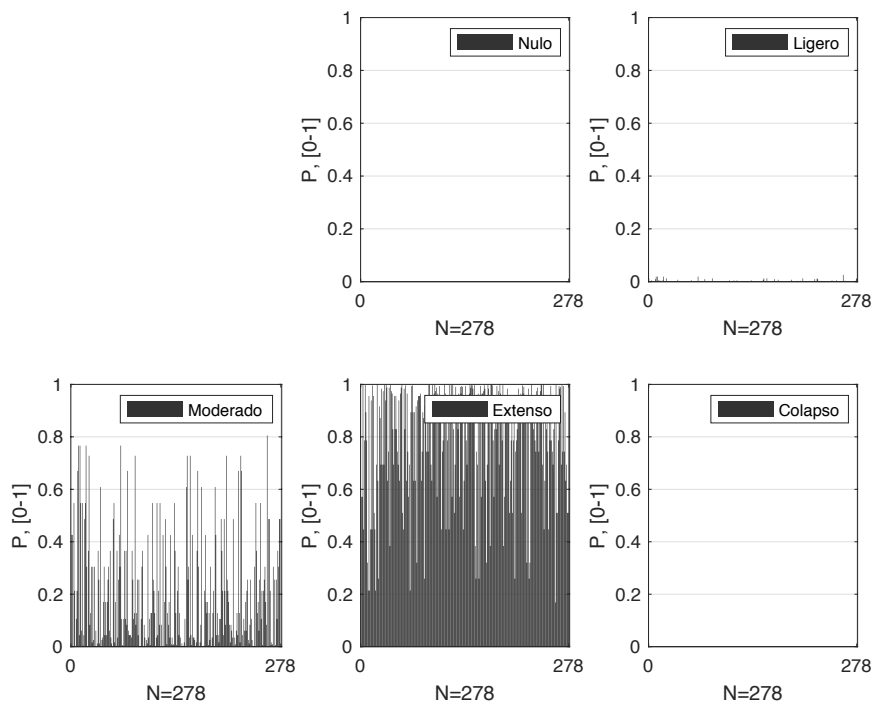


Fig. B-172 Probabilidades de pertenencia de los estados de daño nulo y no nulos para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.194g, N2] (fuente: preparado por el autor)

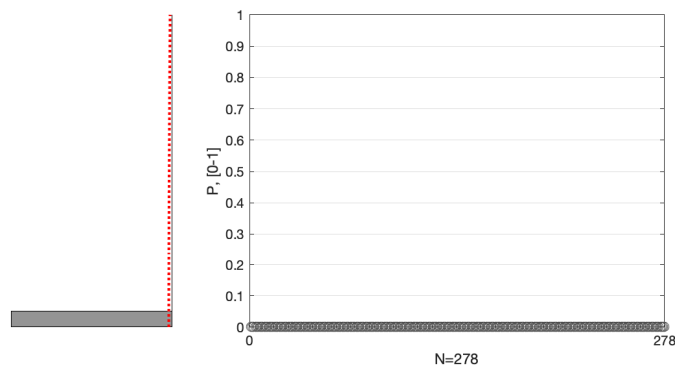


Fig. B-173 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Nulo para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.194g, N2] (fuente: preparado por el autor)

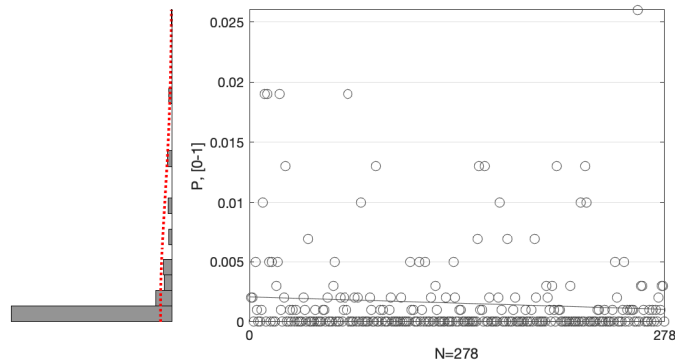


Fig. B-174 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Ligero para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.194g, N2] (fuente: preparado por el autor)

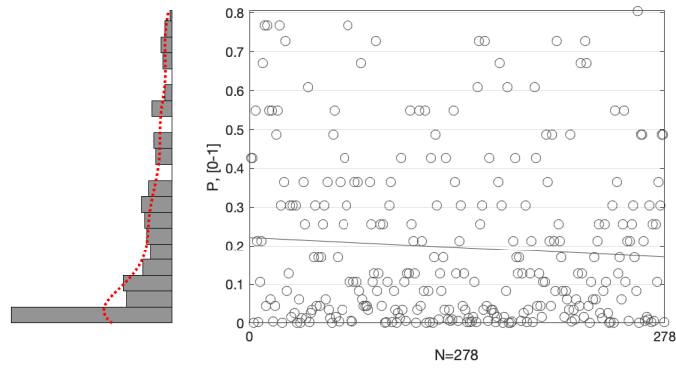


Fig. B-175 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Moderado para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.194g, N2] (fuente: preparado por el autor)

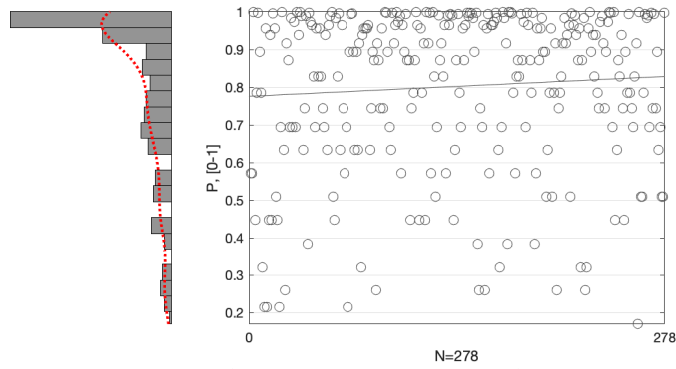


Fig. B-176 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Severo para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.194g, N2] (fuente: preparado por el autor)

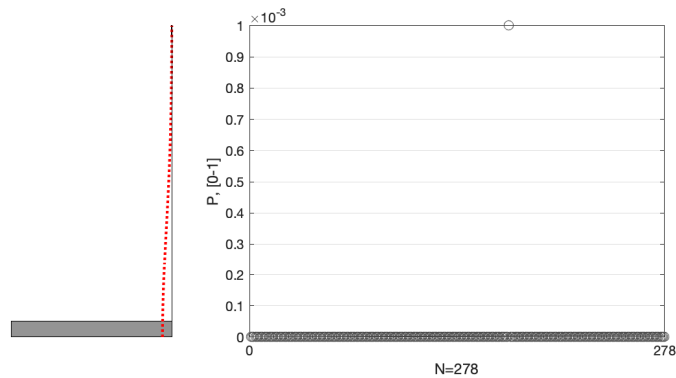


Fig. B-177 Probabilidades de pertenencia al estado de daño de Colapso para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.194g, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +Y, pga = 0.194 g

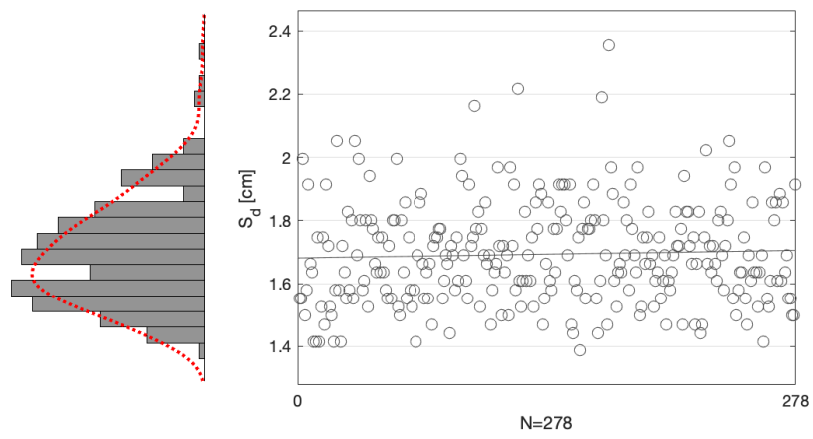


Fig. B-178 Desplazamientos espectrales, S_d , de los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0.194g, N2] (fuente: preparado por el autor)

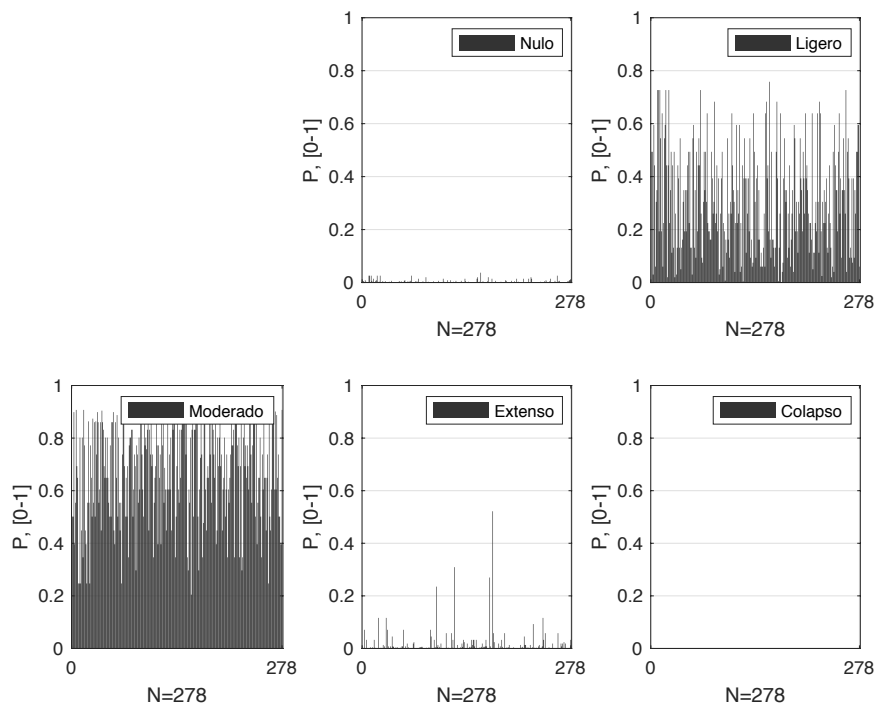


Fig. B-179 Probabilidades de pertenencia de los estados de daño nulo y no nulos para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0.194g, N2] (fuente: preparado por el autor)

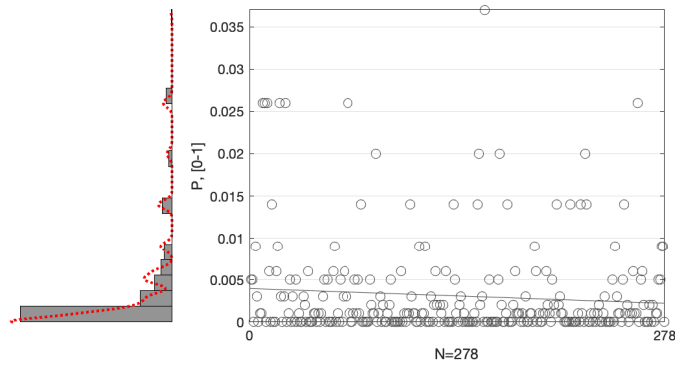


Fig. B-180 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Nulo para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0.194g, N2] (fuente: preparado por el autor)

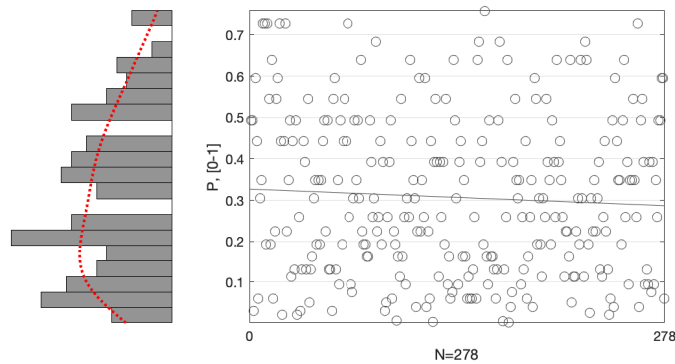


Fig. B-181 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Ligero para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0. 0. 194g, N2] (fuente: preparado por el autor)

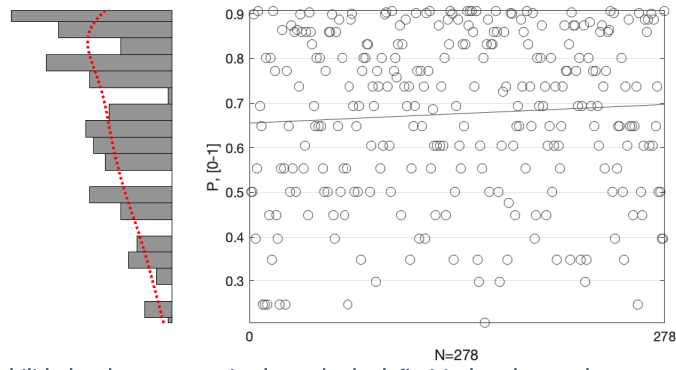


Fig. B-182 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Moderado para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0. 0. 194g, N2] (fuente: preparado por el autor)

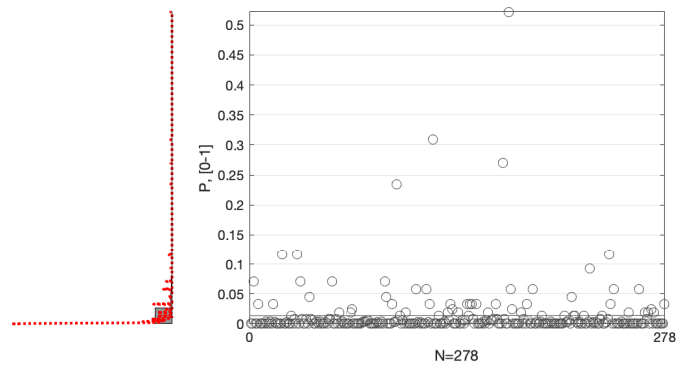


Fig. B-183 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Extenso para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0. 0. 194g, N2] (fuente: preparado por el autor)

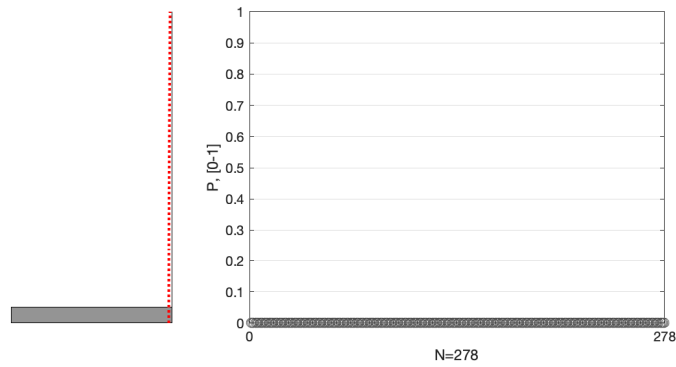


Fig. B-184 Probabilidades de pertenencia al estado de daño de Colapso para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0. 0. 194g, N2] (fuente: preparado por el autor)

B.3.3.4 Grado de daño medio

Dirección +X

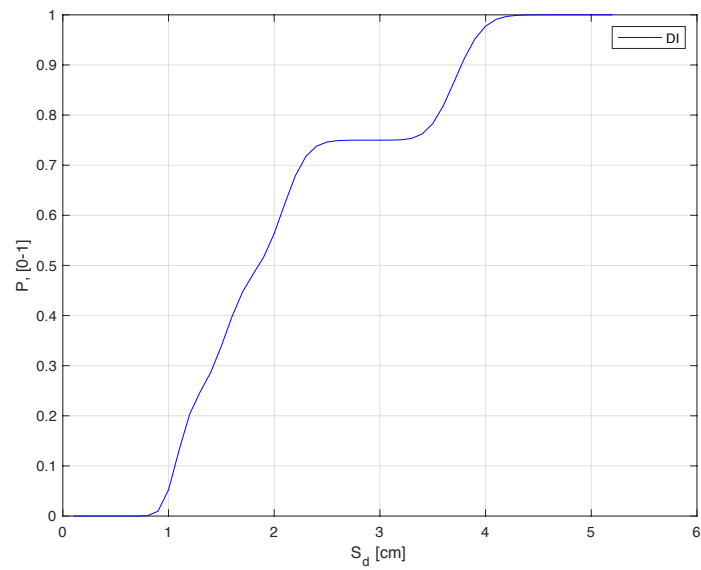


Fig. B-185 Curva del grado de daño medio (i.e. índice de Daño, DI) [Dir. +X, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +X, pga = 0.04 g

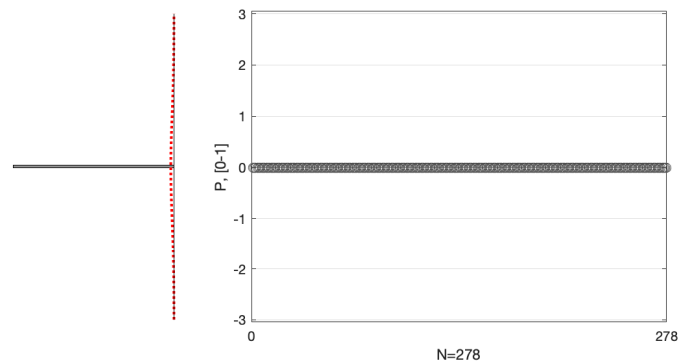


Fig. B-186 Probabilidades de ocurrencia de daño medio para los distintos puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.04g, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +X, pga = 0.141 g

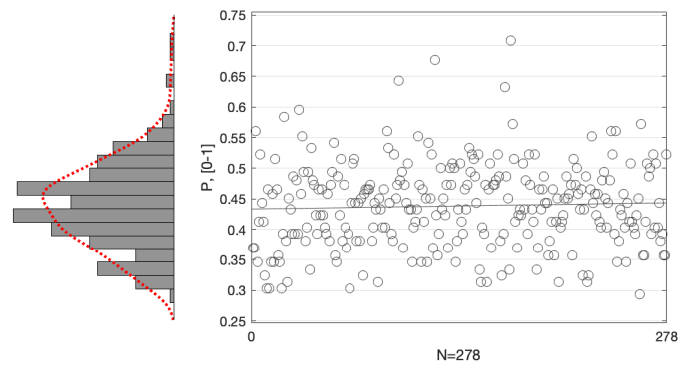


Fig. B-187 Probabilidades de ocurrencia de daño medio para los distintos puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.141g, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +X, $p_{ga} = 0.194 \text{ g}$

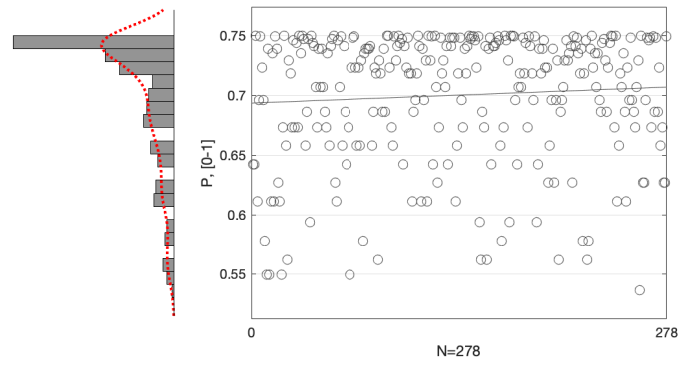


Fig. B-188 Probabilidades de ocurrencia de daño medio para los distintos puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, $p_{ga} = 0.194\text{g}$, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +Y

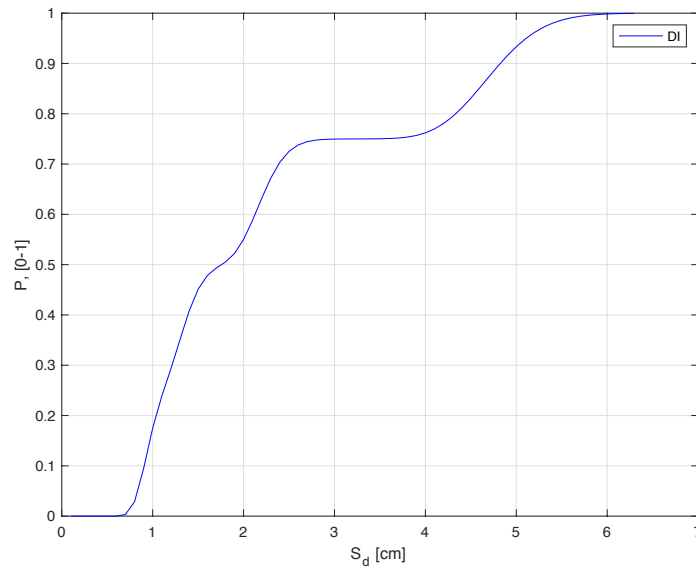


Fig. B-189 Curva del grado de daño medio (i.e. índice de Daño, DI) [Dir. +Y, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +Y, pga = 0.04 g

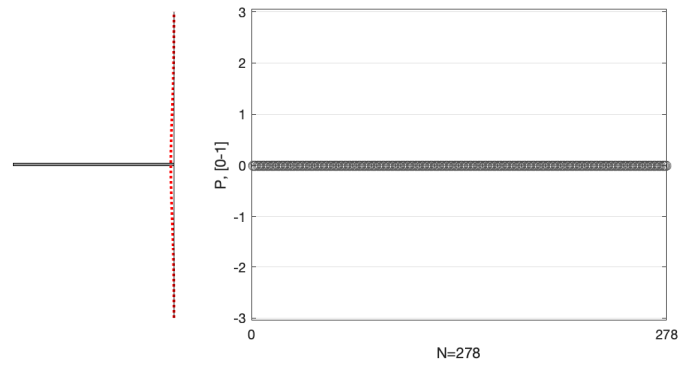


Fig. B-190 Probabilidades de ocurrencia de daño medio para los distintos puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0.04g, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +Y, pga = 0.141 g

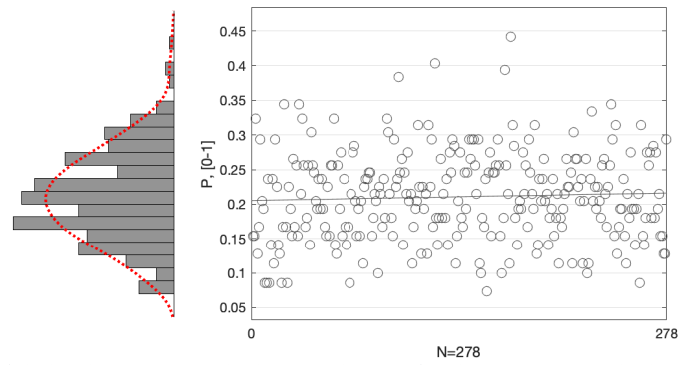


Fig. B-191 Probabilidades de ocurrencia de daño medio para los distintos puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0.141g, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +Y, pga = 0.194 g

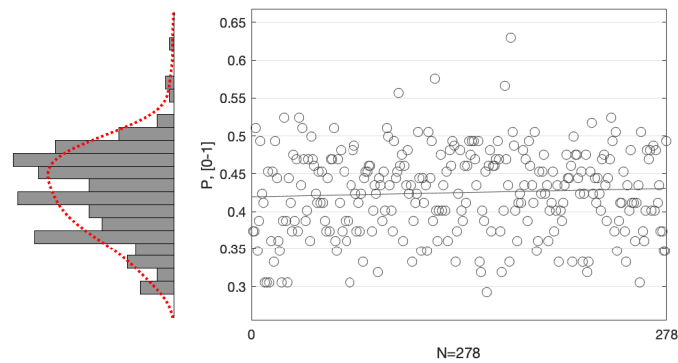


Fig. B-192 Probabilidades de ocurrencia de daño medio para los distintos puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0.194g, N2] (fuente: preparado por el autor)

B.3.4 Análisis dinámico incremental

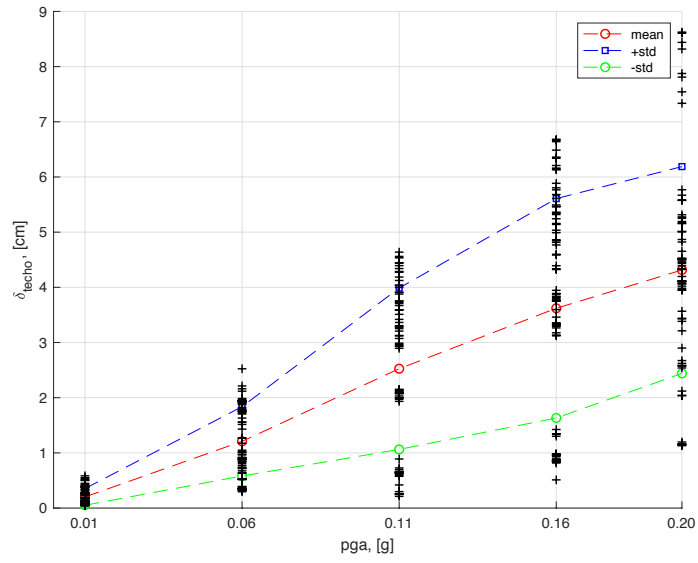


Fig. B-193 Desplazamiento en el techo vs pga de los distintos análisis dinámicos realizados en el edificio ED-03 en la dirección +X (fuente: preparado por el autor)

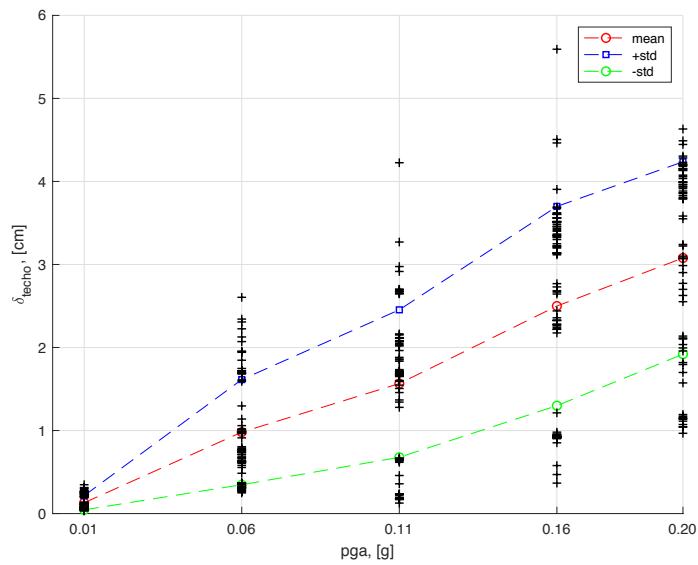


Fig. B-194 Desplazamiento en el techo vs pga de los distintos análisis dinámicos realizados en el edificio ED-03 en la dirección +Y (fuente: preparado por el autor)

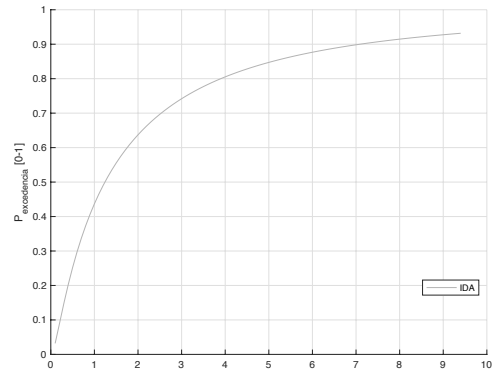
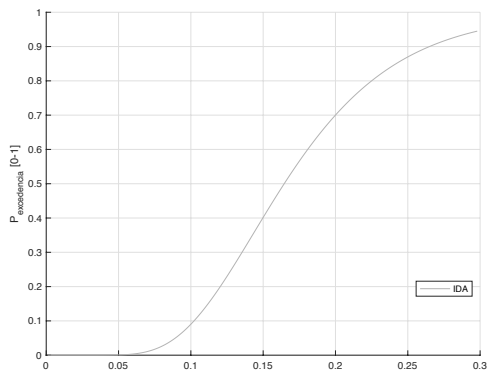


Fig. B-195 Curva de daño esperado para el edificio ED-03 y un $IM = pga$ (izq) ó $IM = S_d$ (der.) (fuente: preparado por el autor)

Tabla B-9 Estadísticas básicas de los conjuntos de puntos asociados a cada valor de pga del edificio ED-03 en ambas direcciones principales [cm] (fuente: preparado por el autor)

	Dir.	min	max	mean	median	std
$P_{0.01g}$	+X	0,05	0,58	0,20	0,14	0,15
	+Y	0,03	0,35	0,13	0,08	0,09
$P_{0.06g}$	+X	0,30	2,52	1,21	1,02	0,63
	+Y	0,25	2,60	0,98	0,75	0,63
$P_{0.11g}$	+X	0,21	4,64	2,53	2,97	1,46
	+Y	0,13	4,23	1,57	1,68	0,89
$P_{0.16g}$	+X	0,51	6,68	3,62	3,81	1,99
	+Y	0,37	5,59	2,50	2,75	1,20
$P_{0.20g}$	+X	1,13	8,63	4,31	4,26	1,87
	+Y	0,97	4,63	3,08	3,57	1,16

B.4 ED-04

B.4.1 Análisis modal

Tabla B-10 Resultados del análisis modal para el edificio aislado ED-04 (fuente: preparado por el autor)

# Modo	T [s]	f [rad/s]	ω [Hz]	Mx [kg]	My [kg]	Mz [kg]	ΣM [kg]
1	0,712	1,40	8,82	812155,56	762957,03	0,58	1575113,18
2	0,655	1,53	9,59	777062,36	777389,46	86,87	1554538,69
3	0,550	1,82	11,42	152221,51	203929,17	0,23	356150,91
4	0,240	4,16	26,14	102982,88	87570,48	0,39	190553,75
5	0,221	4,53	28,48	157733,14	166034,23	57,12	323824,49
6	0,185	5,41	33,99	29713,47	33376,76	24,08	63114,31
7	0,141	7,11	44,66	346,29	80,17	1764659,41	1765085,87
8	0,133	7,49	47,07	18571,43	17500,80	4334,30	40406,53
9	0,130	7,67	48,21	12869,62	12007,71	79432,66	104309,99
10	0,125	7,98	50,16	30858,50	29621,05	610,00	61089,54
11	0,123	8,13	51,07	1552,37	4088,57	1210,38	6851,32
12	0,112	8,94	56,15	1490,15	2901,35	5305,84	9697,34
13	0,109	9,20	57,78	10435,28	9140,68	76,78	19652,74
14	0,105	9,49	59,61	2215,46	1426,53	8908,17	12550,16
15	0,105	9,52	59,80	815,58	3163,74	21981,64	25960,95
16	0,094	10,62	66,75	287,29	109,65	87,09	484,03
17	0,093	10,76	67,61	3330,92	4144,73	73,66	7549,30
18	0,092	10,92	68,60	8581,78	8909,65	92,19	17583,62
19	0,089	11,21	70,47	52,72	38,44	1519,35	1610,51
20	0,088	11,36	71,35	2127,85	1640,13	256,85	4024,83
21	0,084	11,92	74,91	280,91	221,03	9227,65	9729,59

Tabla B-11 Resultados del análisis modal para el edificio aislado ED-04 (continuación) (fuente: preparado por el autor)

# Modo	T [s]	IFx [%]	IFy [%]	IFz [%]	RAMx [%]	RAMy [%]	RAMz [%]	AAMx [%]	AAMy [%]	AAMz [%]
1	0,712	51,562	48,438	0,000	38,207	35,883	0,000	34,347	32,267	0,000
2	0,655	49,987	50,008	0,006	36,556	36,562	0,005	32,863	32,877	0,004
3	0,550	42,741	57,259	0,000	7,161	9,591	0,000	6,438	8,624	0,000
4	0,240	54,044	45,956	0,000	4,845	4,119	0,000	4,355	3,703	0,000
5	0,221	48,709	51,273	0,018	7,420	7,809	0,003	6,671	7,022	0,002
6	0,185	47,079	52,883	0,038	1,398	1,570	0,001	1,257	1,412	0,001
7	0,141	0,020	0,005	99,976	0,016	0,004	92,977	0,015	0,003	74,630
8	0,133	45,961	43,312	10,727	0,874	0,823	0,228	0,785	0,740	0,183
9	0,130	12,338	11,512	76,151	0,605	0,565	4,185	0,544	0,508	3,359
10	0,125	50,514	48,488	0,999	1,452	1,393	0,032	1,305	1,253	0,026
11	0,123	22,658	59,676	17,666	0,073	0,192	0,064	0,066	0,173	0,051
12	0,112	15,367	29,919	54,714	0,070	0,136	0,280	0,063	0,123	0,224
13	0,109	53,098	46,511	0,391	0,491	0,430	0,004	0,441	0,387	0,003
14	0,105	17,653	11,367	70,981	0,104	0,067	0,469	0,094	0,060	0,377
15	0,105	3,142	12,187	84,672	0,038	0,149	1,158	0,034	0,134	0,930
16	0,094	59,352	22,654	17,993	0,014	0,005	0,005	0,012	0,005	0,004
17	0,093	44,122	54,902	0,976	0,157	0,195	0,004	0,141	0,175	0,003
18	0,092	48,806	50,670	0,524	0,404	0,419	0,005	0,363	0,377	0,004
19	0,089	3,273	2,387	94,340	0,002	0,002	0,080	0,002	0,002	0,064
20	0,088	52,868	40,750	6,382	0,100	0,077	0,014	0,090	0,069	0,011
21	0,084	2,887	2,272	94,841	0,013	0,010	0,486	0,012	0,009	0,390

B.4.2 Análisis de capacidad

B.4.2.1 Curva de capacidad

Dirección +X

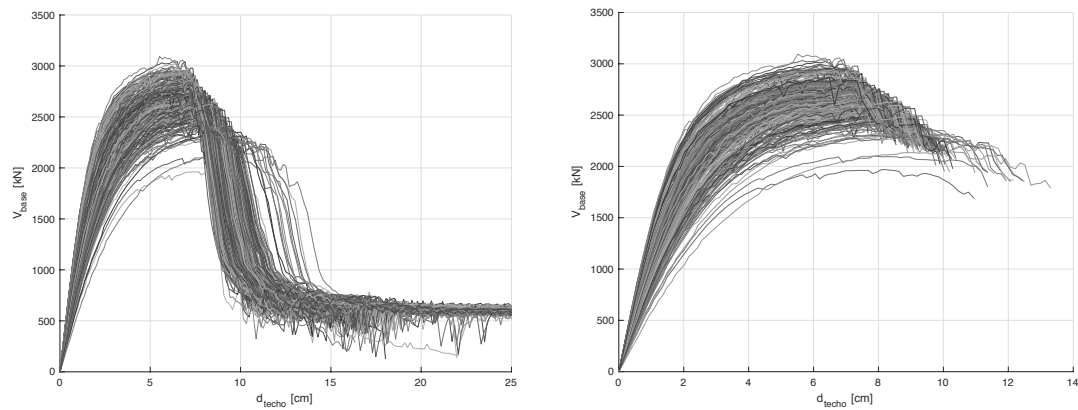


Fig. B-196 Curvas de capacidad originales (izq. - 3muri) y procesadas (der. - criterio de punto último) [Dir. +X] (fuente: preparado por el autor)

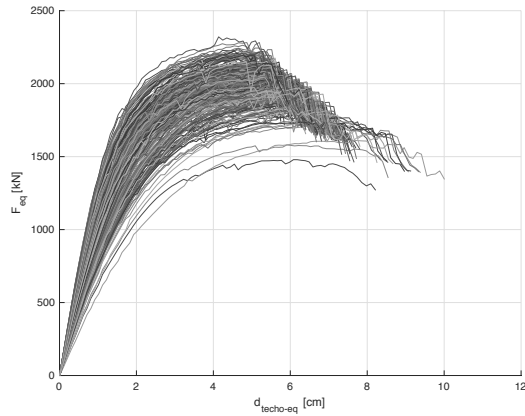


Fig. B-197 Curvas de capacidad de los sistemas equivalentes de 1GDL [Dir. +X, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +Y

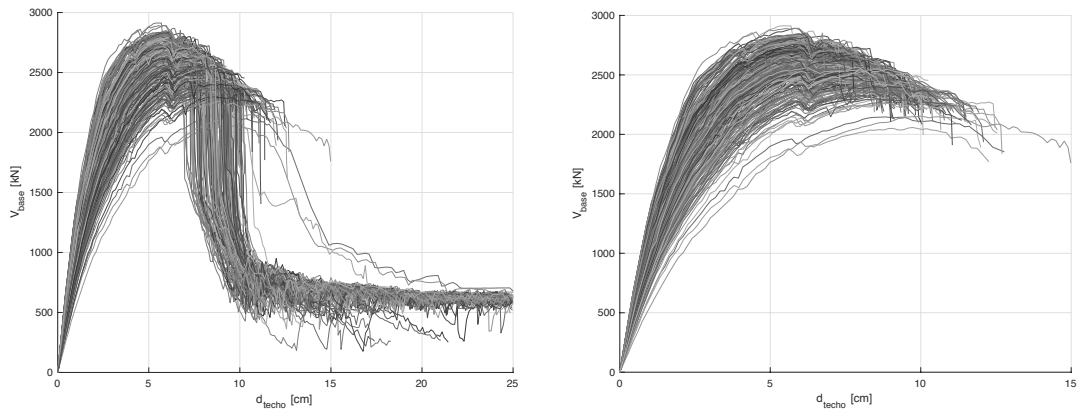


Fig. B-198 Curvas de capacidad originales (izq. - 3muri) y procesadas (der. - criterio de punto último) [Dir. +Y] (fuente: preparado por el autor)

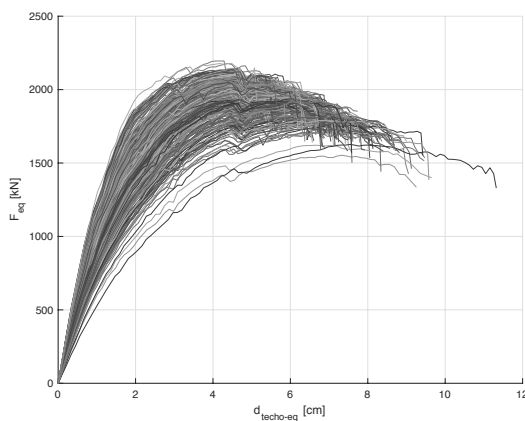


Fig. B-199 Curvas de capacidad de los sistemas equivalentes de 1GDL [Dir. +Y, N2] (fuente: preparado por el autor)

B.4.2.2 Curva de capacidad en formato aceleración-desplazamiento (ADRS)

Dirección +X

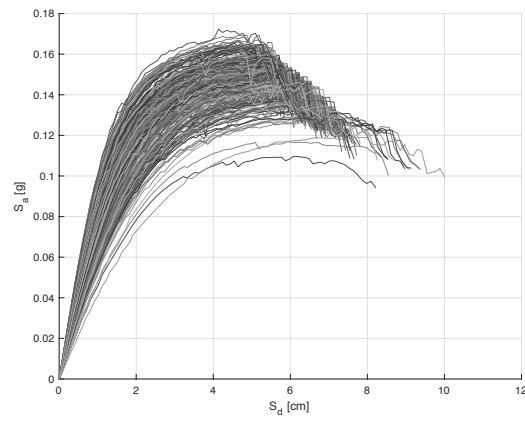


Fig. B-200 Curvas de capacidad en formato desplazamiento-aceleración (ADRS) [Dir. +Y, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +Y

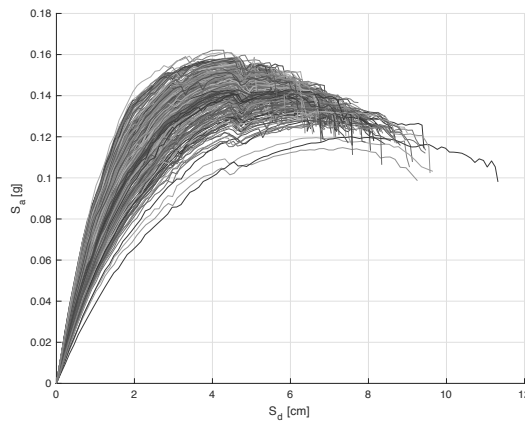


Fig. B-201 Curvas de capacidad en formato desplazamiento-aceleración (ADRS) [Dir. +Y, N2] (fuente: preparado por el autor)

B.4.2.3 Representación bilineal

Dirección +X

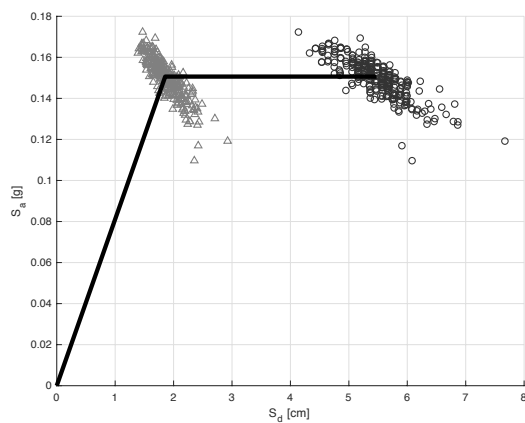


Fig. B-202 Representación bilineal promedio y nubes de valores de los puntos de fluencia y último [Dir. +X, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +Y

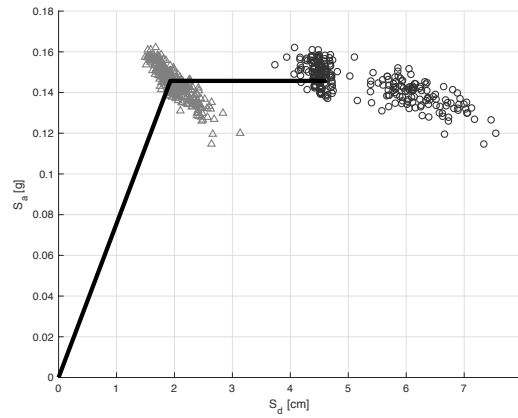


Fig. B-203 Representación bilineal promedio y nubes de valores de los puntos de fluencia y último [Dir. +Y, N2] (fuente: preparado por el autor)

B.4.3 Fragilidad y daño esperado

B.4.3.1 Curvas de fragilidad

Dirección +X

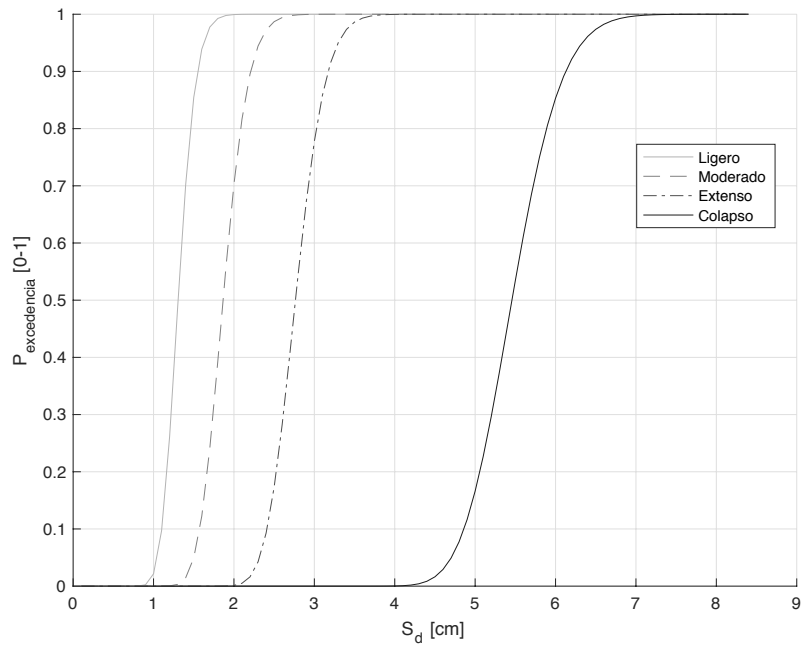


Fig. B-204 Curvas de fragilidad [Dir. +X, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +Y

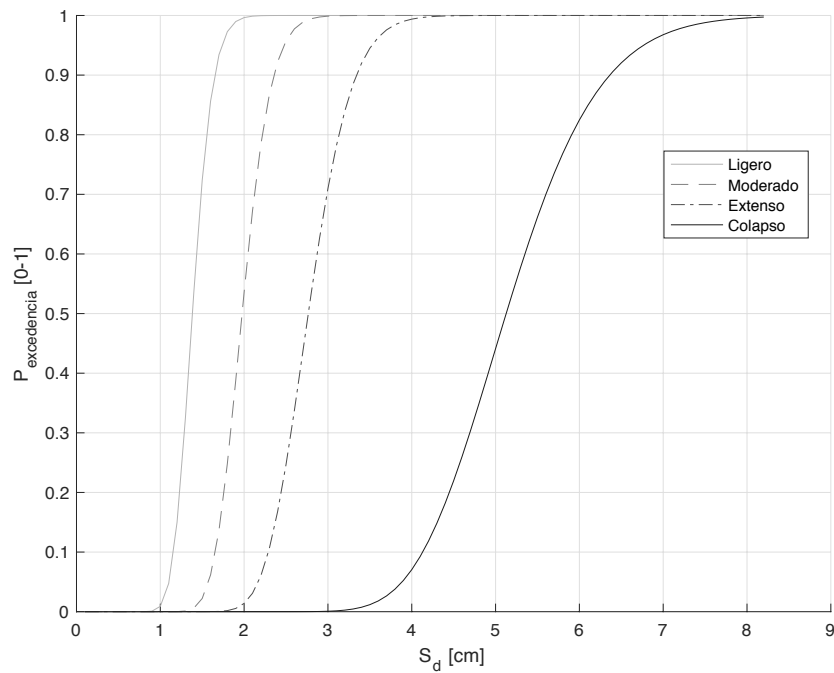


Fig. B-205 Curvas de fragilidad [Dir. +Y, N2] (fuente: preparado por el autor)

B.4.3.2 Estados de daño

Dirección +X

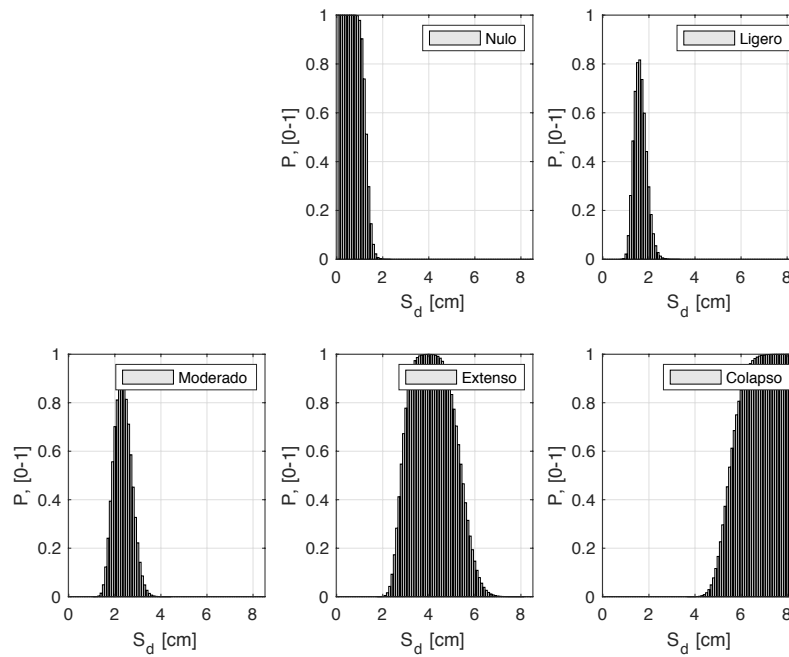


Fig. B-206 Probabilidades de ocurrencia de los distintos estados de daño para diversos desplazamientos espectrales posibles obtenidos a partir de las curvas de fragilidad [Dir. +X, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +Y

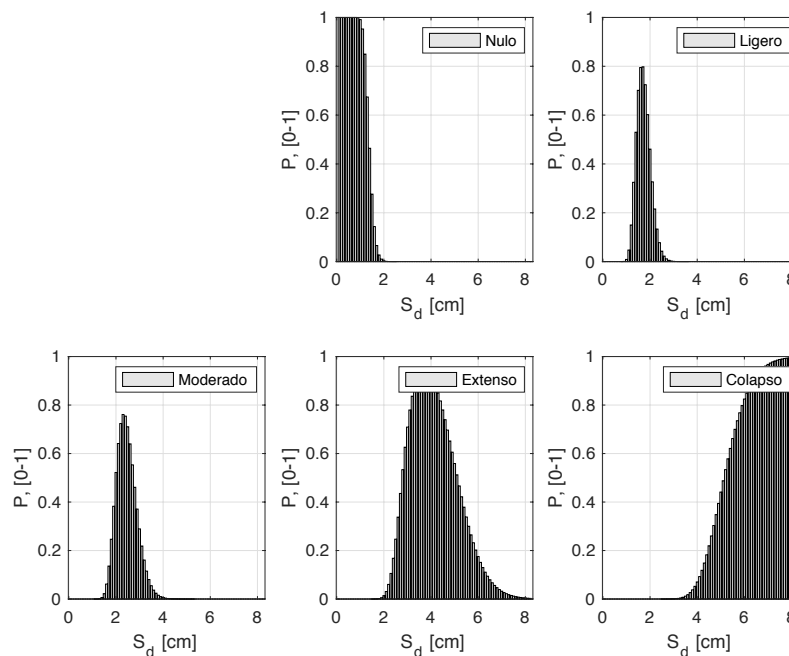


Fig. B-207 Probabilidades de ocurrencia de los distintos estados de daño para diversos desplazamientos espectrales posibles obtenidos a partir de las curvas de fragilidad [Dir. +Y, N2] (fuente: preparado por el autor)

B.4.3.3 Punto de desempeño

Dirección +X, pga = 0.04 g

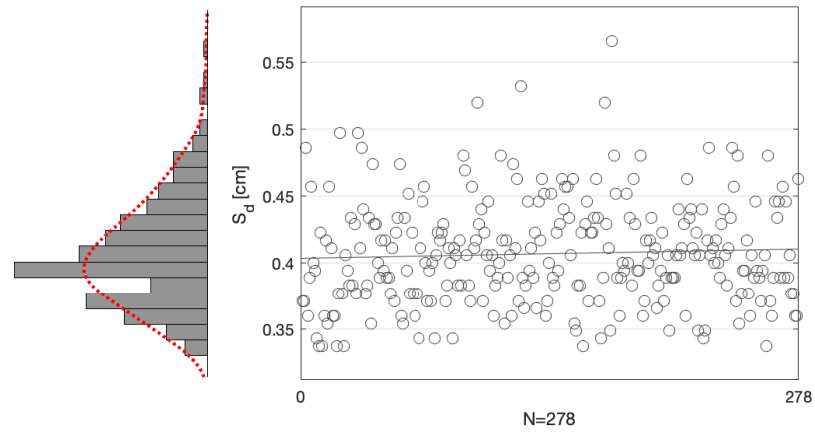


Fig. B-208 Desplazamientos espectrales, S_d , de los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.04g, N2] (fuente: preparado por el autor)

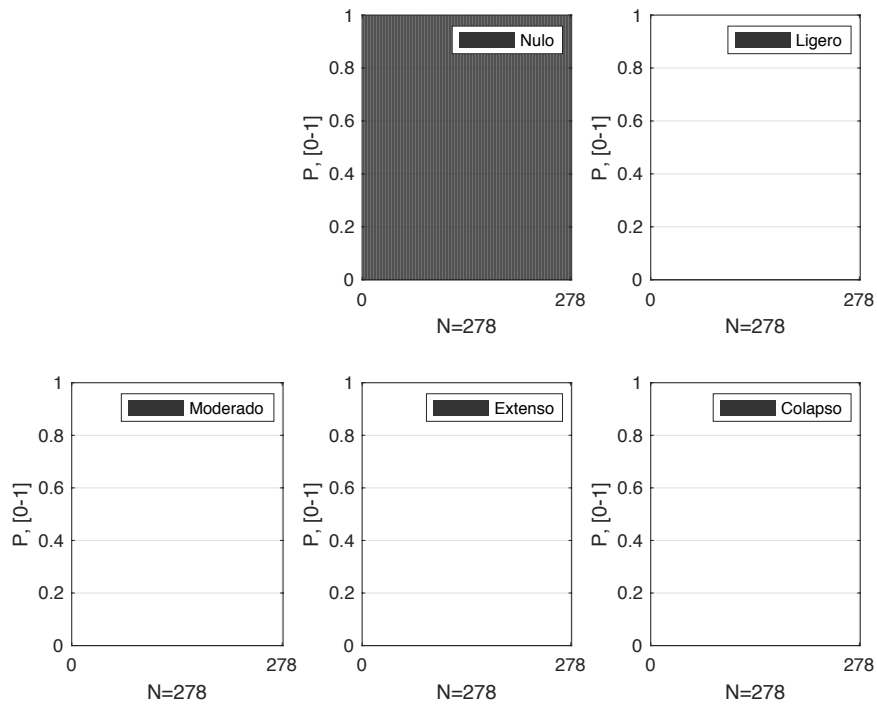


Fig. B-209 Probabilidades de pertenencia de los estados de daño nulo y no nulos para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.04g, N2] (fuente: preparado por el autor)

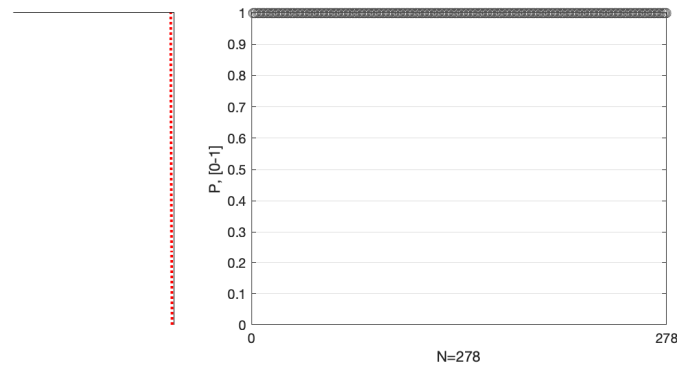


Fig. B-210 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Nulo para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.04g, N2] (fuente: preparado por el autor)

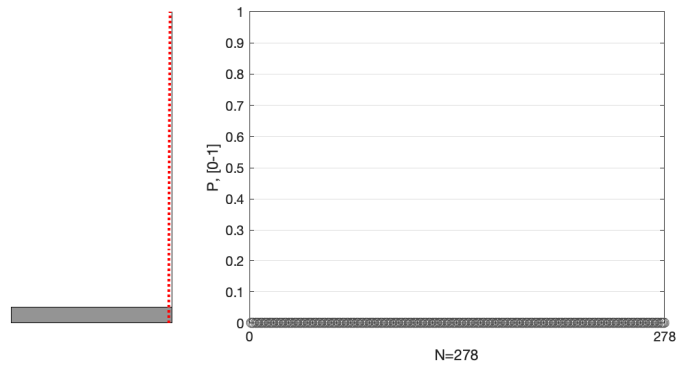


Fig. B-211 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Ligero para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.04g, N2] (fuente: preparado por el autor)

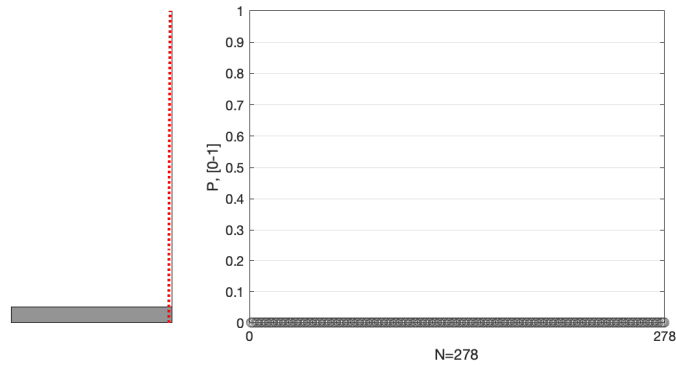


Fig. B-212 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Moderado para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.04g, N2] (fuente: preparado por el autor)

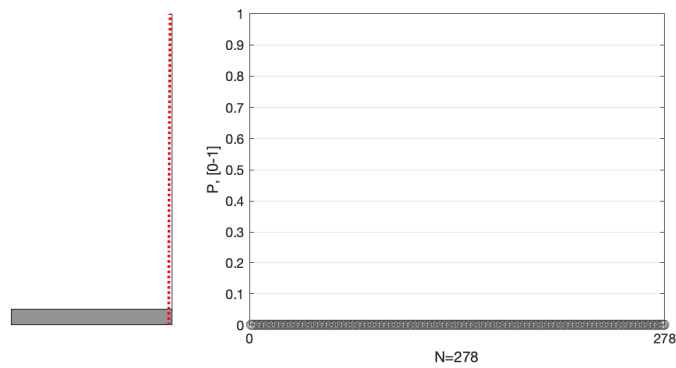


Fig. B-213 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Extenso para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.04g, N2] (fuente: preparado por el autor)

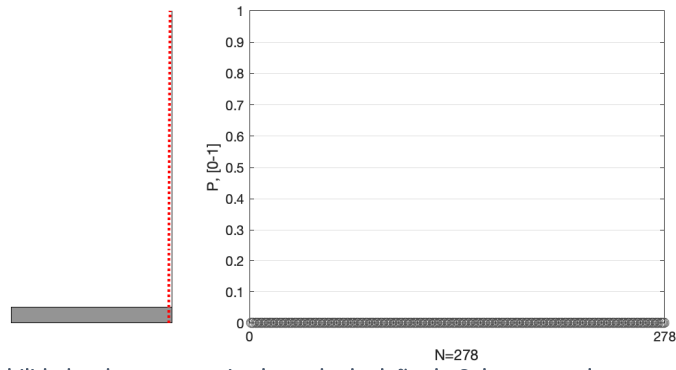


Fig. B-214 Probabilidades de pertenencia al estado de daño de Colapso para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.04g, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +Y, pga = 0.04 g

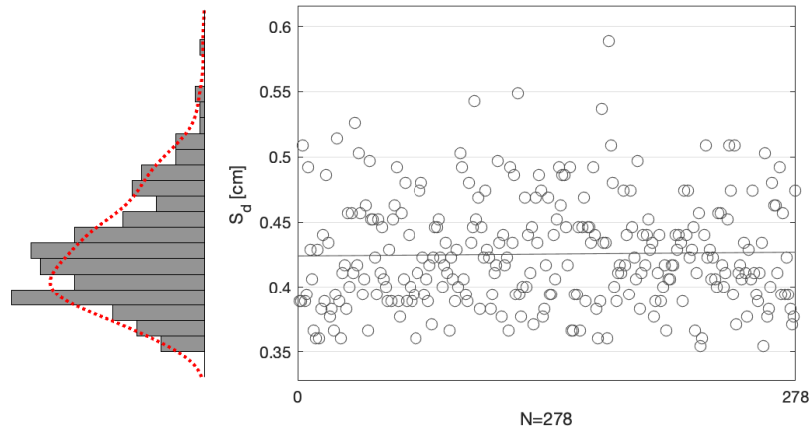


Fig. B-215 Desplazamientos espectrales, S_d , de los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0.04g, N2] (fuente: preparado por el autor)

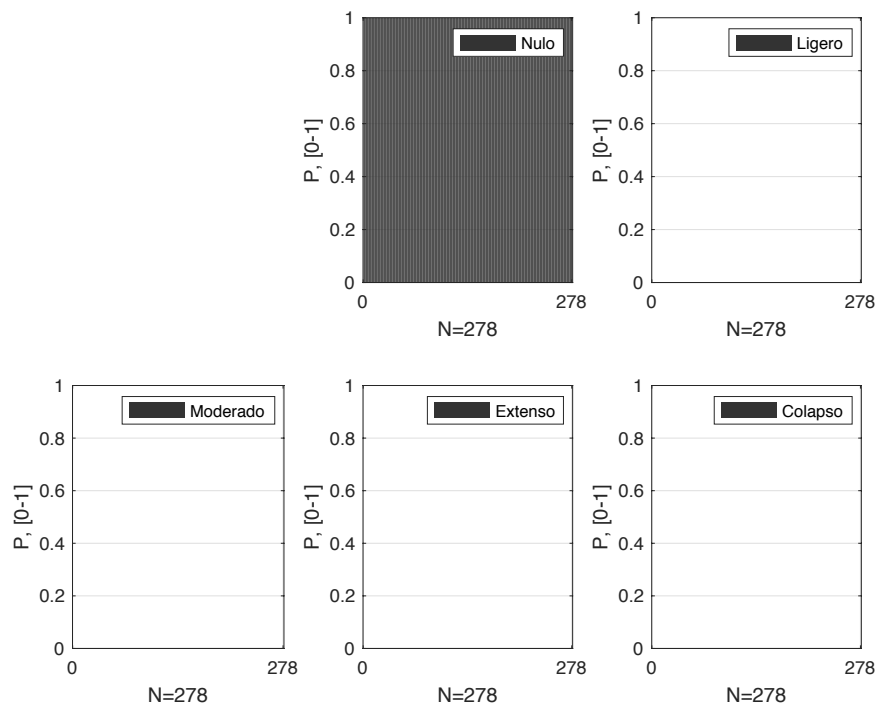


Fig. B-216 Probabilidades de pertenencia de los estados de daño nulo y no nulos para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0.04g, N2] (fuente: preparado por el autor)

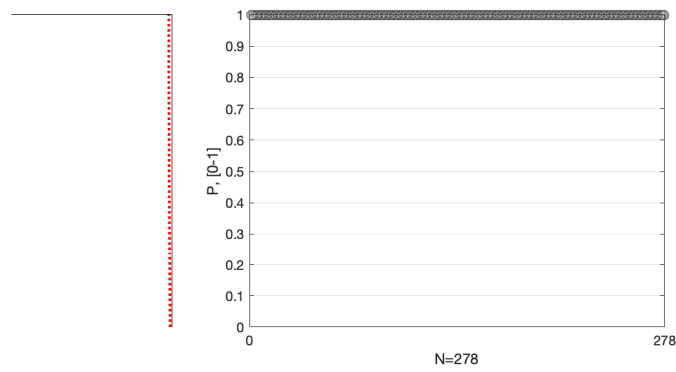


Fig. B-217 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Nulo para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0.04g, N2] (fuente: preparado por el autor)

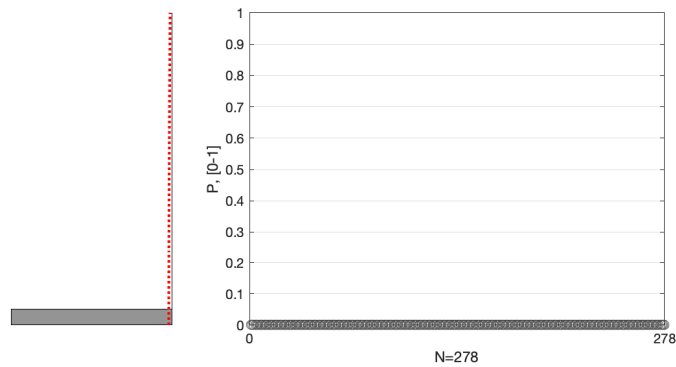


Fig. B-218 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Ligero para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0.04g, N2] (fuente: preparado por el autor)

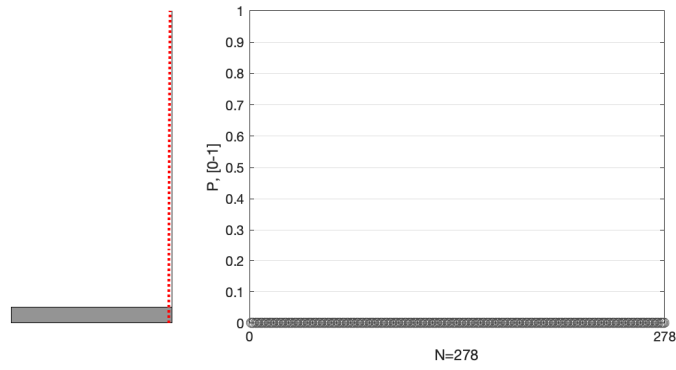


Fig. B-219 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Moderado para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0.04g, N2] (fuente: preparado por el autor)

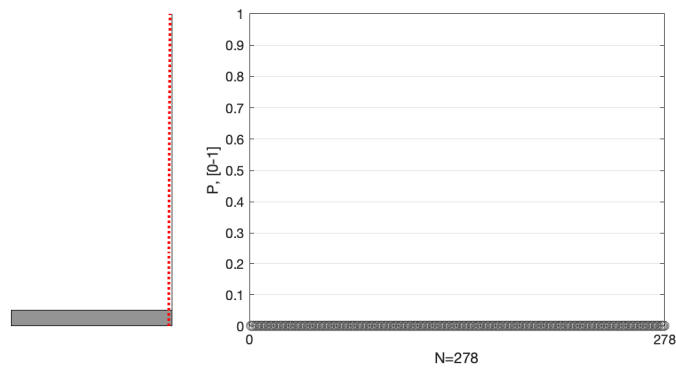


Fig. B-220 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Extenso para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0.04g, N2] (fuente: preparado por el autor)

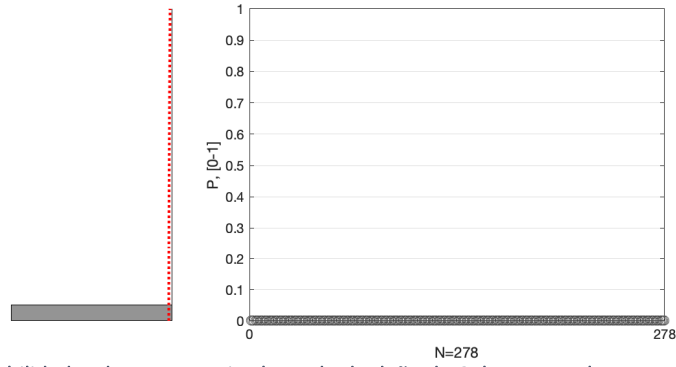


Fig. B-221 Probabilidades de pertenencia al estado de daño de Colapso para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0.04g, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +X, $p_{ga} = 0.141 \text{ g}$

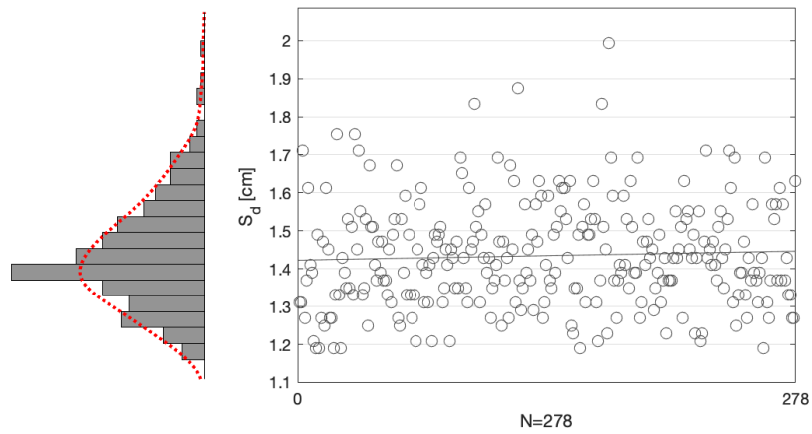


Fig. B-222 Desplazamientos espectrales, S_d , de los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, $p_{ga} = 0.141 \text{ g}$, N2] (fuente: preparado por el autor)

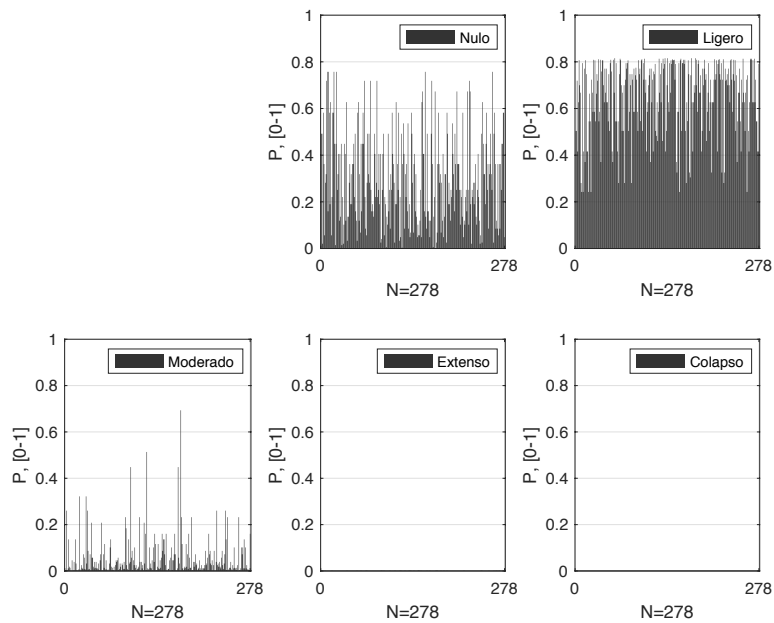


Fig. B-223 Probabilidades de pertenencia de los estados de daño nulo y no nulos para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, $p_{ga} = 0.141 \text{ g}$, N2] (fuente: preparado por el autor)

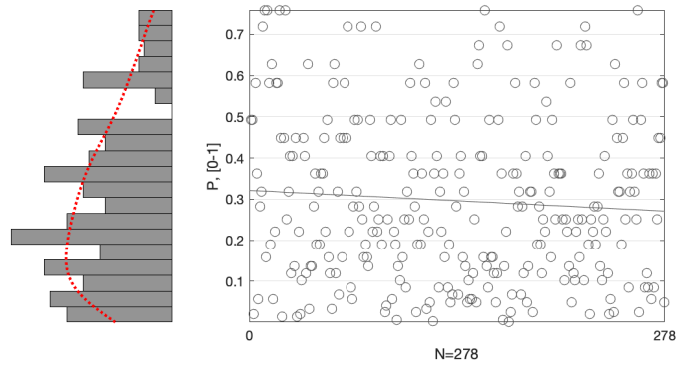


Fig. B-224 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Nulo para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.141g, N2] (fuente: preparado por el autor)

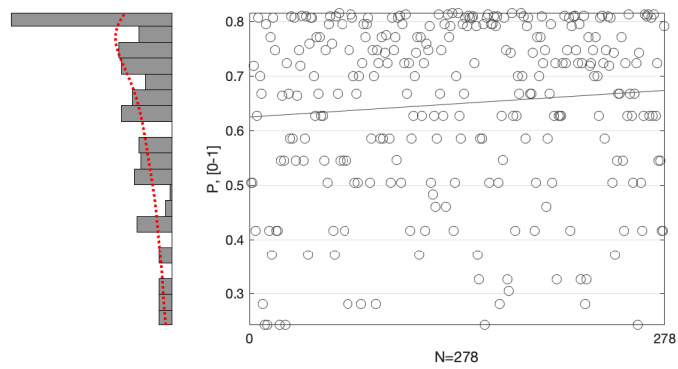


Fig. B-225 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Ligero para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0. 141g, N2] (fuente: preparado por el autor)

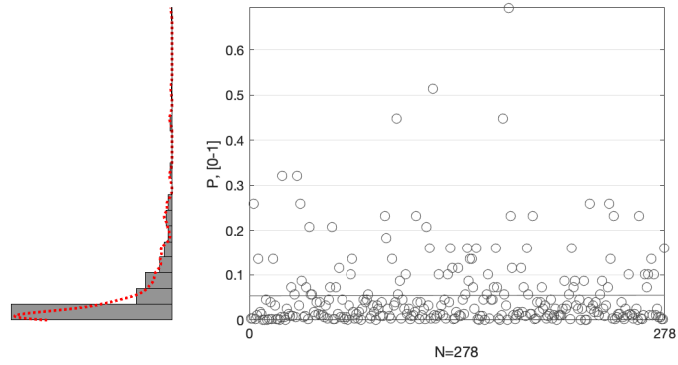


Fig. B-226 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Moderado para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0. 141g, N2] (fuente: preparado por el autor)

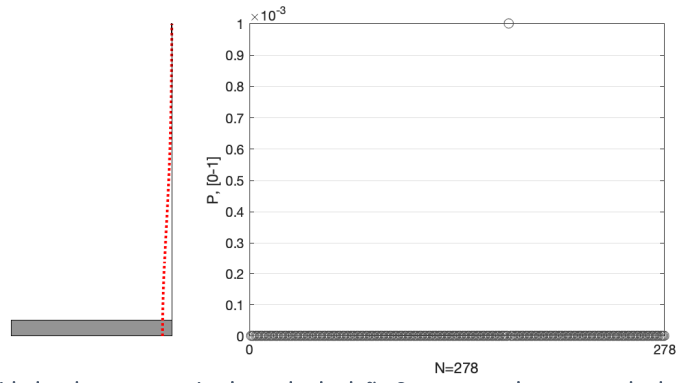


Fig. B-227 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Severo para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0. 141g, N2] (fuente: preparado por el autor)

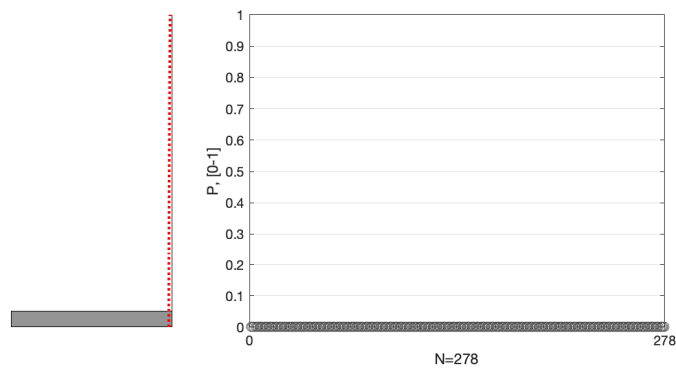


Fig. B-228 Probabilidades de pertenencia al estado de daño de Colapso para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0. 141g, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +Y, pga = 0.141 g

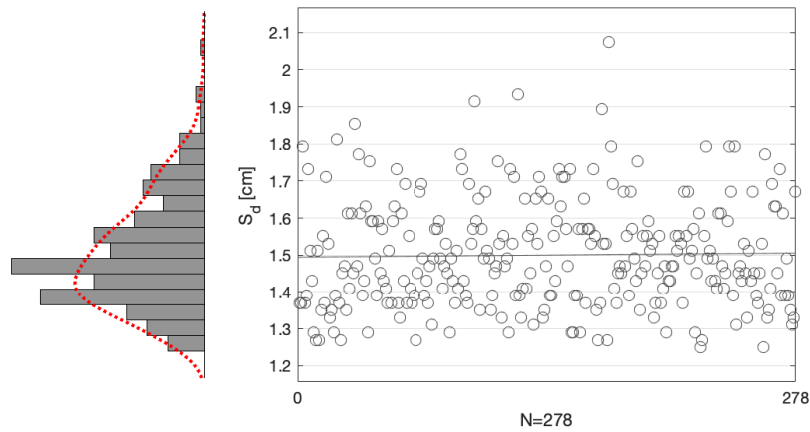


Fig. B-229 Desplazamientos espectrales, S_d , de los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0.141g, N2] (fuente: preparado por el autor)

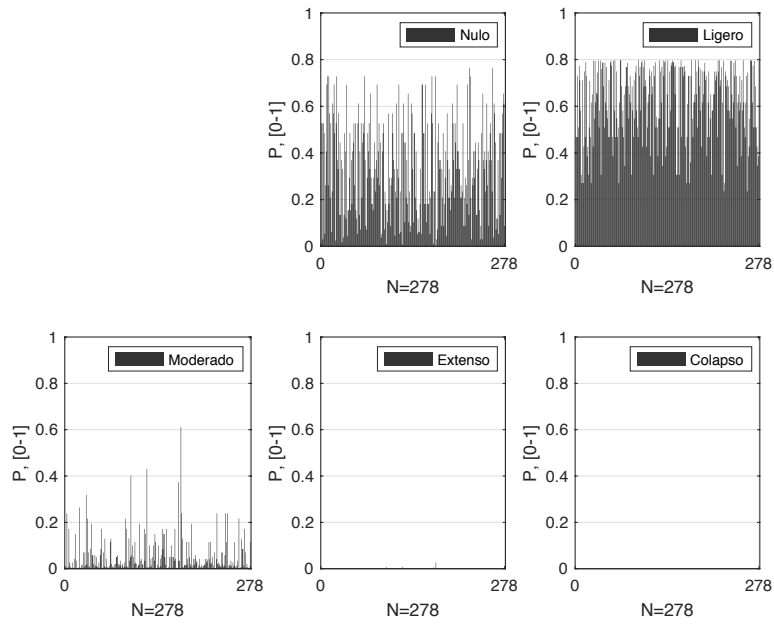


Fig. B-230 Probabilidades de pertenencia de los estados de daño nulo y no nulos para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0.141g, N2] (fuente: preparado por el autor)

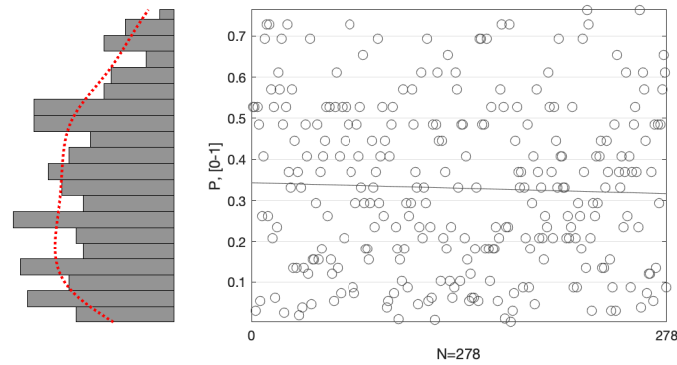


Fig. B-231 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Nulo para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0.141g, N2] (fuente: preparado por el autor)

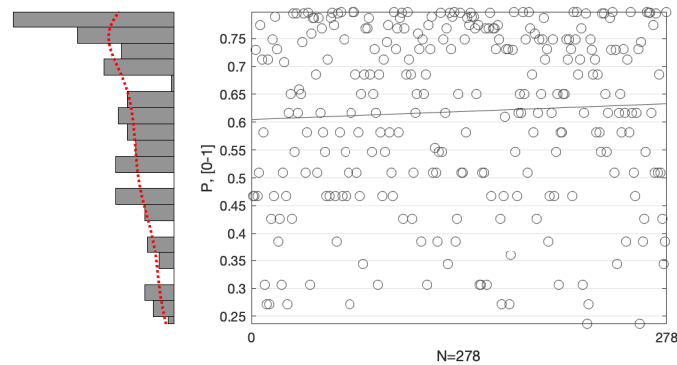


Fig. B-232 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Ligero para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0. 0.141g, N2] (fuente: preparado por el autor)

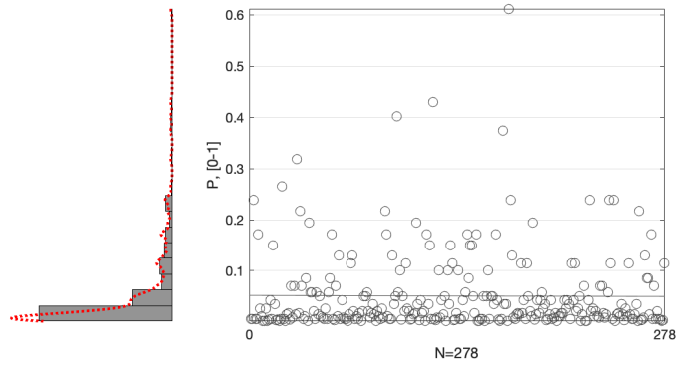


Fig. B-233 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Moderado para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0. 0.141g, N2] (fuente: preparado por el autor)

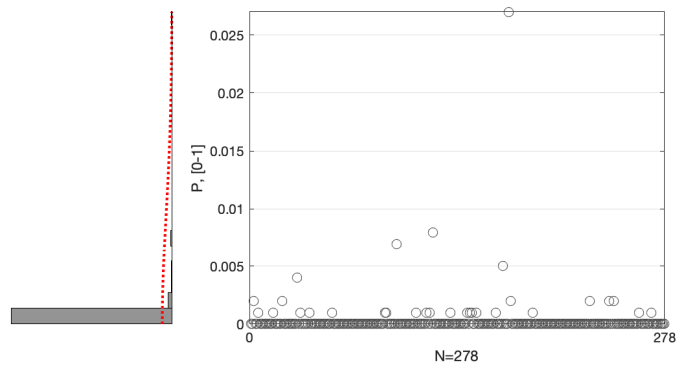


Fig. B-234 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Extenso para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0. 0.141g, N2] (fuente: preparado por el autor)

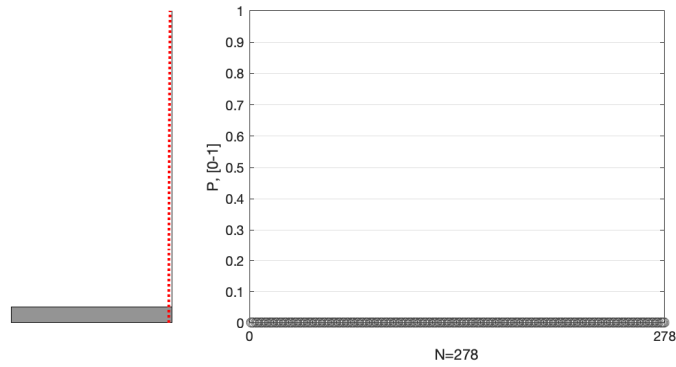


Fig. B-235 Probabilidades de pertenencia al estado de daño de Colapso para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0. 0.141g, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +X, pga = 0.194 g

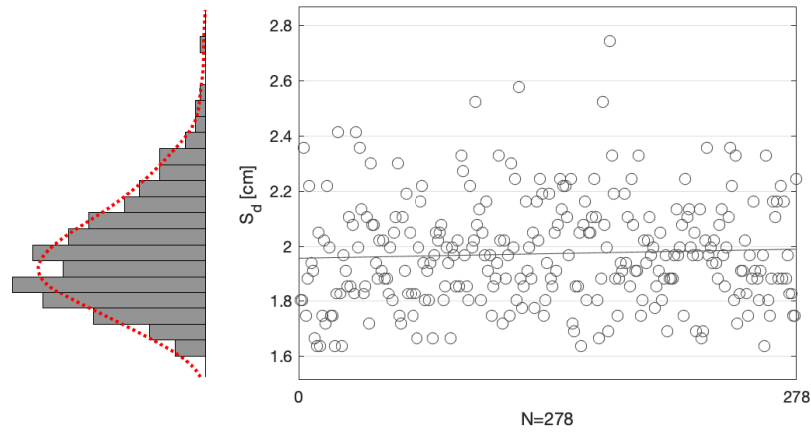


Fig. B-236 Desplazamientos espectrales, S_d , de los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.194g, N2] (fuente: preparado por el autor)

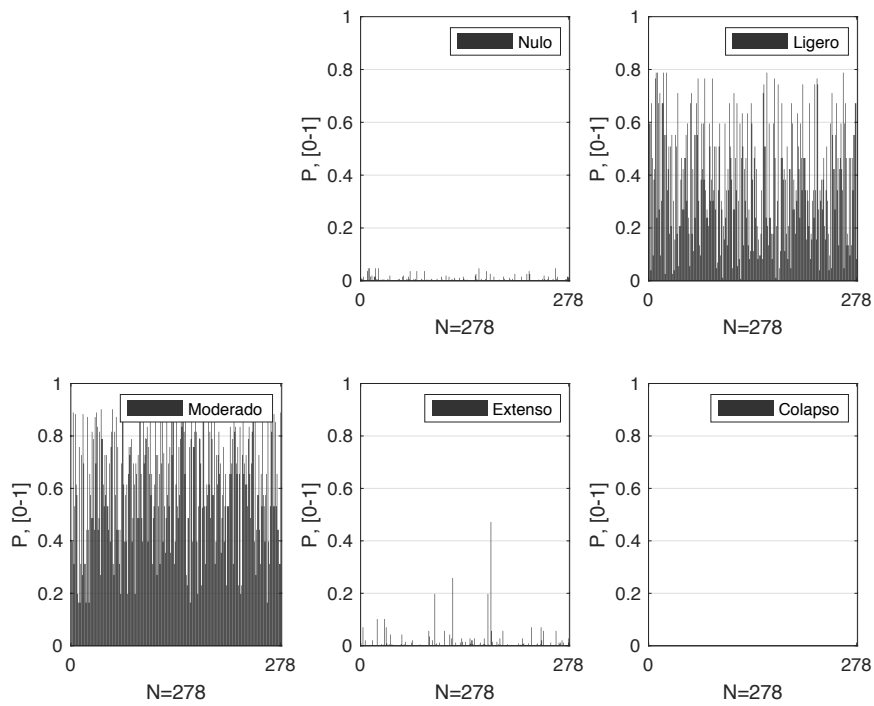


Fig. B-237 Probabilidades de pertenencia de los estados de daño nulo y no nulos para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.194g, N2] (fuente: preparado por el autor)

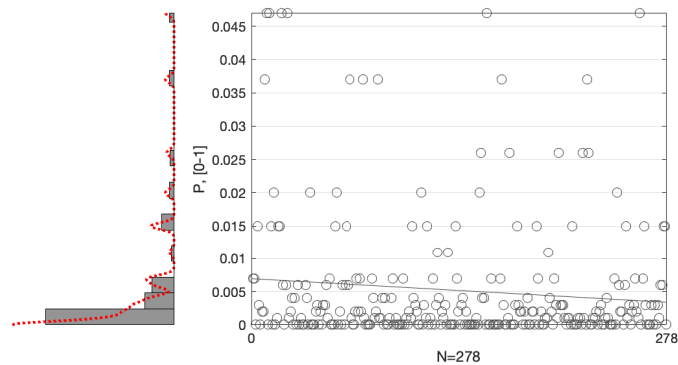


Fig. B-238 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Nulo para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.194g, N2] (fuente: preparado por el autor)

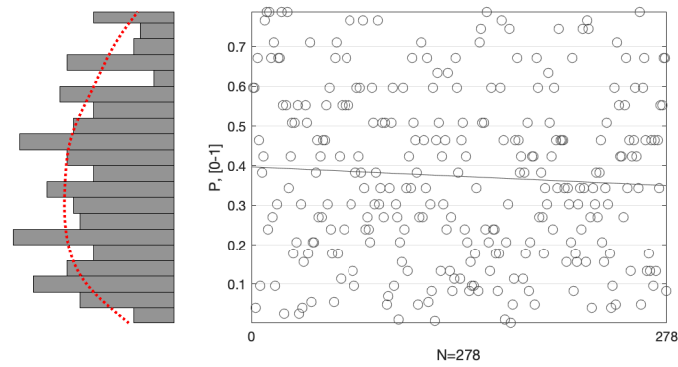


Fig. B-239 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Ligero para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.194g, N2] (fuente: preparado por el autor)

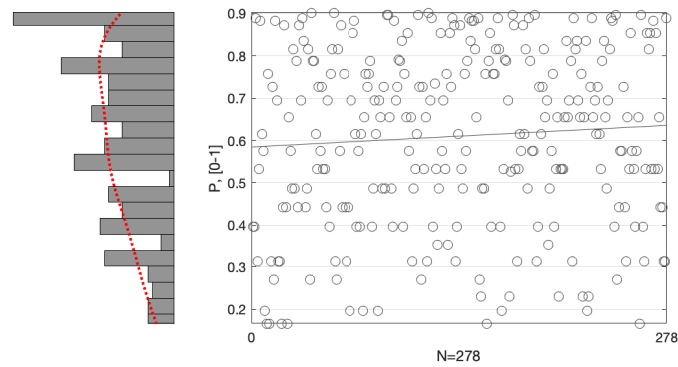


Fig. B-240 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Moderado para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.194g, N2] (fuente: preparado por el autor)

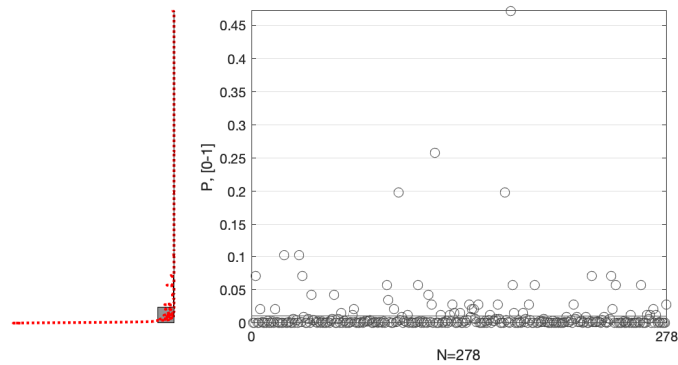


Fig. B-241 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Severo para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.194g, N2] (fuente: preparado por el autor)

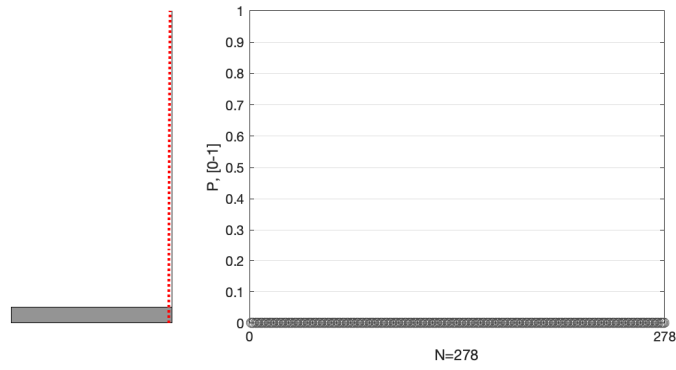


Fig. B-242 Probabilidades de pertenencia al estado de daño de Colapso para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.194g, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +Y, pga = 0. 194 g

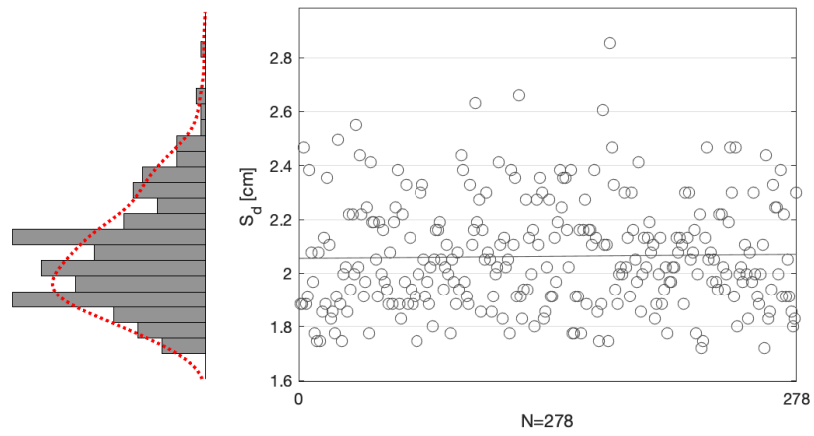


Fig. B-243 Desplazamientos espectrales, S_d , de los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0.194g, N2] (fuente: preparado por el autor)

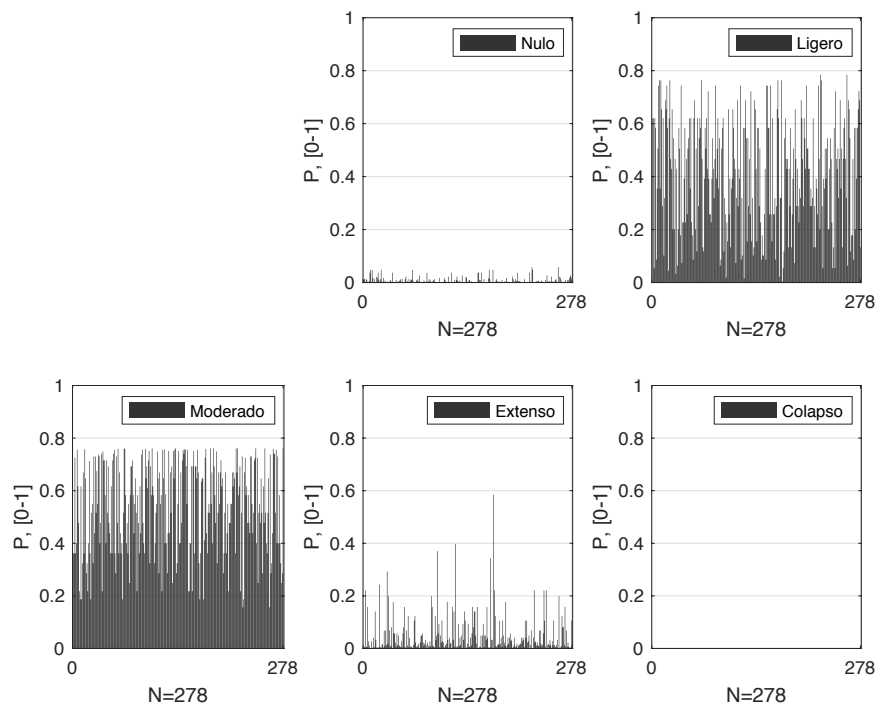


Fig. B-244 Probabilidades de pertenencia de los estados de daño nulo y no nulos para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0.194g, N2] (fuente: preparado por el autor)

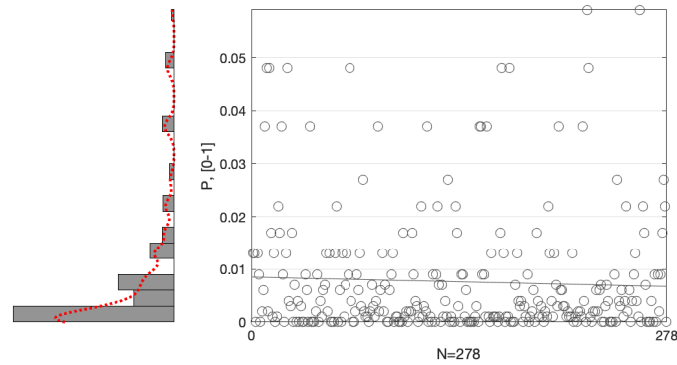


Fig. B-245 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Nulo para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0.194g, N2] (fuente: preparado por el autor)

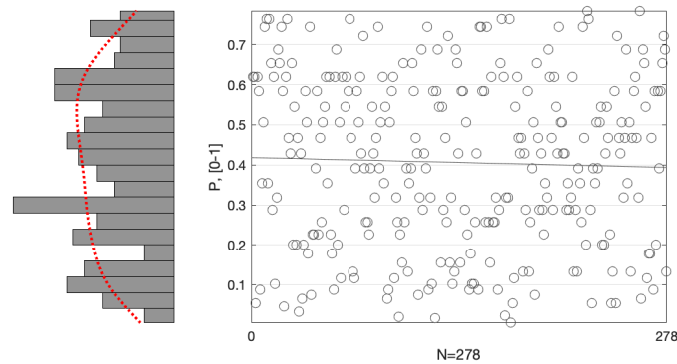


Fig. B-246 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Ligero para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0.0. 194g, N2] (fuente: preparado por el autor)

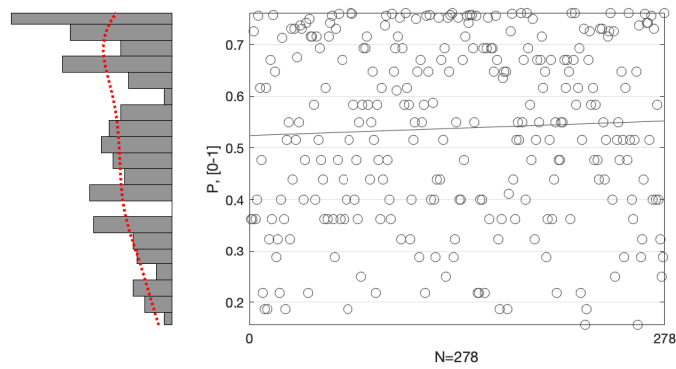


Fig. B-247 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Moderado para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0. 0. 194g, N2] (fuente: preparado por el autor)

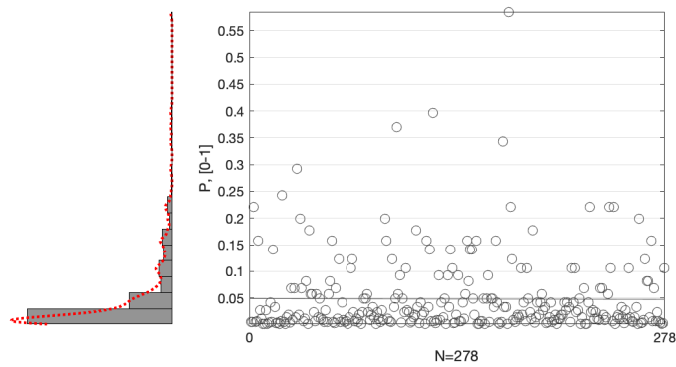


Fig. B-248 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Extenso para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0. 0. 194g, N2] (fuente: preparado por el autor)

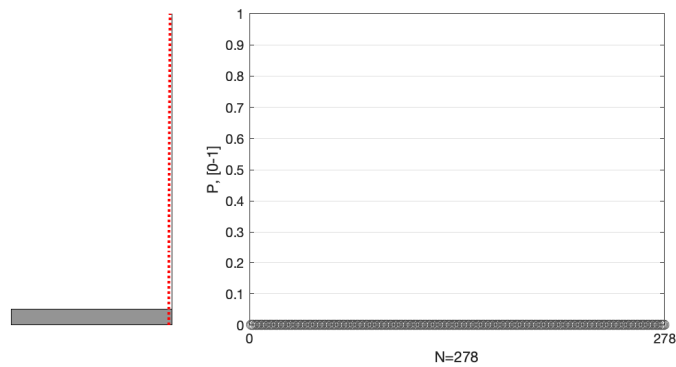


Fig. B-249 Probabilidades de pertenencia al estado de daño de Colapso para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0. 0. 194g, N2] (fuente: preparado por el autor)

B.4.3.4 Grado de daño medio

Dirección +X

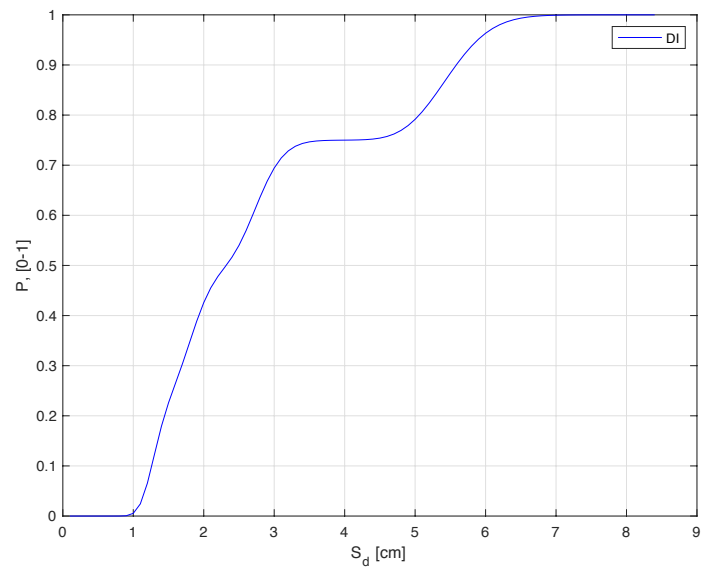


Fig. B-250 Curva del grado de daño medio (i.e. índice de Daño, DI) [Dir. +X, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +X, pga = 0.04 g

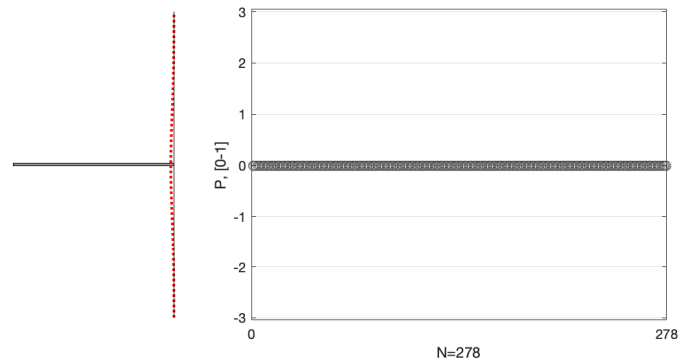


Fig. B-251 Probabilidades de ocurrencia de daño medio para los distintos puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.04g, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +X, pga = 0.141 g

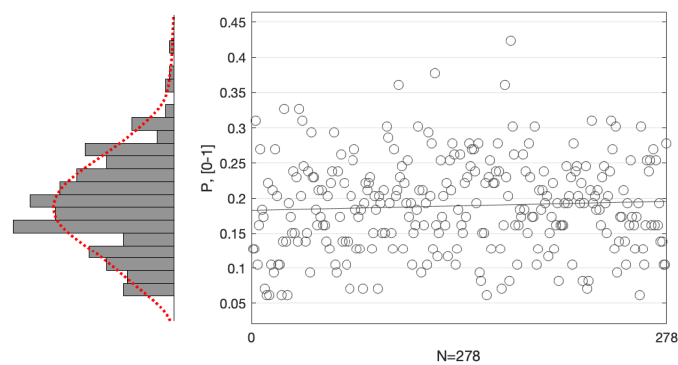


Fig. B-252 Probabilidades de ocurrencia de daño medio para los distintos puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.141g, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +X, pga = 0.194 g

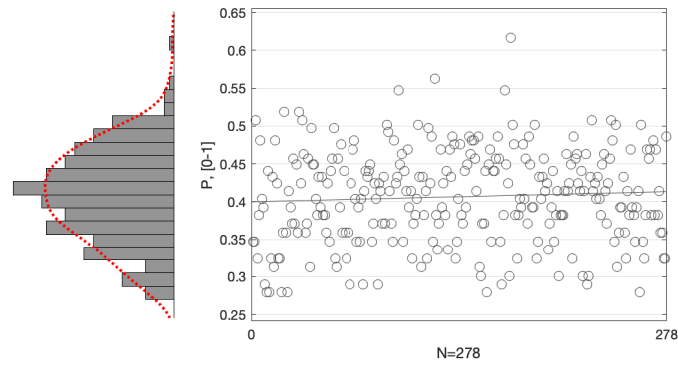


Fig. B-253 Probabilidades de ocurrencia de daño medio para los distintos puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.194g, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +Y

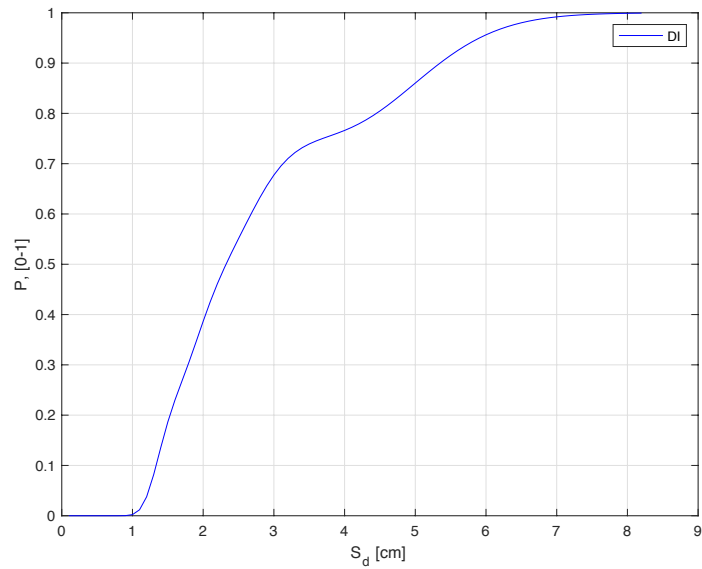


Fig. B-254 Curva del grado de daño medio (i.e. índice de Daño, DI) [Dir. +Y, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +Y, pga = 0.04 g

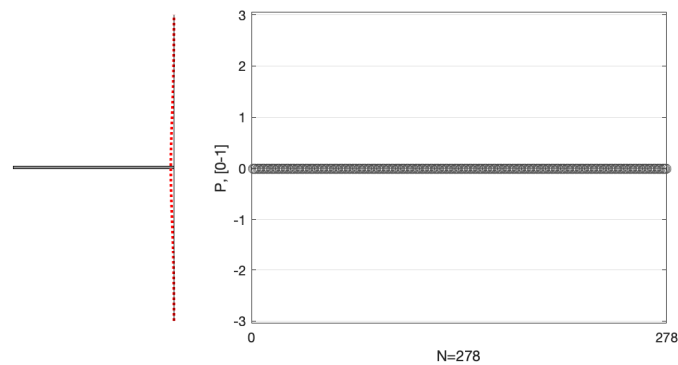


Fig. B-255 Probabilidades de ocurrencia de daño medio para los distintos puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0.04g, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +Y, pga = 0.141 g

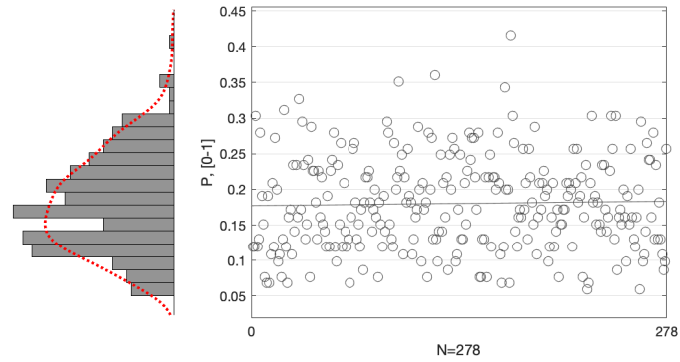


Fig. B-256 Probabilidades de ocurrencia de daño medio para los distintos puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0.141g, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +Y, pga = 0.194 g

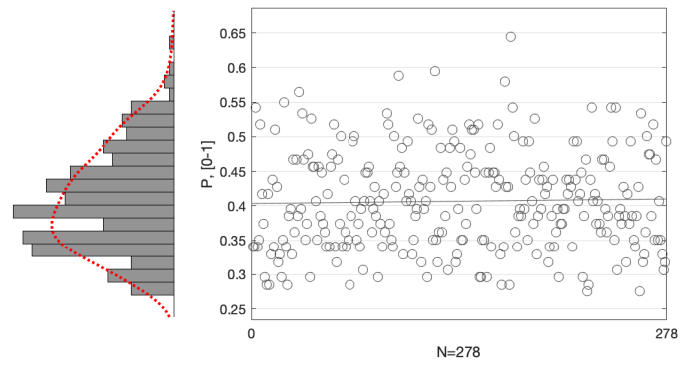


Fig. B-257 Probabilidades de ocurrencia de daño medio para los distintos puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0.194g, N2] (fuente: preparado por el autor)

B.4.4 Análisis dinámico incremental

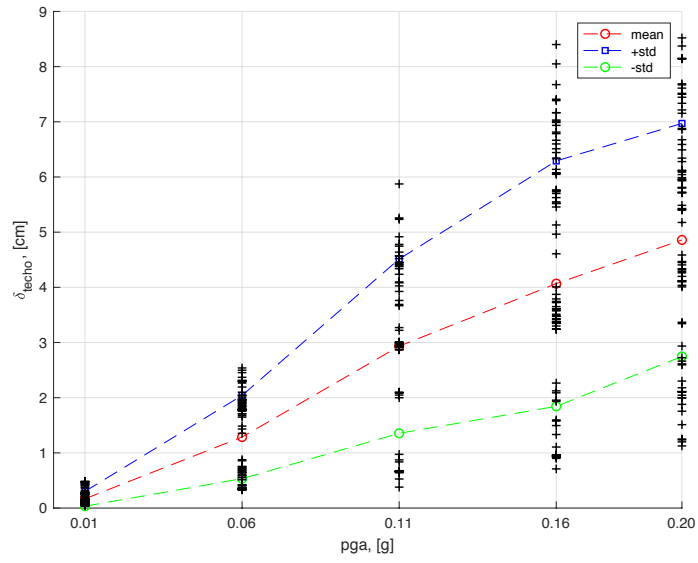


Fig. B-258 Desplazamiento en el techo vs pga de los distintos análisis dinámicos realizados en el edificio ED-04 en la dirección +X (fuente: preparado por el autor)

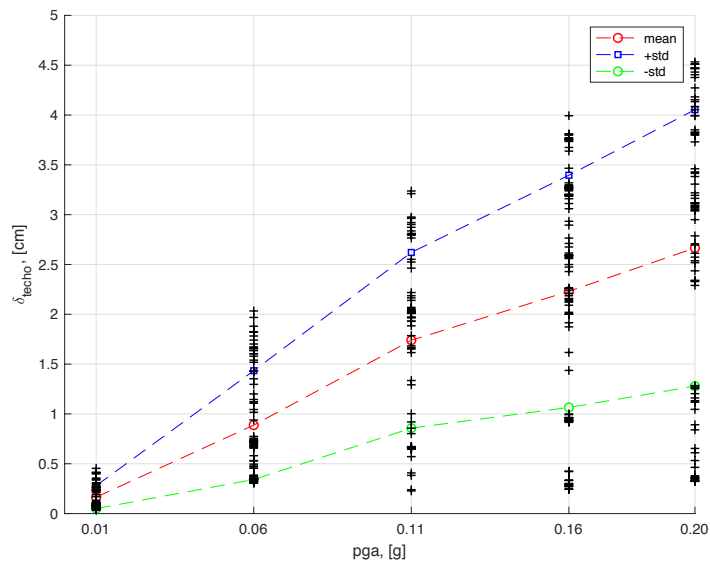


Fig. B-259 Desplazamiento en el techo vs pga de los distintos análisis dinámicos realizados en el edificio ED-04 en la dirección +Y (fuente: preparado por el autor)

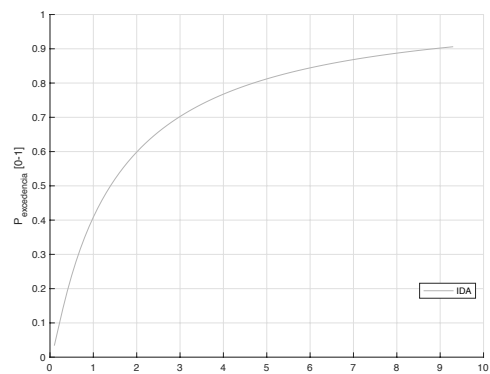
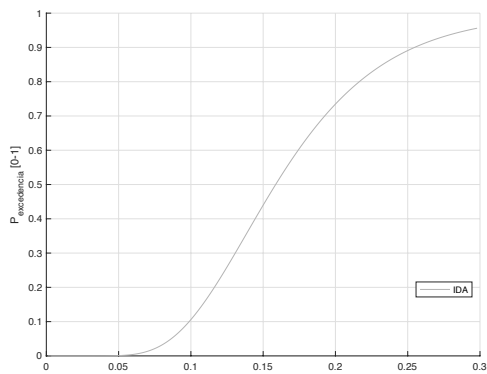


Fig. B-260 Curva de daño esperado para el edificio ED-04 y un $IM = pga$ (izq) ó $IM = S_d$ (der.) (fuente: preparado por el autor)

Tabla B-12 Estadísticas básicas de los conjuntos de puntos asociados a cada valor de pga del edificio ED-04 en ambas direcciones principales [%] (fuente: preparado por el autor)

	Dir.	min	max	mean	median	std
$P_{0.01g}$	+X	0,04	0,49	0,17	0,10	0,13
	+Y	0,03	0,45	0,16	0,10	0,11
$P_{0.06g}$	+X	0,33	2,54	1,29	1,57	0,75
	+Y	0,31	2,03	0,89	0,71	0,55
$P_{0.11g}$	+X	0,38	5,87	2,93	3,00	1,58
	+Y	0,23	3,24	1,74	1,97	0,88
$P_{0.16g}$	+X	0,71	8,40	4,07	3,65	2,22
	+Y	0,24	3,99	2,23	2,47	1,17
$P_{0.20g}$	+X	1,13	8,52	4,86	5,29	2,11
	+Y	0,32	4,53	2,67	3,06	1,39

B.5 AG-01

B.5.1 Análisis modal

Tabla B-13 Resultados del análisis modal para el edificio agregado AG-01 (fuente: preparado por el autor)

# Modo	T [s]	f [rad/s]	ω [Hz]	Mx [kg]	My [kg]	Mz [kg]	ΣM [kg]
1	0,626	1,60	10,04	0,46	3772932,95	3,10	3772936,51
2	0,572	1,75	10,98	3961420,31	15,79	10,92	3961447,02
3	0,532	1,88	11,80	465615,54	143,21	2,61	465761,35
4	0,210	4,76	29,90	28,39	700220,28	100,75	700349,42
5	0,198	5,06	31,76	364913,41	123,70	60,05	365097,16
6	0,183	5,47	34,40	66008,26	34,85	131,92	66175,04
7	0,139	7,19	45,17	4,12	781,39	3849533,67	3850319,18
8	0,136	7,35	46,19	149,23	5,88	7040,08	7195,19
9	0,130	7,70	48,39	125,49	23411,06	304275,99	327812,54
10	0,125	7,99	50,22	19760,40	0,84	6434,11	26195,35
11	0,122	8,20	51,51	825,57	22362,54	922,40	24110,51
12	0,120	8,31	52,23	49,29	11330,43	13313,74	24693,46
13	0,118	8,46	53,15	22,56	3098,62	47671,55	50792,73
14	0,113	8,83	55,47	3336,98	54,77	143,24	3534,99
15	0,113	8,88	55,82	27,06	61,91	23718,76	23807,73
16	0,111	9,03	56,73	894,37	11,15	122,47	1027,99
17	0,109	9,14	57,40	216,98	17,24	62,76	296,97
18	0,108	9,23	57,97	341,27	14,51	77,15	432,93
19	0,108	9,28	58,30	2101,55	1,48	16,08	2119,12
20	0,105	9,49	59,65	11710,13	8,76	373,41	12092,30
21	0,104	9,62	60,46	703,80	4,14	424,59	1132,53

Tabla B-14 Resultados del análisis modal para el edificio agregado AG-01 (continuación) (fuente: preparado por el autor)

# Modo	T [s]	IF _x [%]	IF _y [%]	IF _z [%]	RAM _x [%]	RAM _y [%]	RAM _z [%]	AAM _x [%]	AAM _y [%]	AAM _z [%]
-----------	----------	------------------------	------------------------	------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------

1	0,626	0,000	100,000	0,000	0,000	83,203	0,000	0,000	71,620	0,000
2	0,572	99,999	0,000	0,000	80,874	0,000	0,000	75,198	0,000	0,000
3	0,532	99,969	0,031	0,001	9,506	0,003	0,000	8,839	0,003	0,000
4	0,210	0,004	99,982	0,014	0,001	15,442	0,002	0,001	13,292	0,002
5	0,198	99,950	0,034	0,016	7,450	0,003	0,001	6,927	0,002	0,001
6	0,183	99,748	0,053	0,199	1,348	0,001	0,003	1,253	0,001	0,003
7	0,139	0,000	0,020	99,980	0,000	0,017	90,483	0,000	0,015	73,075
8	0,136	2,074	0,082	97,844	0,003	0,000	0,165	0,003	0,000	0,134
9	0,130	0,038	7,142	92,820	0,003	0,516	7,152	0,002	0,444	5,776
10	0,125	75,435	0,003	24,562	0,403	0,000	0,151	0,375	0,000	0,122
11	0,122	3,424	92,750	3,826	0,017	0,493	0,022	0,016	0,425	0,018
12	0,120	0,200	45,884	53,916	0,001	0,250	0,313	0,001	0,215	0,253
13	0,118	0,044	6,101	93,855	0,000	0,068	1,121	0,000	0,059	0,905
14	0,113	94,398	1,549	4,052	0,068	0,001	0,003	0,063	0,001	0,003
15	0,113	0,114	0,260	99,626	0,001	0,001	0,558	0,001	0,001	0,450
16	0,111	87,002	1,084	11,914	0,018	0,000	0,003	0,017	0,000	0,002
17	0,109	73,064	5,804	21,132	0,004	0,000	0,001	0,004	0,000	0,001
18	0,108	78,828	3,352	17,820	0,007	0,000	0,002	0,006	0,000	0,001
19	0,108	99,171	0,070	0,759	0,043	0,000	0,000	0,040	0,000	0,000
20	0,105	96,840	0,072	3,088	0,239	0,000	0,009	0,222	0,000	0,007
21	0,104	62,144	0,366	37,490	0,014	0,000	0,010	0,013	0,000	0,008

B.5.2 Análisis de capacidad

B.5.2.1 Curva de capacidad

Dirección +X

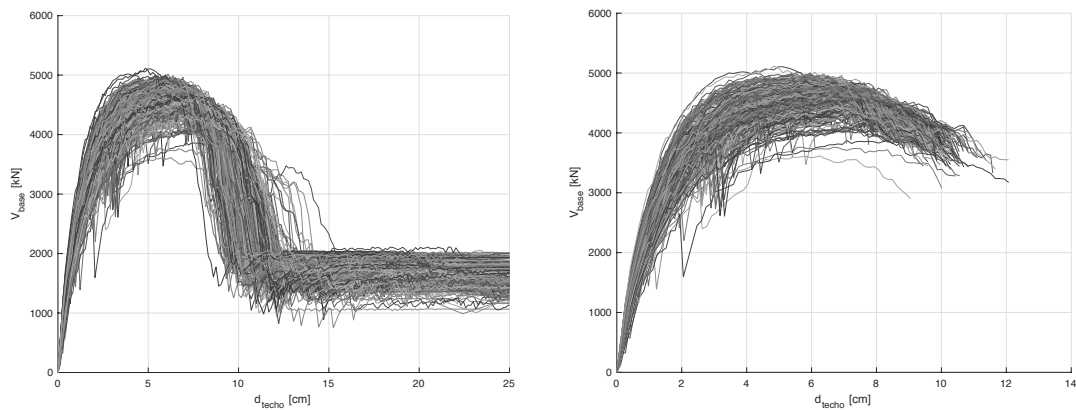


Fig. B-261 Curvas de capacidad originales (izq. – 3muri) y procesadas (der. - criterio de punto último) [Dir. +X]
(fuente: preparado por el autor)

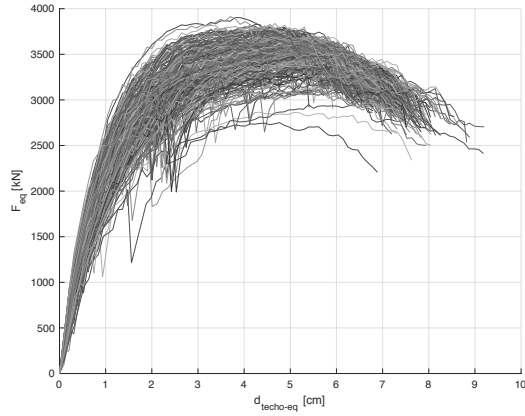


Fig. B-262 Curvas de capacidad de los sistemas equivalentes de 1GDL [Dir. +X, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +Y

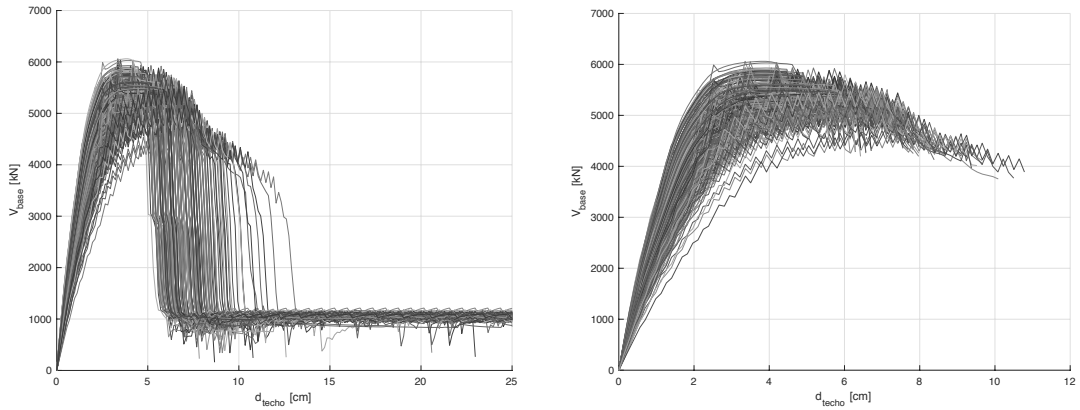


Fig. B-263 Curvas de capacidad originales (izq. - 3muri) y procesadas (der. - criterio de punto último) [Dir. +Y] (fuente: preparado por el autor)

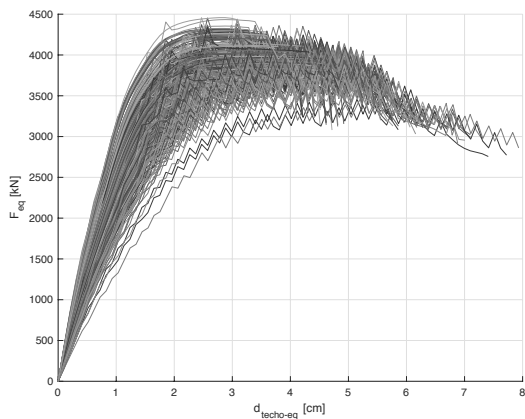


Fig. B-264 Curvas de capacidad de los sistemas equivalentes de 1GDL [Dir. +Y, N2] (fuente: preparado por el autor)

B.5.2.2 Curva de capacidad en formato aceleración-desplazamiento (ADRS)

Dirección +X

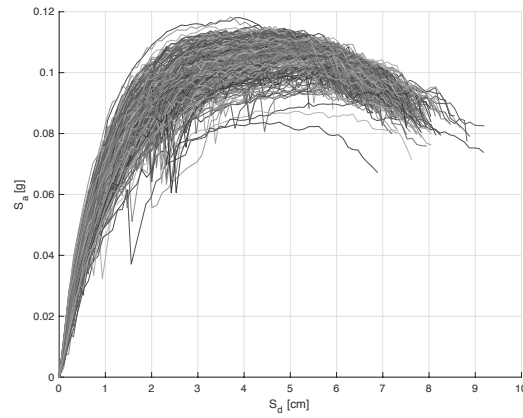


Fig. B-265 Curvas de capacidad en formato desplazamiento-aceleración (ADRS) [Dir. +Y, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +Y

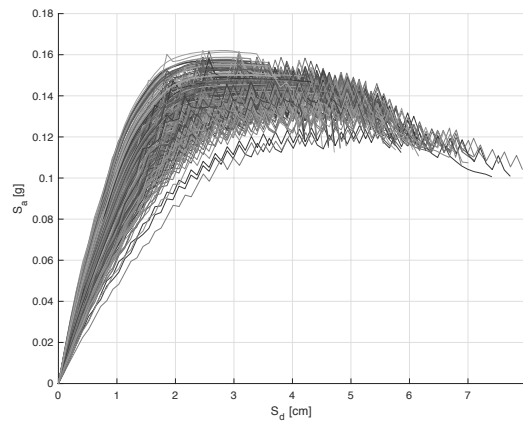


Fig. B-266 Curvas de capacidad en formato desplazamiento-aceleración (ADRS) [Dir. +Y, N2] (fuente: preparado por el autor)

B.5.2.3 Representación bilineal

Dirección +X

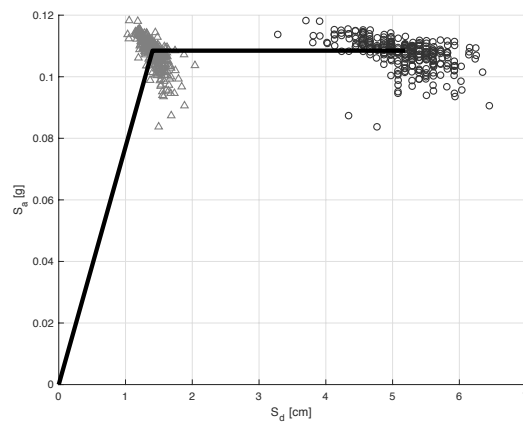


Fig. B-267 Representación bilineal promedio y nubes de valores de los puntos de fluencia y último [Dir. +X, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +Y

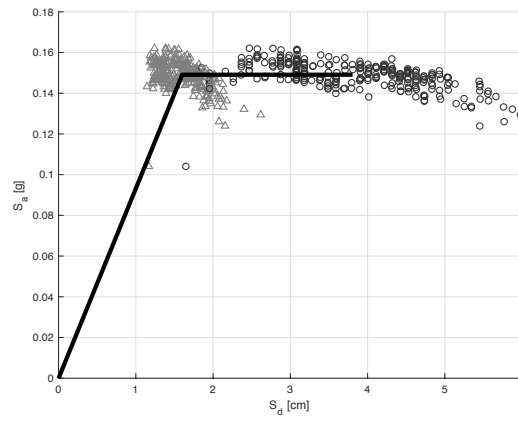


Fig. B-268 Representación bilineal promedio y nubes de valores de los puntos de fluencia y último [Dir. +Y, N2] (fuente: preparado por el autor)

B.5.3 Fragilidad y daño esperado

B.5.3.1 Curvas de fragilidad

Dirección +X

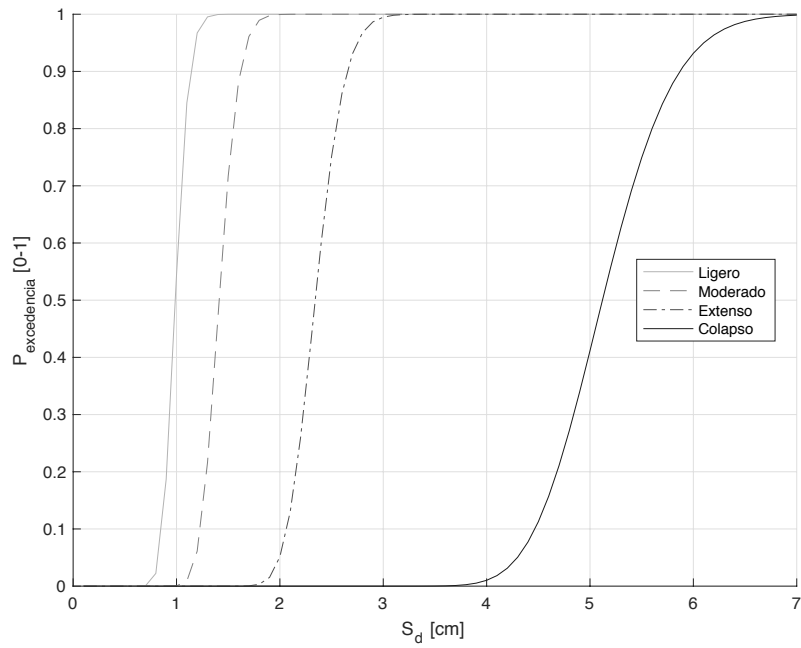


Fig. B-269 Curvas de fragilidad [Dir. +X, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +Y

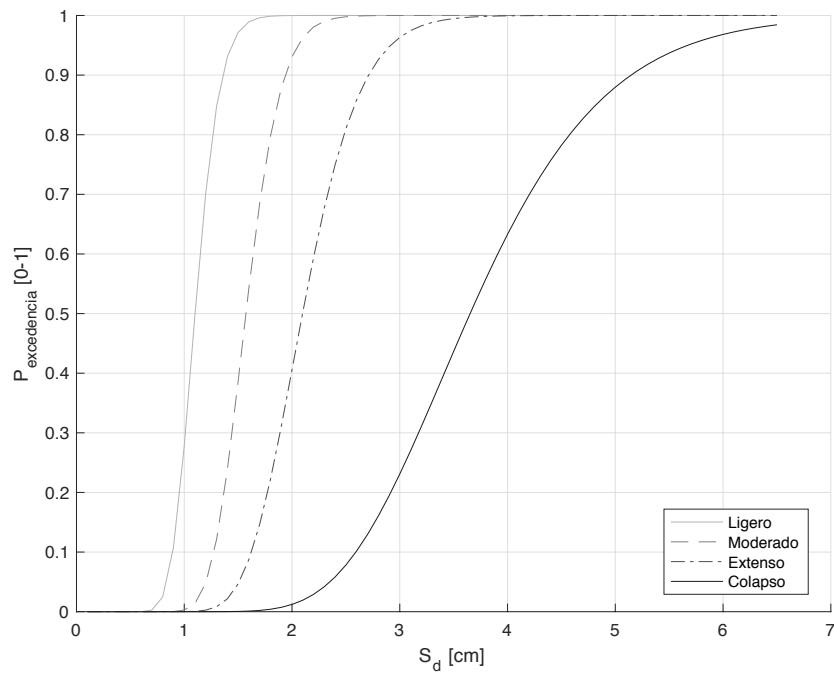


Fig. B-270 Curvas de fragilidad [Dir. +Y, N2] (fuente: preparado por el autor)

B.5.3.2 Estados de daño

Dirección +X

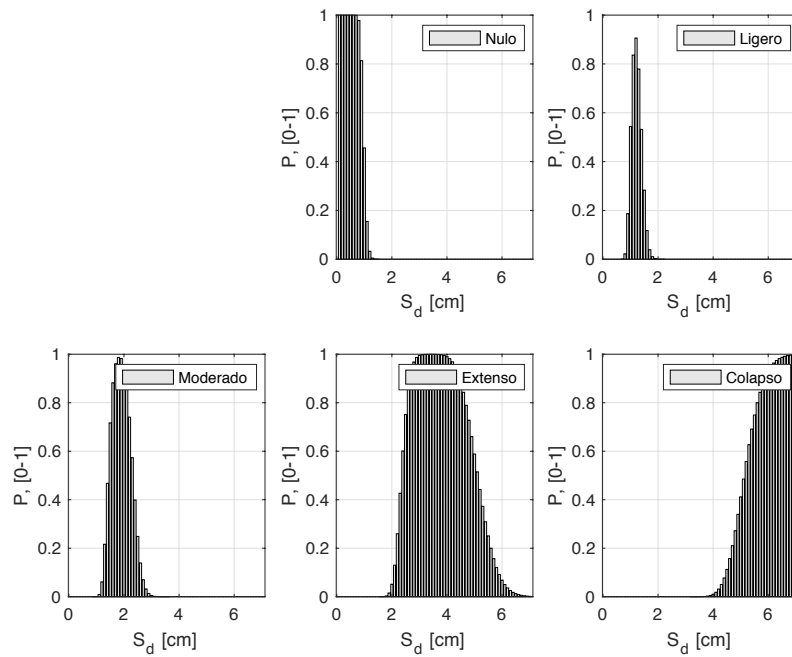


Fig. B-271 Probabilidades de ocurrencia de los distintos estados de daño para diversos desplazamientos espectrales posibles obtenidos a partir de las curvas de fragilidad [Dir. +X, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +Y

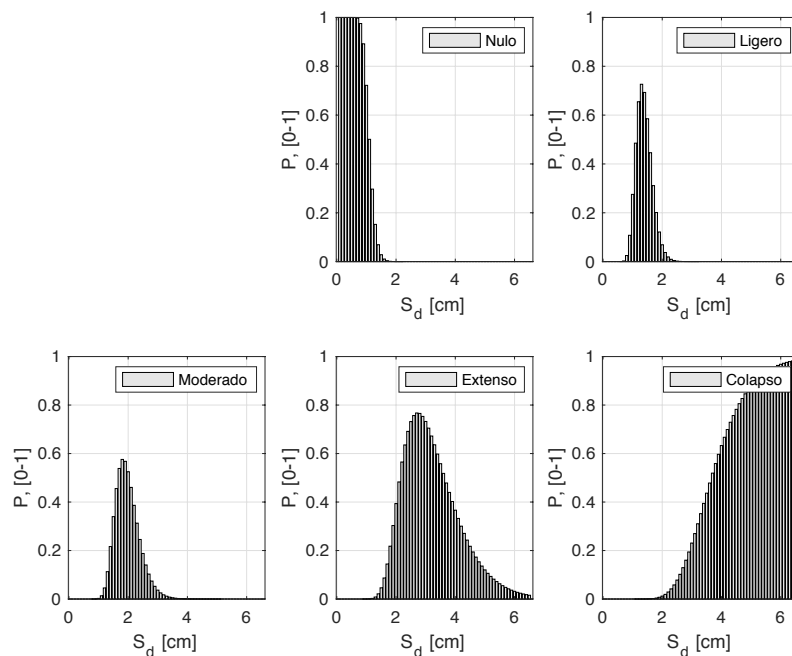


Fig. B-272 Probabilidades de ocurrencia de los distintos estados de daño para diversos desplazamientos espectrales posibles obtenidos a partir de las curvas de fragilidad [Dir. +Y, N2] (fuente: preparado por el autor)

B.5.3.3 Punto de desempeño

Dirección +X, pga = 0.04 g

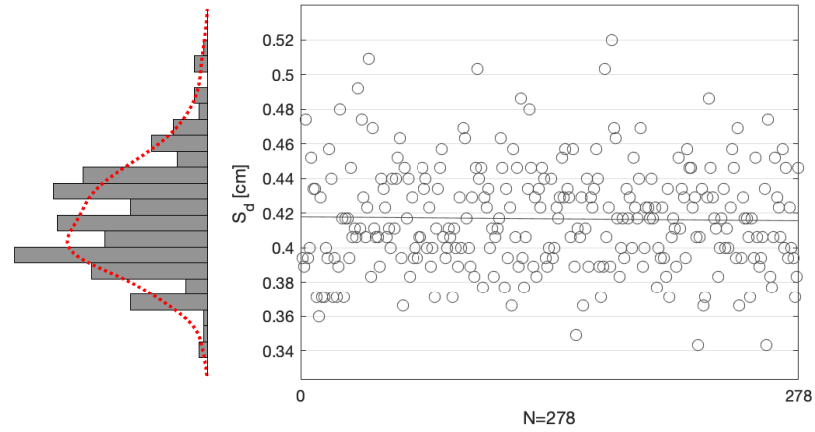


Fig. B-273 Desplazamientos espectrales, S_d , de los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.04g, N2] (fuente: preparado por el autor)

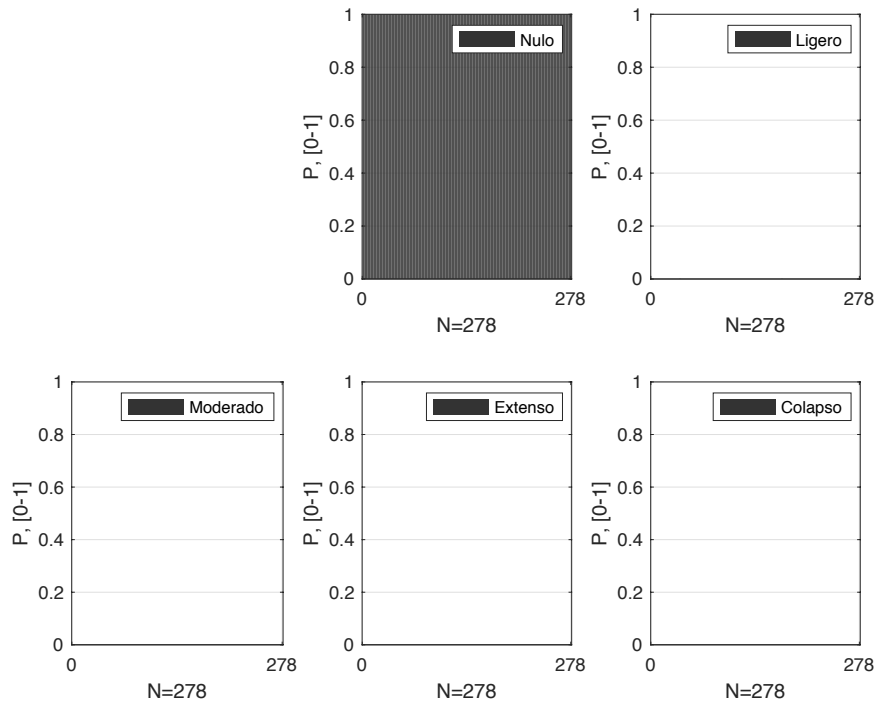


Fig. B-274 Probabilidades de pertenencia de los estados de daño nulo y no nulos para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.04g, N2] (fuente: preparado por el autor)

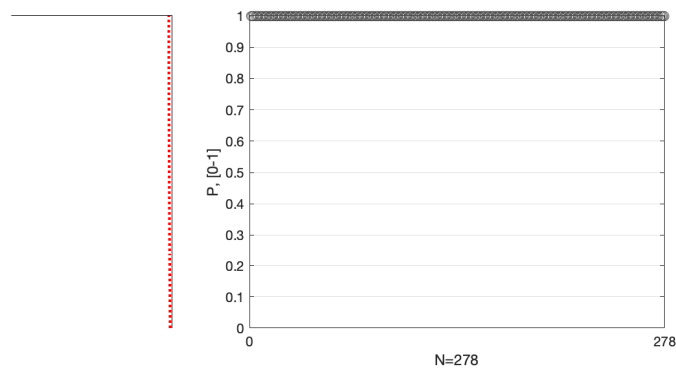


Fig. B-275 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Nulo para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.04g, N2] (fuente: preparado por el autor)

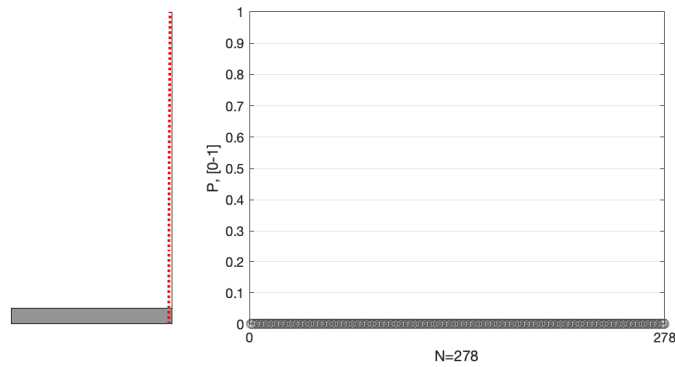


Fig. B-276 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Ligero para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.04g, N2] (fuente: preparado por el autor)

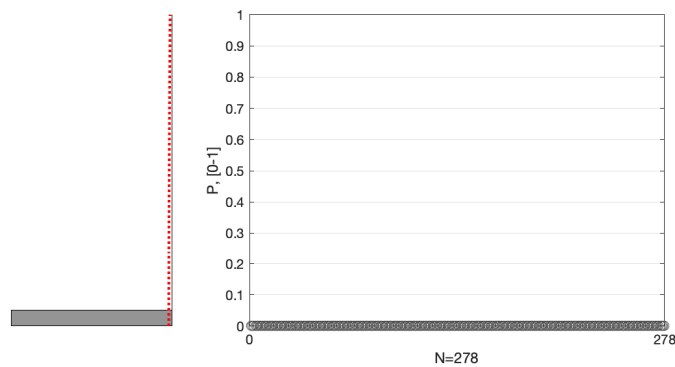


Fig. B-277 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Moderado para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.04g, N2] (fuente: preparado por el autor)

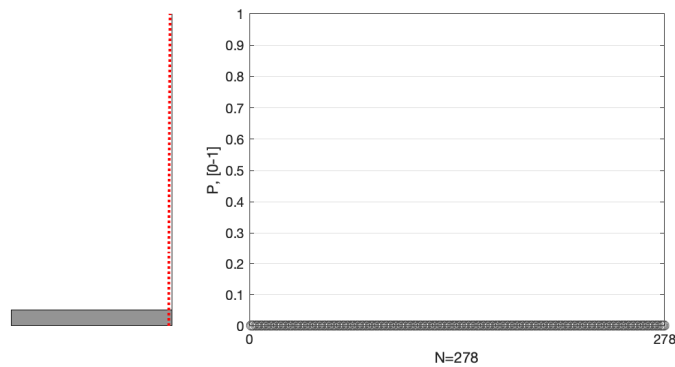


Fig. B-278 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Extenso para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.04g, N2] (fuente: preparado por el autor)

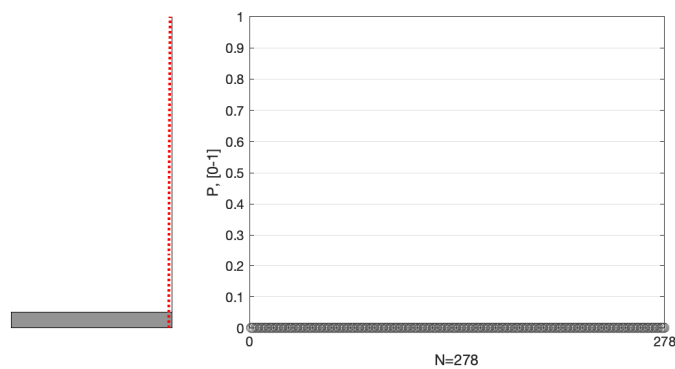


Fig. B-279 Probabilidades de pertenencia al estado de daño de Colapso para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.04g, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +Y, pga = 0.04 g

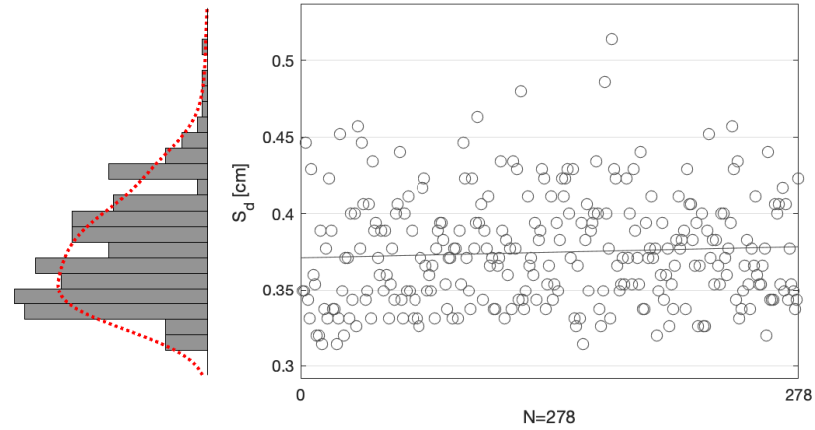


Fig. B-280 Desplazamientos espectrales, S_d , de los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0.04g, N2] (fuente: preparado por el autor)

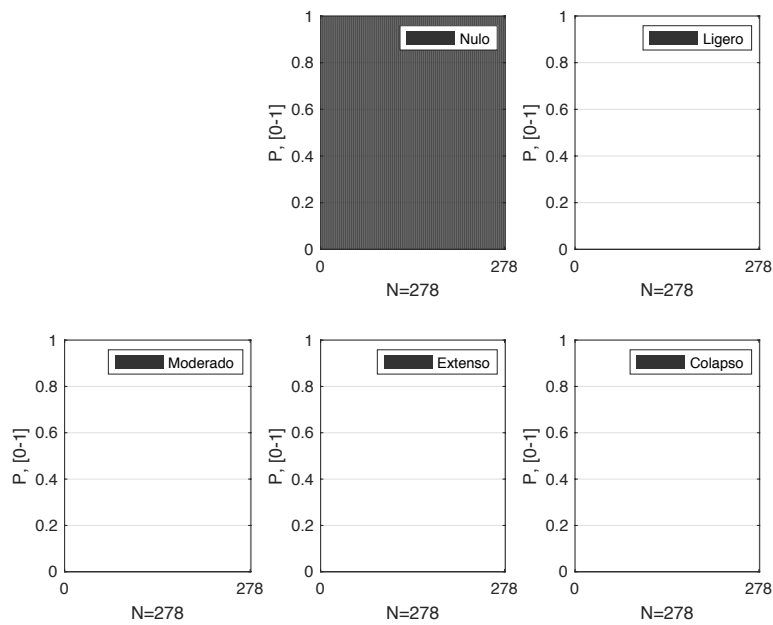


Fig. B-281 Probabilidades de pertenencia de los estados de daño nulo y no nulos para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0.04g, N2] (fuente: preparado por el autor)

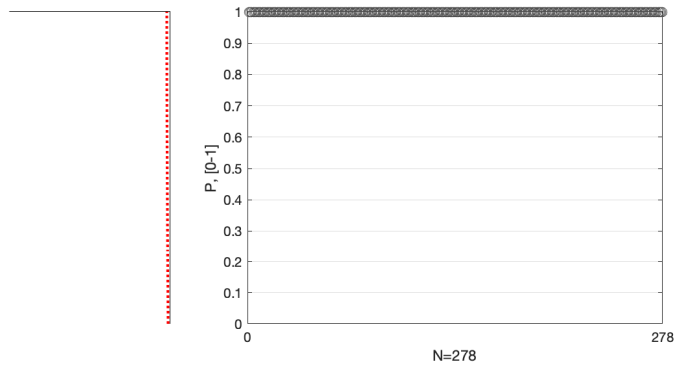


Fig. B-282 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Nulo para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0.04g, N2] (fuente: preparado por el autor)

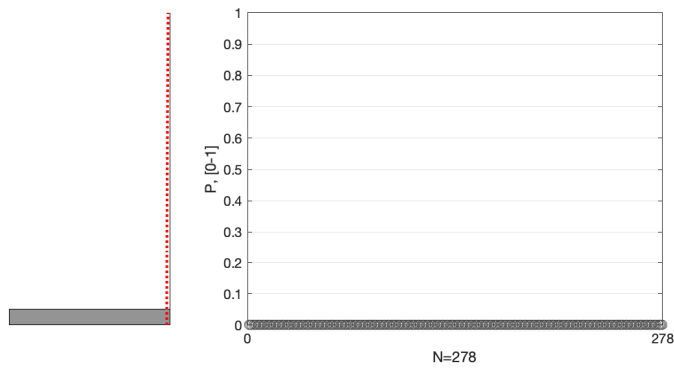


Fig. B-283 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Ligero para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0.04g, N2] (fuente: preparado por el autor)

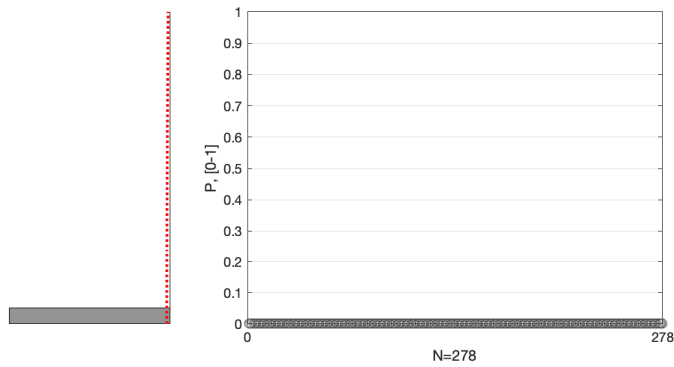


Fig. B-284 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Moderado para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0.04g, N2] (fuente: preparado por el autor)

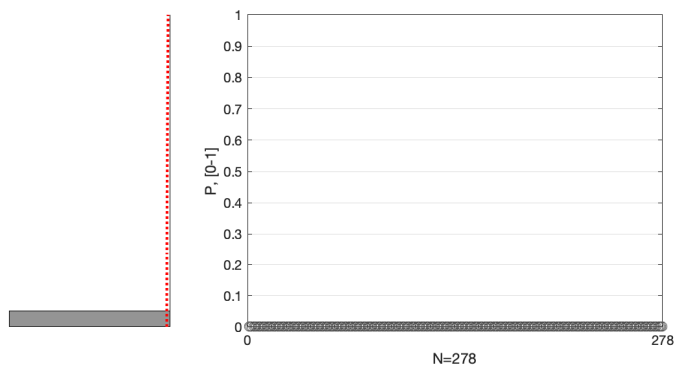


Fig. B-285 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Extenso para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0.04g, N2] (fuente: preparado por el autor)

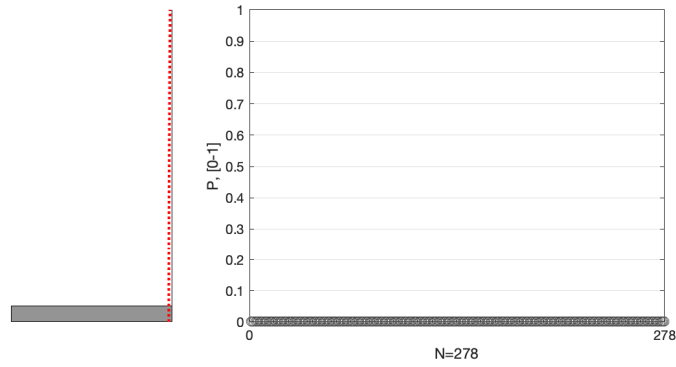


Fig. B-286 Probabilidades de pertenencia al estado de daño de Colapso para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0.04g, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +X, pga = 0.141 g

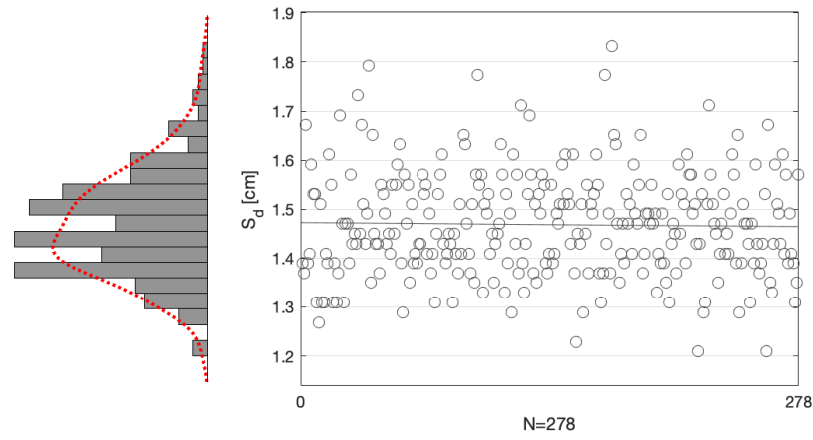


Fig. B-287 Desplazamientos espectrales, S_d , de los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.141g, N2] (fuente: preparado por el autor)

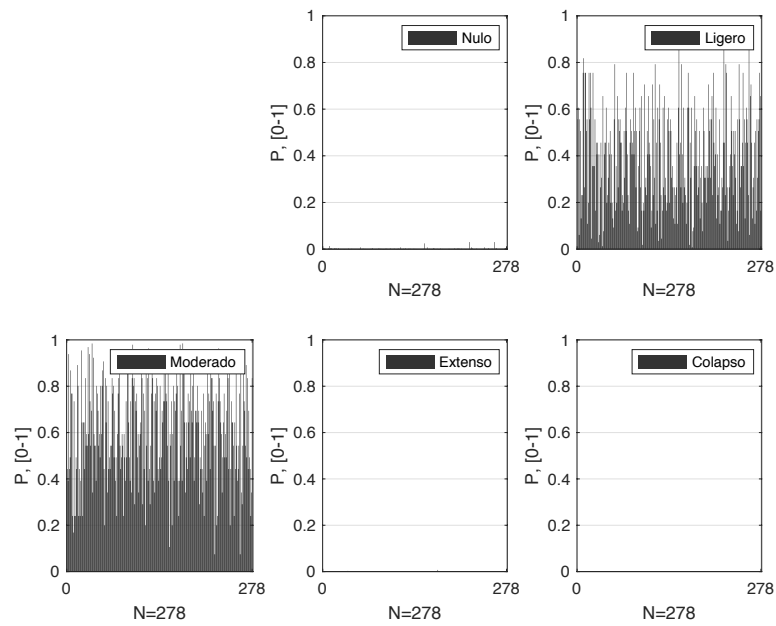


Fig. B-288 Probabilidades de pertenencia de los estados de daño nulo y no nulos para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.141g, N2] (fuente: preparado por el autor)

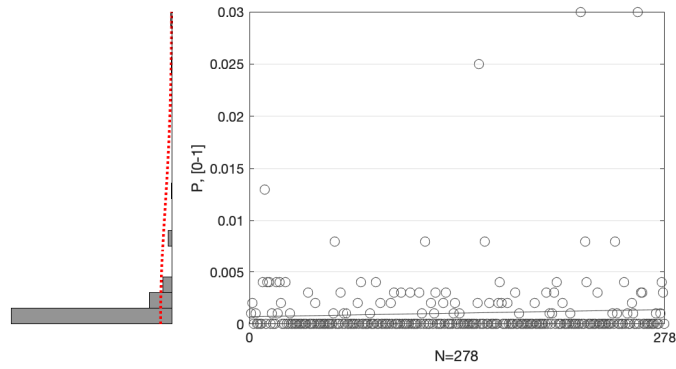


Fig. B-289 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Nulo para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.141g, N2] (fuente: preparado por el autor)

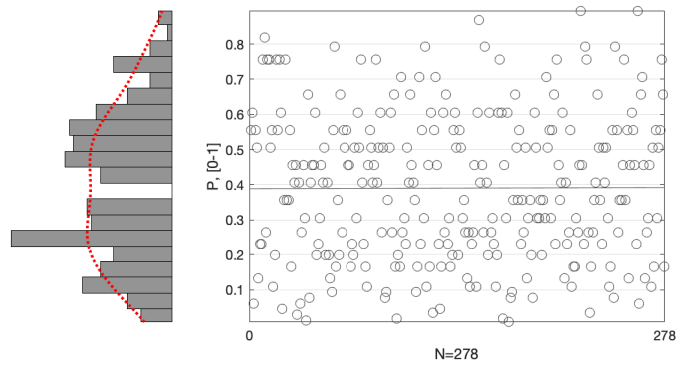


Fig. B-290 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Ligero para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0. 141g, N2] (fuente: preparado por el autor)

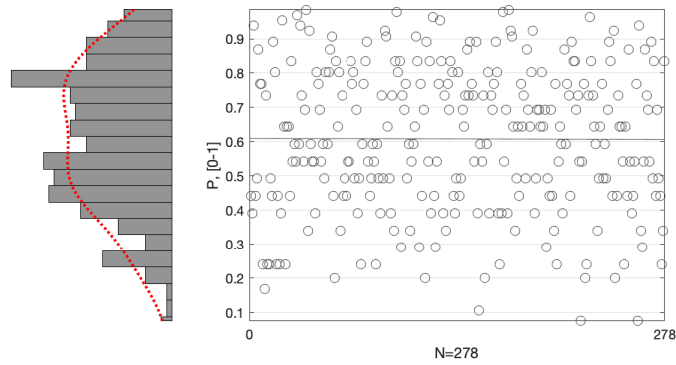


Fig. B-291 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Moderado para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0. 141g, N2] (fuente: preparado por el autor)

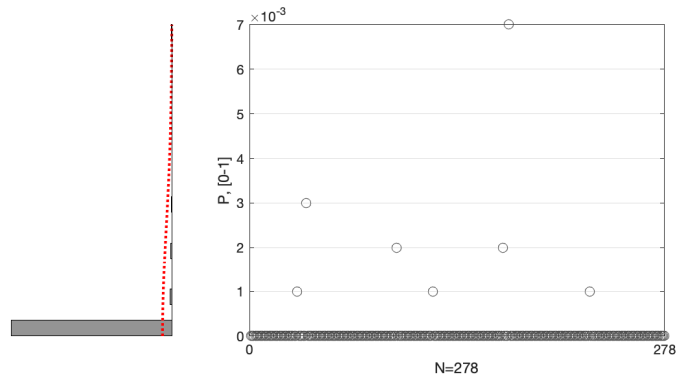


Fig. B-292 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Severo para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0. 141g, N2] (fuente: preparado por el autor)

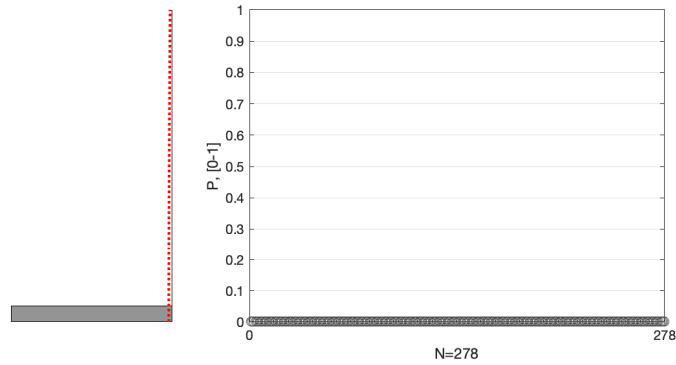


Fig. B-293 Probabilidades de pertenencia al estado de daño de Colapso para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0. 141g, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +Y, pga = 0.141 g

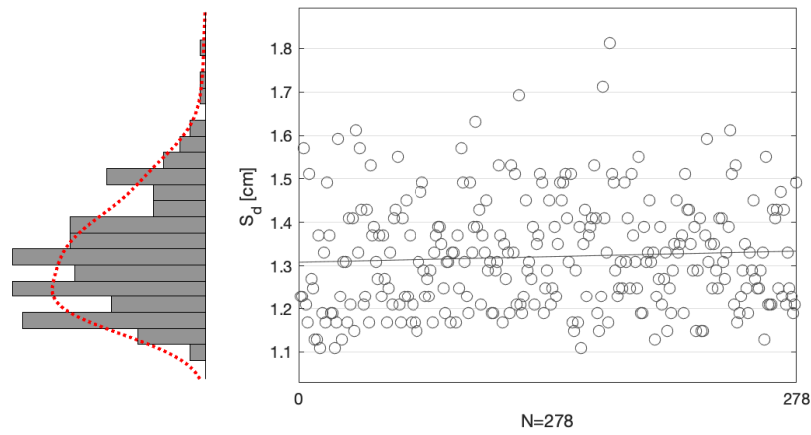


Fig. B-294 Desplazamientos espectrales, S_d , de los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0.141g, N2] (fuente: preparado por el autor)

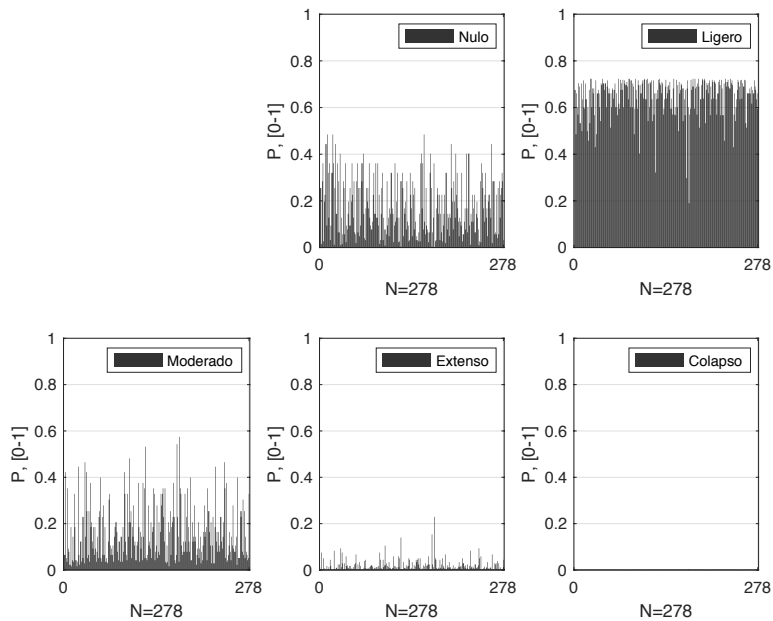


Fig. B-295 Probabilidades de pertenencia de los estados de daño nulo y no nulos para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0.141g, N2] (fuente: preparado por el autor)

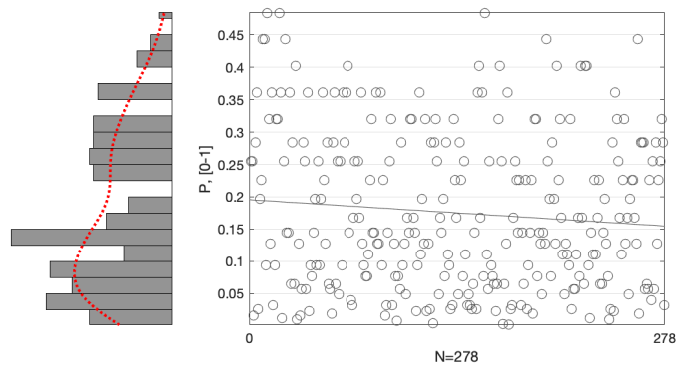


Fig. B-296 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Nulo para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0.141g, N2] (fuente: preparado por el autor)

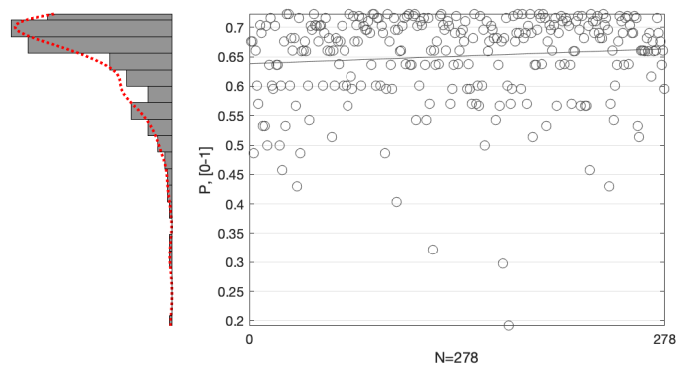


Fig. B-297 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Ligero para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0. 0.141g, N2] (fuente: preparado por el autor)

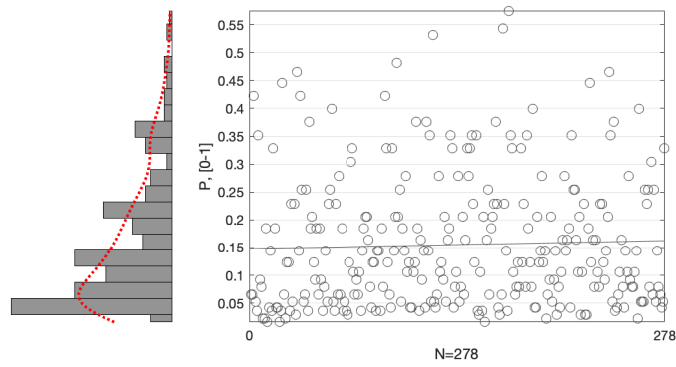


Fig. B-298 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Moderado para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0. 0.141g, N2] (fuente: preparado por el autor)

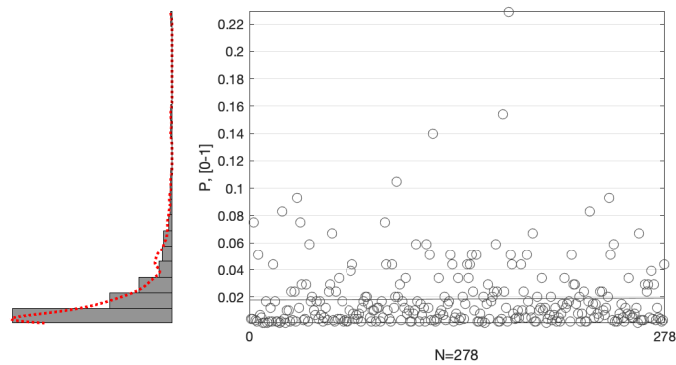


Fig. B-299 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Extenso para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0. 0.141g, N2] (fuente: preparado por el autor)

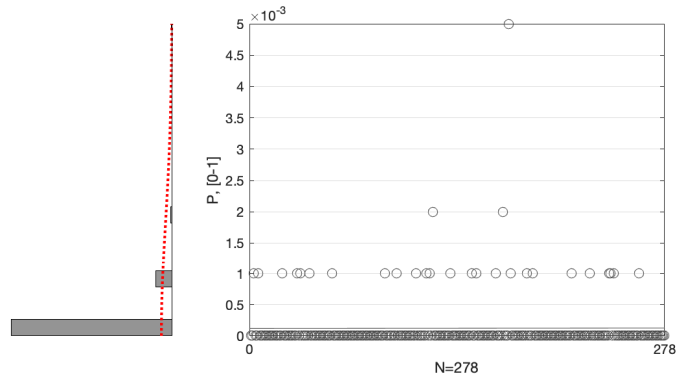


Fig. B-300 Probabilidades de pertenencia al estado de daño de Colapso para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0. 0.141g, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +X, pga = 0.194 g

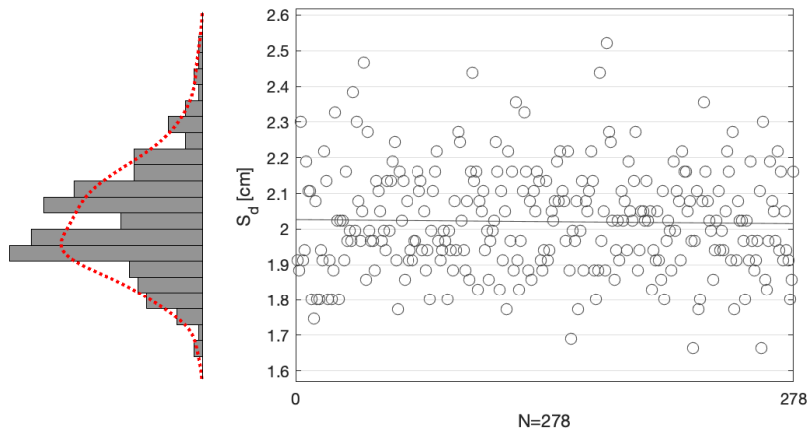


Fig. B-301 Desplazamientos espectrales, S_d , de los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.194g, N2] (fuente: preparado por el autor)

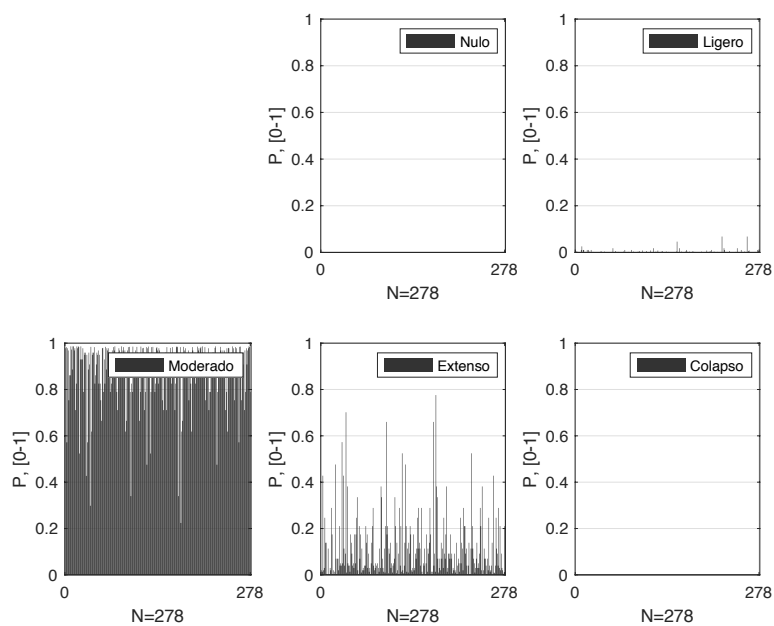


Fig. B-302 Probabilidades de pertenencia de los estados de daño nulo y no nulos para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.194g, N2] (fuente: preparado por el autor)

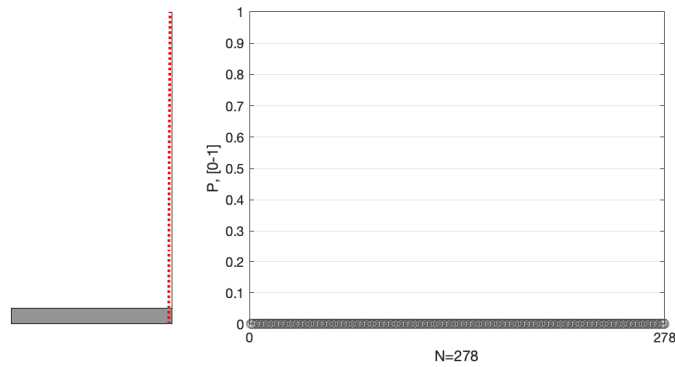


Fig. B-303 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Nulo para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.194g, N2] (fuente: preparado por el autor)

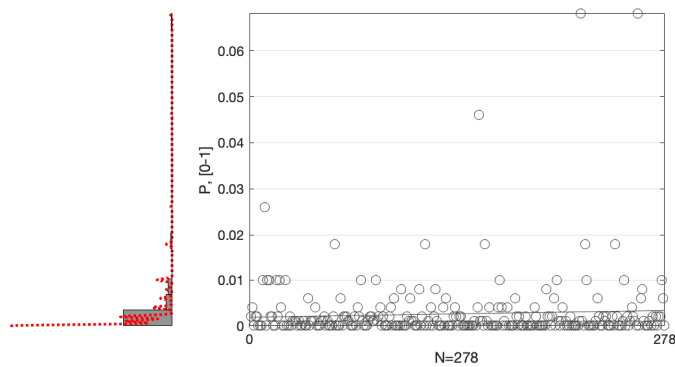


Fig. B-304 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Ligero para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.194g, N2] (fuente: preparado por el autor)

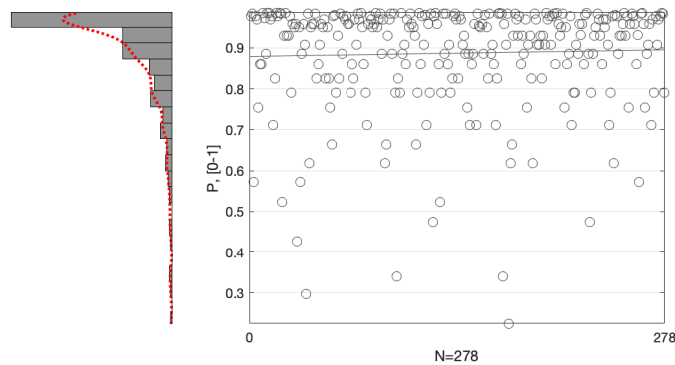


Fig. B-305 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Moderado para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.194g, N2] (fuente: preparado por el autor)

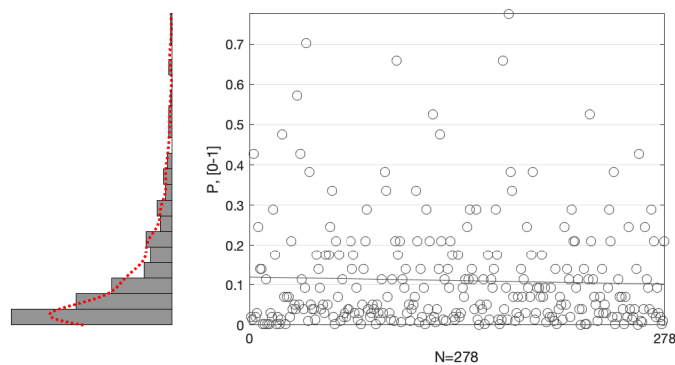


Fig. B-306 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Severo para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.194g, N2] (fuente: preparado por el autor)

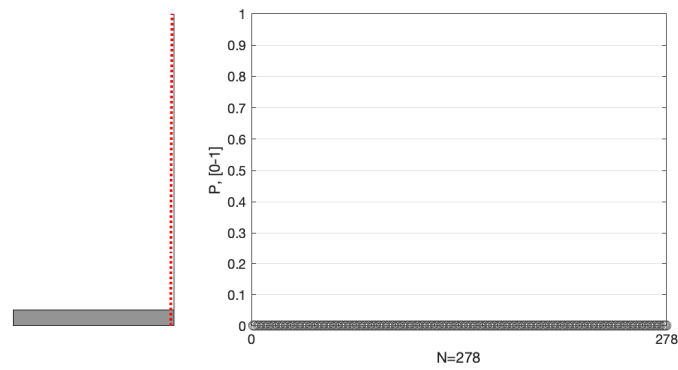


Fig. B-307 Probabilidades de pertenencia al estado de daño de Colapso para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.194g, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +Y, pga = 0.194 g

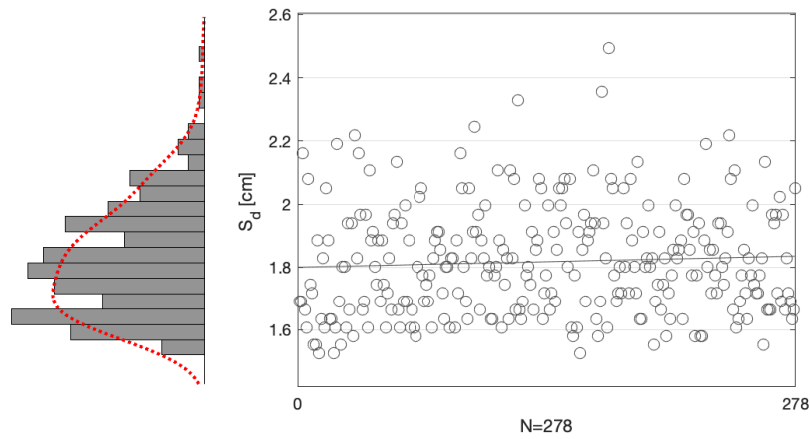


Fig. B-308 Desplazamientos espectrales, S_d , de los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0.194g, N2] (fuente: preparado por el autor)

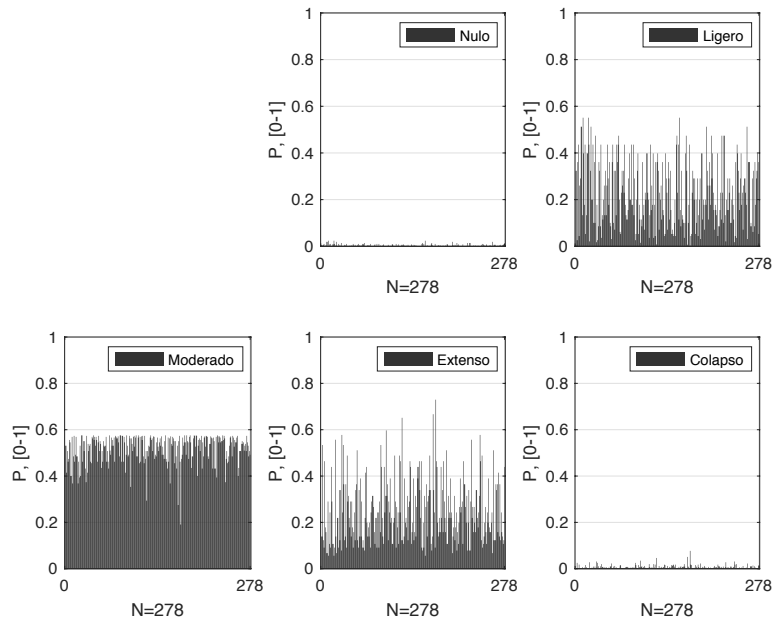


Fig. B-309 Probabilidades de pertenencia de los estados de daño nulo y no nulos para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0.194g, N2] (fuente: preparado por el autor)

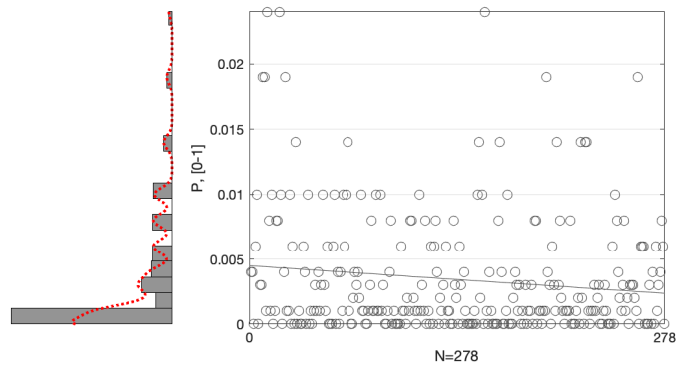


Fig. B-310 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Nulo para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0.194g, N2] (fuente: preparado por el autor)

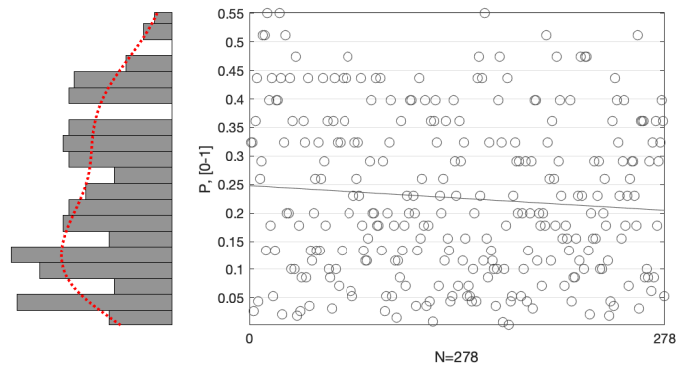


Fig. B-311 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Ligero para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0. 0. 194g, N2] (fuente: preparado por el autor)

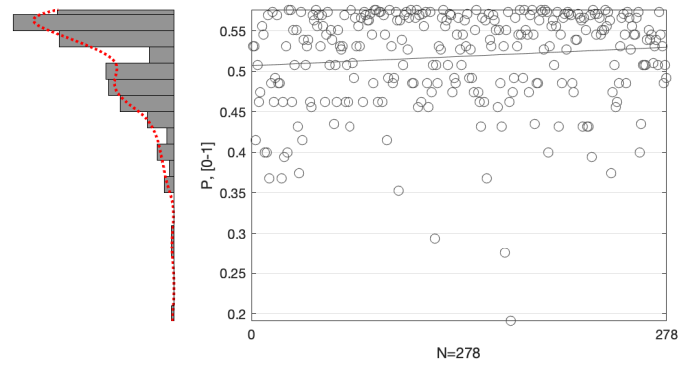


Fig. B-312 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Moderado para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0. 0. 194g, N2] (fuente: preparado por el autor)

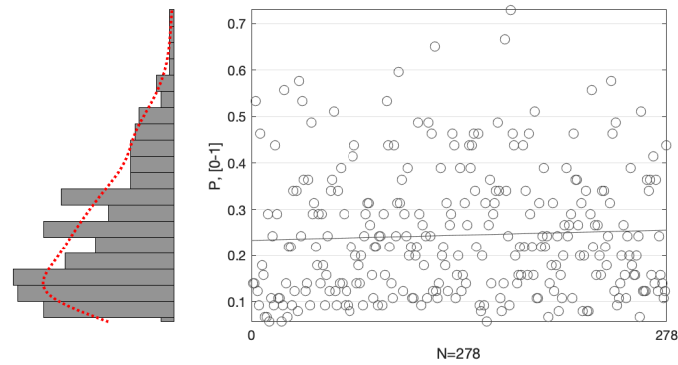


Fig. B-313 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Extenso para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0. 0. 194g, N2] (fuente: preparado por el autor)

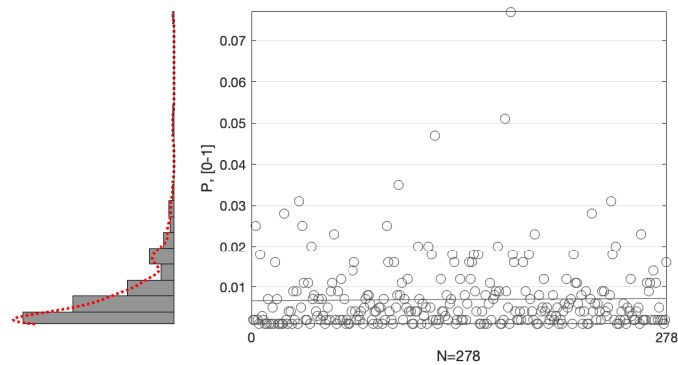


Fig. B-314 Probabilidades de pertenencia al estado de daño de Colapso para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0. 0. 194g, N2] (fuente: preparado por el autor)

B.5.3.4 Grado de daño medio

Dirección +X

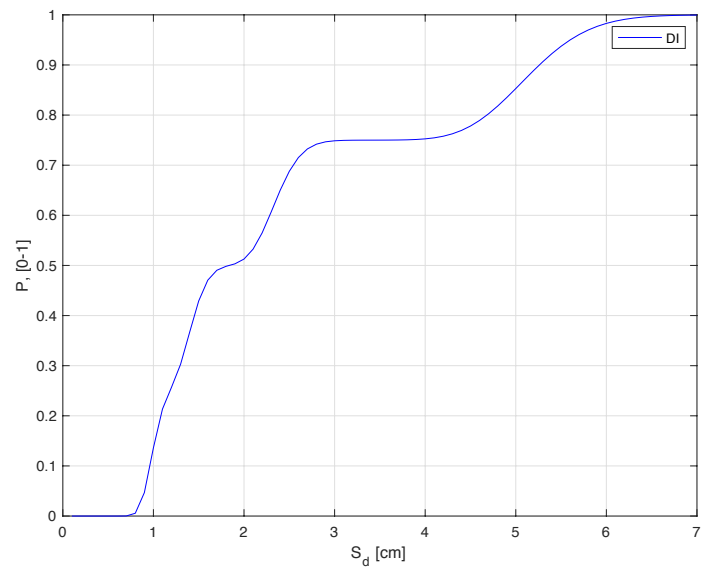


Fig. B-315 Curva del grado de daño medio (i.e. índice de Daño, DI) [Dir. +X, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +X, pga = 0.04 g

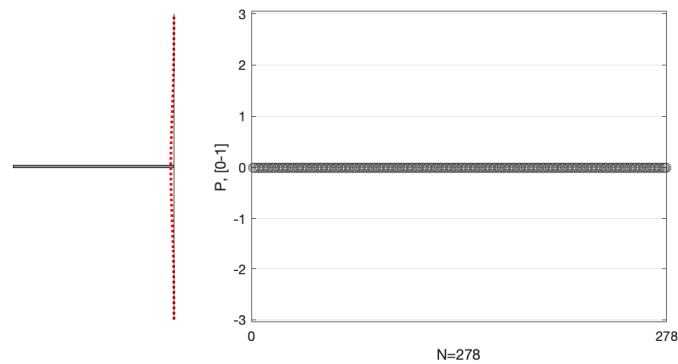


Fig. B-316 Probabilidades de ocurrencia de daño medio para los distintos puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.04g, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +X, pga = 0.141 g

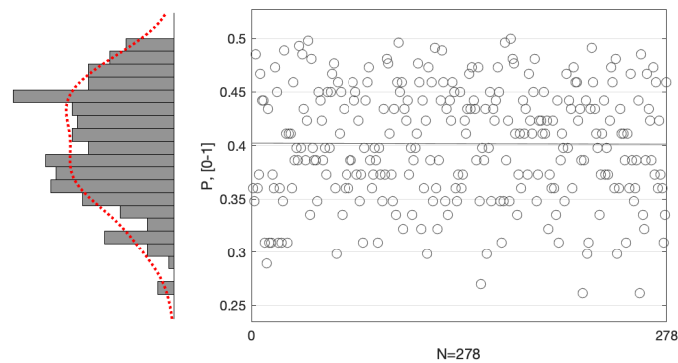


Fig. B-317 Probabilidades de ocurrencia de daño medio para los distintos puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.141g, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +X, pga = 0.194 g

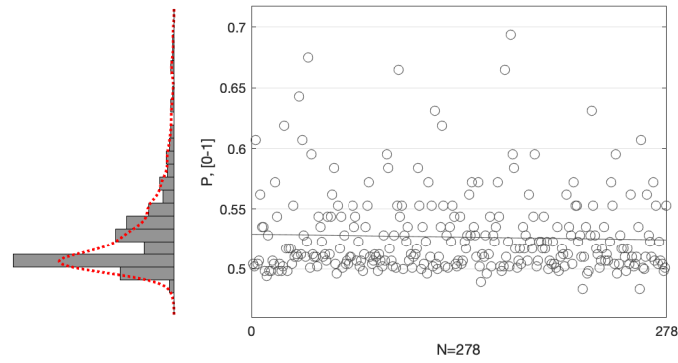


Fig. B-318 Probabilidades de ocurrencia de daño medio para los distintos puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.194g, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +Y

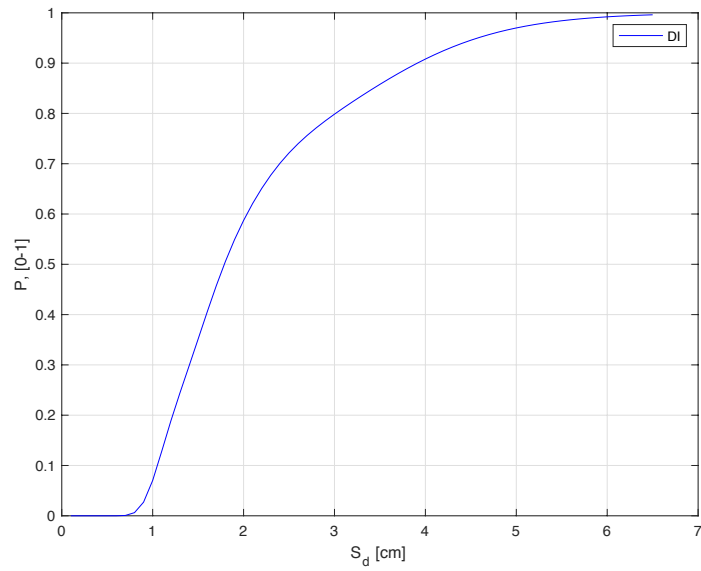


Fig. B-319 Curva del grado de daño medio (i.e. índice de Daño, DI) [Dir. +Y, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +Y, pga = 0.04 g

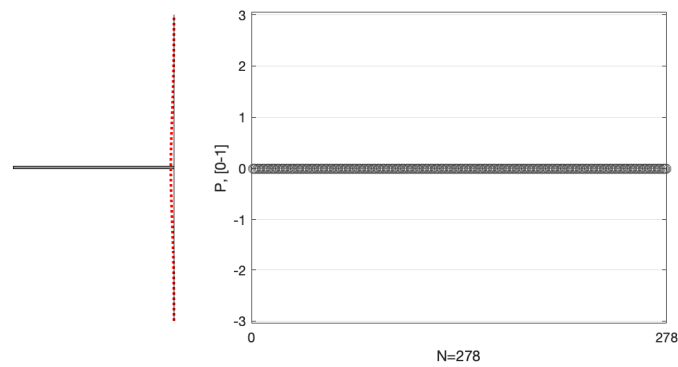


Fig. B-320 Probabilidades de ocurrencia de daño medio para los distintos puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0.04g, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +Y, pga = 0.141 g

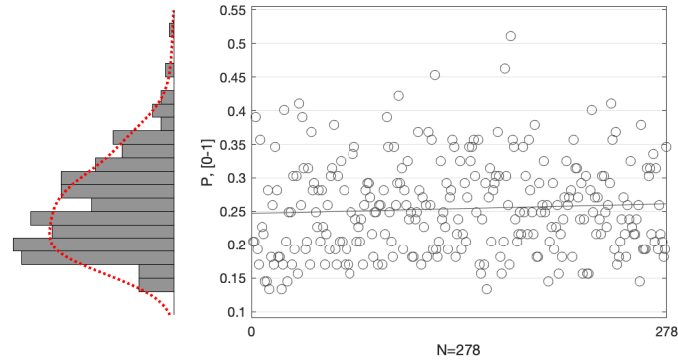


Fig. B-321 Probabilidades de ocurrencia de daño medio para los distintos puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0.141g, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +Y, pga = 0.194 g

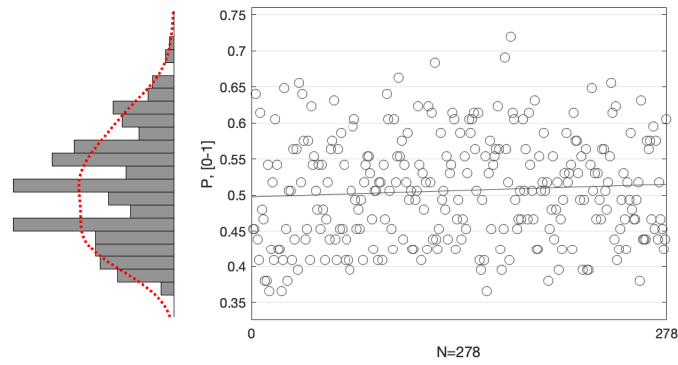


Fig. B-322 Probabilidades de ocurrencia de daño medio para los distintos puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0.194g, N2] (fuente: preparado por el autor)

B.5.4 Análisis dinámico incremental

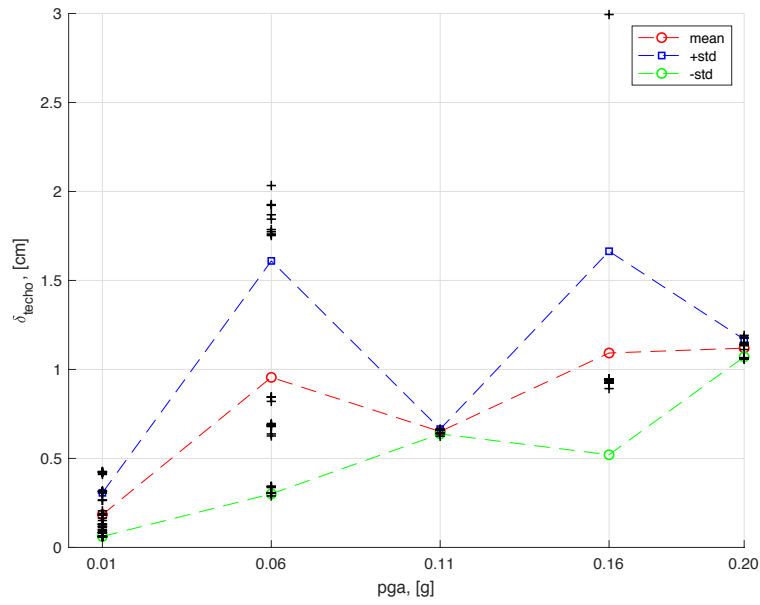


Fig. B-323 Desplazamiento en el techo vs pga de los distintos análisis dinámicos realizados en el agregado AG-01 en la dirección +X (fuente: preparado por el autor)

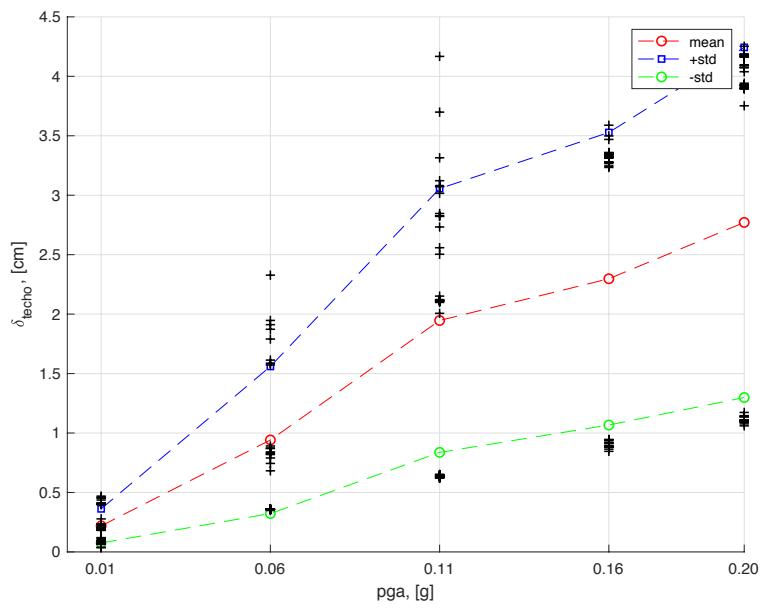


Fig. B-324 Desplazamiento en el techo vs pga de los distintos análisis dinámicos realizados en el agregado AG-01 en la dirección +Y (fuente: preparado por el autor)

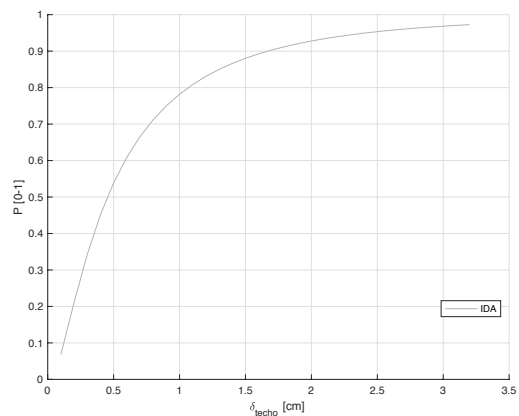
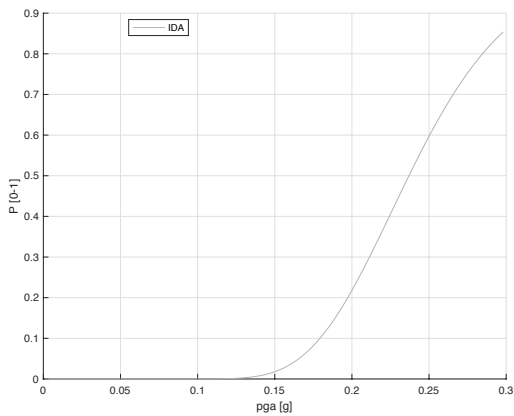


Fig. B-325 Curva de daño esperado para el agregado AG-01 y un $IM = pga$ (izq) ó $IM = S_d$ (der.) (fuente: preparado por el autor)

Tabla B-15 Estadísticas básicas de los desplazamientos en el techo, obtenidos para los conjuntos de puntos asociados a cada valor de pga del agregado AG-01 para cada dirección de análisis [cm] (fuente: preparado por el autor)

	Dir.	min	max	mean	median	std
$P_{0.01g}$	+X	0,06	0,43	0,18	0,13	0,12
	+Y	0,04	0,47	0,22	0,19	0,14
$P_{0.06g}$	+X	0,29	2,03	0,96	0,69	0,65
	+Y	0,35	2,33	0,94	0,82	0,62
$P_{0.11g}$	+X	0,62	0,66	0,65	0,66	0,01
	+Y	0,62	4,17	1,95	2,11	1,11
$P_{0.16g}$	+X	0,89	2,99	1,09	0,94	0,57
	+Y	0,85	3,59	2,30	3,27	1,23
$P_{0.20g}$	+X	1,06	1,19	1,12	1,14	0,05
	+Y	1,06	4,25	2,77	3,90	1,47

B.6 AG-02

B.6.1 Análisis modal

Tabla B-16 Resultados del análisis modal para el edificio agregado AG-02 (fuente: preparado por el autor)

# Modo	T [s]	f [rad/s]	ω [Hz]	Mx [kg]	My [kg]	Mz [kg]	ΣM [kg]
1	0,624	1,60	10,07	3669824,49	7613,94	1,36	3677439,79
2	0,606	1,65	10,36	18015,22	3004166,09	50,69	3022232,01
3	0,538	1,86	11,67	38361,94	117033,84	0,07	155395,85
4	0,268	3,74	23,48	2251,90	118,19	11,68	2381,77
5	0,215	4,66	29,26	346549,83	77,24	174,60	346801,68
6	0,203	4,93	30,95	11,54	623531,97	465,73	624009,24
7	0,185	5,41	33,97	2365,32	18777,98	190,25	21333,54

8	0,157	6,37	40,03	11636,06	2743,65	25,76	14405,47
9	0,138	7,23	45,43	13,69	578,60	3214707,92	3215300,20
10	0,131	7,66	48,13	2951,04	2011,48	164760,00	169722,51
11	0,127	7,89	49,55	12294,09	3287,57	116078,89	131660,54
12	0,124	8,09	50,82	6390,81	7788,23	1955,26	16134,31
13	0,120	8,31	52,20	8290,62	23905,25	29057,71	61253,58
14	0,117	8,53	53,60	8516,59	22918,56	1439,36	32874,51
15	0,115	8,67	54,48	1509,56	40873,84	7208,34	49591,74
16	0,113	8,82	55,39	1045,80	23751,50	23954,82	48752,12
17	0,112	8,91	55,98	169,14	6736,20	5663,29	12568,62
18	0,110	9,08	57,03	60,26	612,36	617,15	1289,77
19	0,108	9,27	58,22	96,20	62,25	98,76	257,21
20	0,107	9,38	58,96	1154,77	412,87	450,28	2017,91
21	0,104	9,60	60,30	2177,38	475,12	64,71	2717,20

Tabla B-17 Resultados del análisis modal para el edificio agregado AG-02 (continuación) (fuente: preparado por el autor)

# Modo	T [s]	IFx [%]	IFy [%]	IFz [%]	RAMx [%]	RAMy [%]	RAMz [%]	AAMx [%]	AAMy [%]	AAMz [%]
1	0,624	99,793	0,207	0,000	88,778	0,195	0,000	83,067	0,172	0,000
2	0,606	0,596	99,402	0,002	0,436	76,883	0,001	0,408	68,000	0,001
3	0,538	24,687	75,313	0,000	0,928	2,995	0,000	0,868	2,649	0,000
4	0,268	94,547	4,962	0,491	0,054	0,003	0,000	0,051	0,003	0,000
5	0,215	99,927	0,022	0,050	8,384	0,002	0,005	7,844	0,002	0,004
6	0,203	0,002	99,924	0,075	0,000	15,957	0,013	0,000	14,114	0,011
7	0,185	11,087	88,021	0,892	0,057	0,481	0,005	0,054	0,425	0,004
8	0,157	80,775	19,046	0,179	0,281	0,070	0,001	0,263	0,062	0,001
9	0,138	0,000	0,018	99,982	0,000	0,015	90,124	0,000	0,013	72,765
10	0,131	1,739	1,185	97,076	0,071	0,051	4,619	0,067	0,046	3,729
11	0,127	9,338	2,497	88,165	0,297	0,084	3,254	0,278	0,074	2,627
12	0,124	39,610	48,271	12,119	0,155	0,199	0,055	0,145	0,176	0,044
13	0,120	13,535	39,027	47,438	0,201	0,612	0,815	0,188	0,541	0,658
14	0,117	25,906	69,715	4,378	0,206	0,587	0,040	0,193	0,519	0,033
15	0,115	3,044	82,421	14,535	0,037	1,046	0,202	0,034	0,925	0,163
16	0,113	2,145	48,719	49,136	0,025	0,608	0,672	0,024	0,538	0,542
17	0,112	1,346	53,595	45,059	0,004	0,172	0,159	0,004	0,152	0,128
18	0,110	4,672	47,478	47,850	0,001	0,016	0,017	0,001	0,014	0,014
19	0,108	37,401	24,203	38,396	0,002	0,002	0,003	0,002	0,001	0,002
20	0,107	57,226	20,460	22,314	0,028	0,011	0,013	0,026	0,009	0,010
21	0,104	80,133	17,486	2,381	0,053	0,012	0,002	0,049	0,011	0,001

B.6.2 Análisis de capacidad

B.6.2.1 Curva de capacidad

Dirección +X

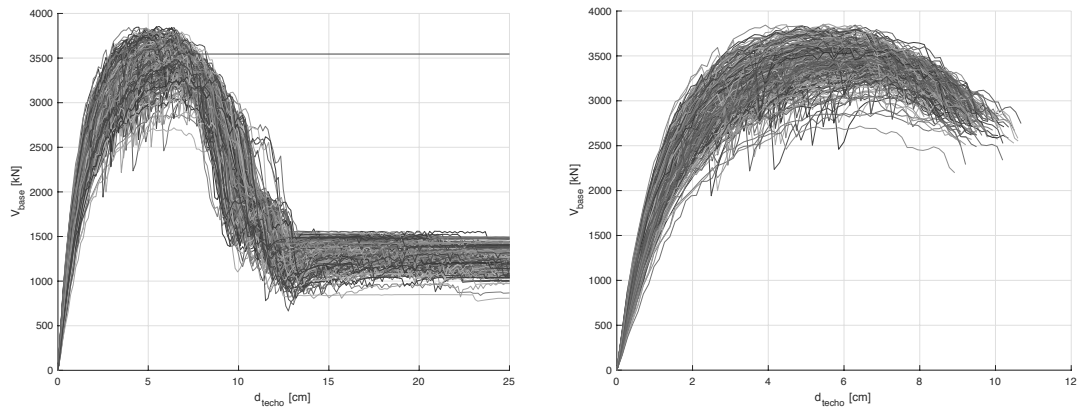


Fig. B-326 Curvas de capacidad originales (izq. - 3muri) y procesadas (der. - criterio de punto último) [Dir. +X] (fuente: preparado por el autor)

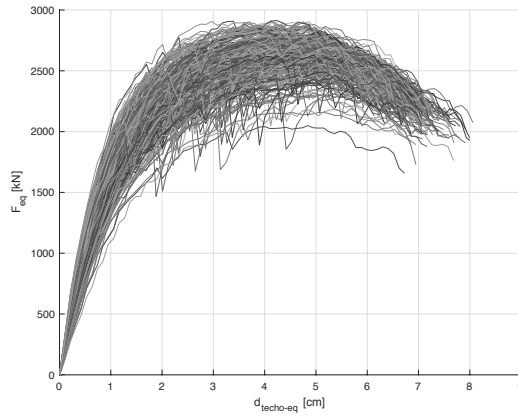


Fig. B-327 Curvas de capacidad de los sistemas equivalentes de 1GDL [Dir. +X, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +Y

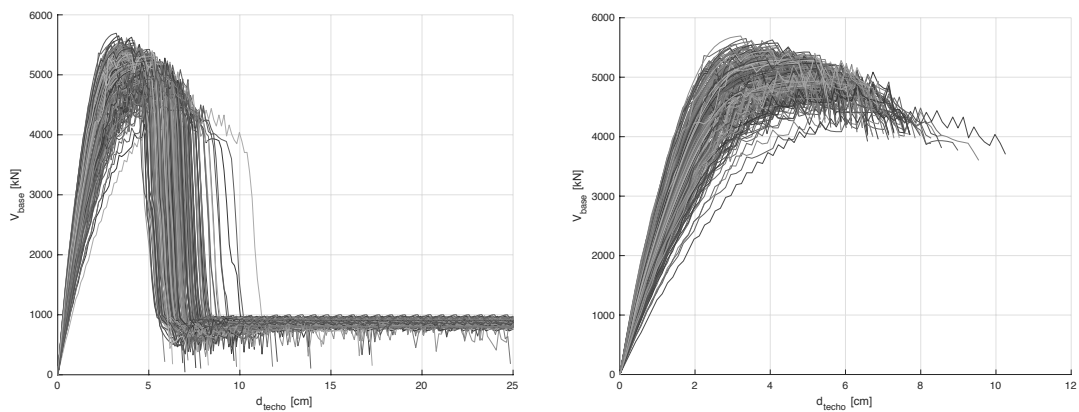


Fig. B-328 Curvas de capacidad originales (izq. - 3muri) y procesadas (der. - criterio de punto último) [Dir. +Y] (fuente: preparado por el autor)

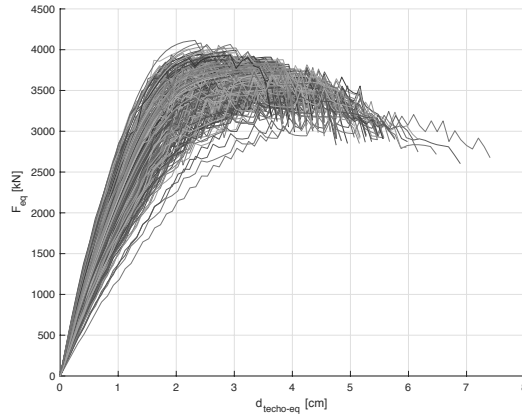


Fig. B-329 Curvas de capacidad de los sistemas equivalentes de 1GDL [Dir. +Y, N2] (fuente: preparado por el autor)

B.6.2.2 Curva de capacidad en formato aceleración-desplazamiento (ADRS)

Dirección +X

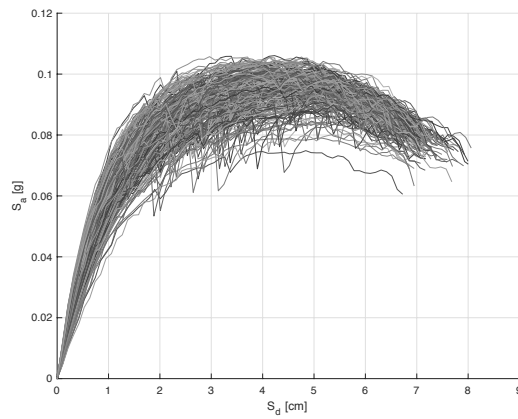


Fig. B-330 Curvas de capacidad en formato desplazamiento-aceleración (ADRS) [Dir. +Y, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +Y

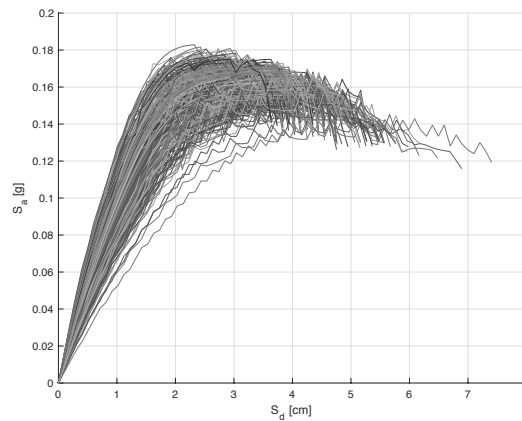


Fig. B-331 Curvas de capacidad en formato desplazamiento-aceleración (ADRS) [Dir. +Y, N2] (fuente: preparado por el autor)

B.6.2.3 Representación bilineal

Dirección +X

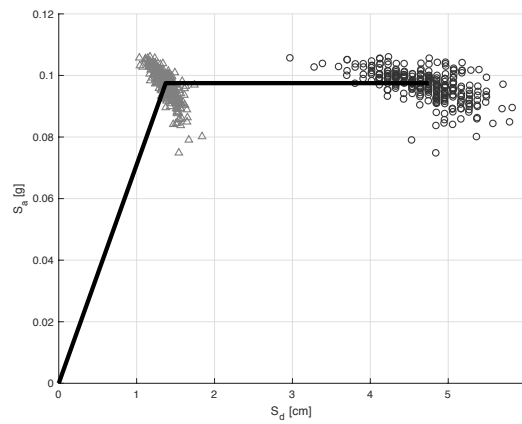


Fig. B-332 Representación bilineal promedio y nubes de valores de los puntos de fluencia y último [Dir. +X, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +Y

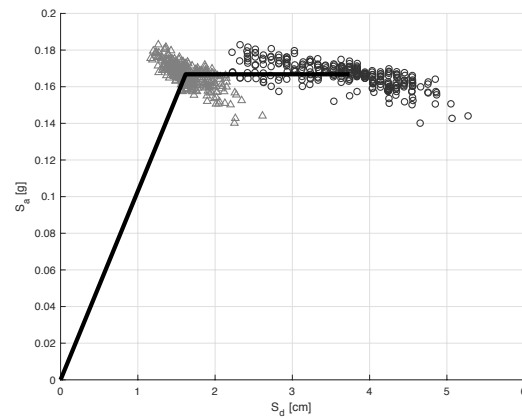


Fig. B-333 Representación bilineal promedio y nubes de valores de los puntos de fluencia y último [Dir. +Y, N2] (fuente: preparado por el autor)

B.6.3 Fragilidad y daño esperado

B.6.3.1 Curvas de fragilidad

Dirección +X

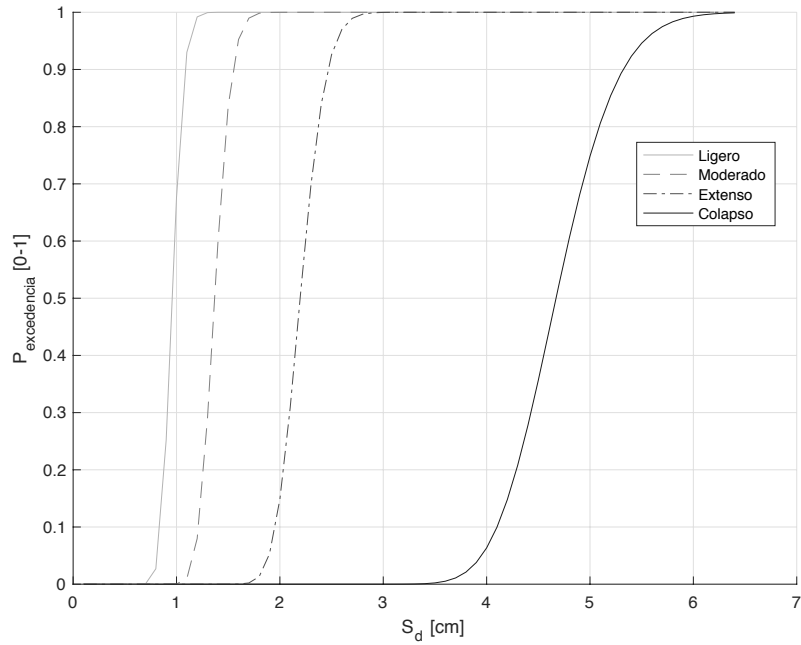


Fig. B-334 Curvas de fragilidad [Dir. +X, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +Y

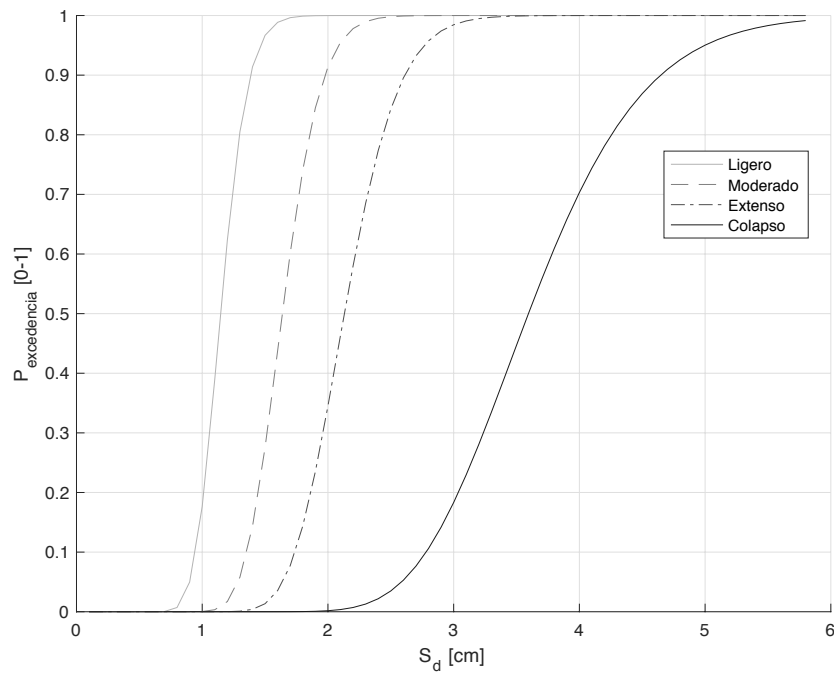


Fig. B-335 Curvas de fragilidad [Dir. +Y, N2] (fuente: preparado por el autor)

B.6.3.2 Estados de daño

Dirección +X

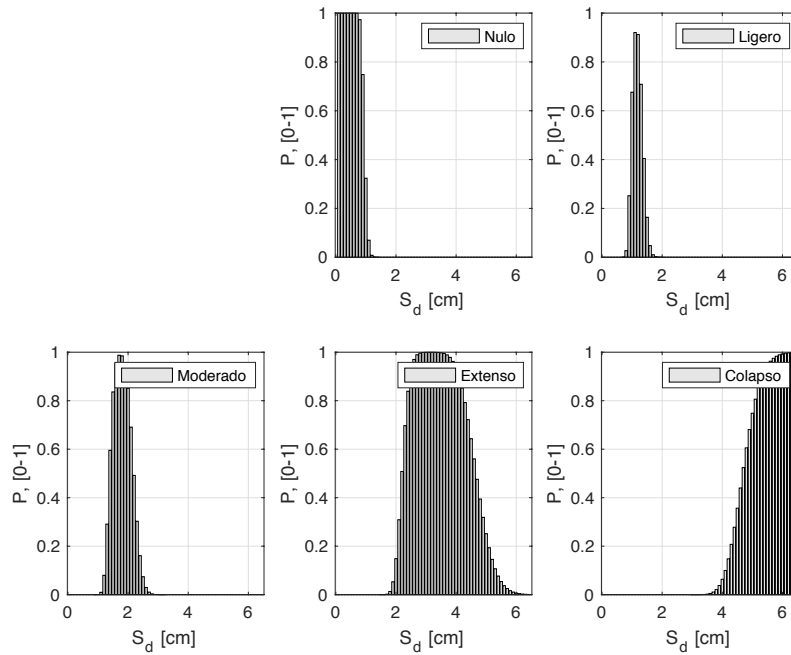


Fig. B-336 Probabilidades de ocurrencia de los distintos estados de daño para diversos desplazamientos espectrales posibles obtenidos a partir de las curvas de fragilidad [Dir. +X, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +Y

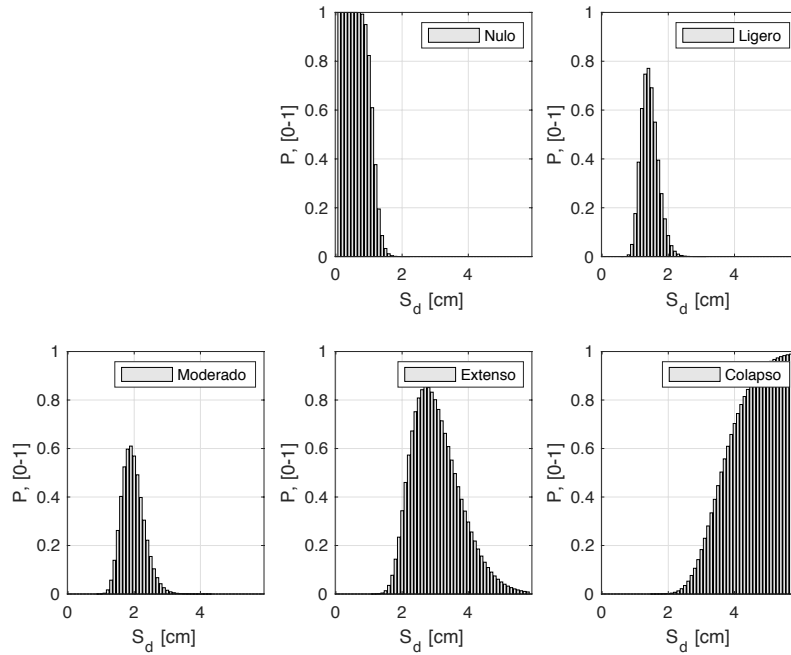


Fig. B-337 Probabilidades de ocurrencia de los distintos estados de daño para diversos desplazamientos espectrales posibles obtenidos a partir de las curvas de fragilidad [Dir. +Y, N2] (fuente: preparado por el autor)

B.6.3.3 Punto de desempeño

Dirección +X, $p_g a = 0.04 g$

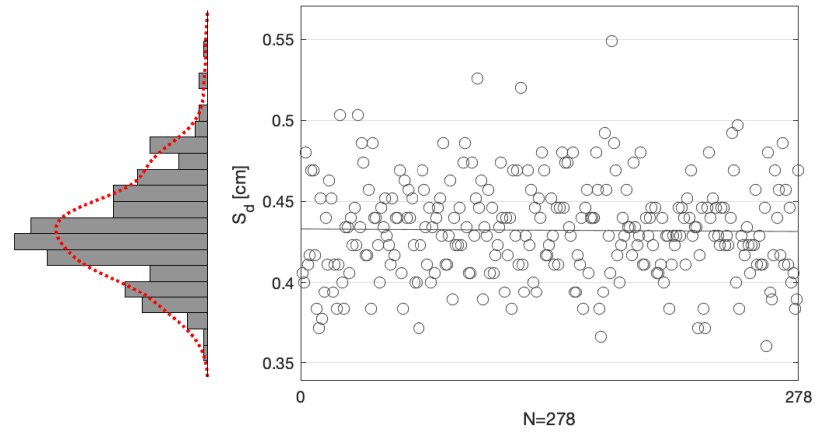


Fig. B-338 Desplazamientos espectrales, S_d , de los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, $p_g a = 0.04g$, N2] (fuente: preparado por el autor)

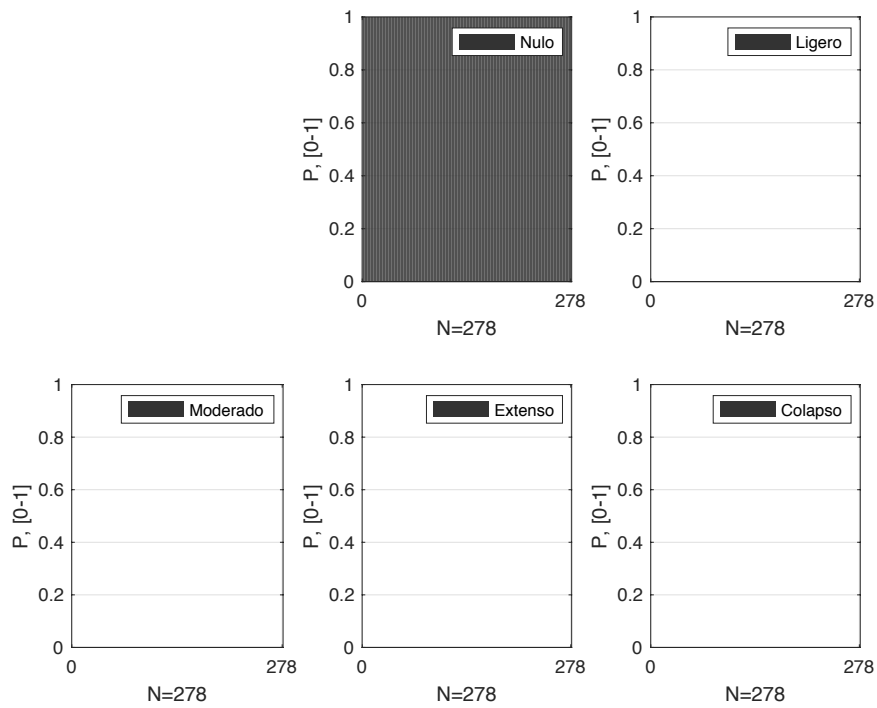


Fig. B-339 Probabilidades de pertenencia de los estados de daño nulo y no nulos para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, $p_g a = 0.04g$, N2] (fuente: preparado por el autor)

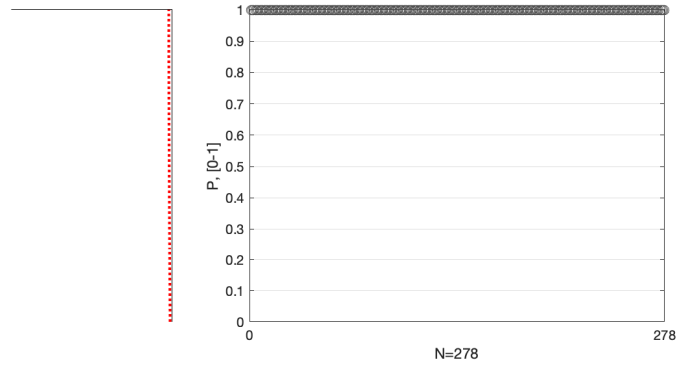


Fig. B-340 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Nulo para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.04g, N2] (fuente: preparado por el autor)

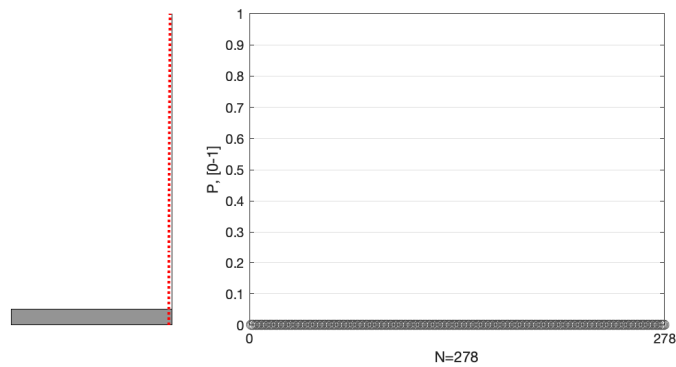


Fig. B-341 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Ligero para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.04g, N2] (fuente: preparado por el autor)

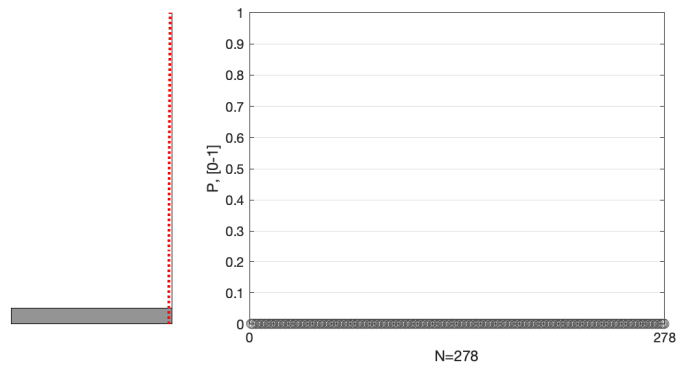


Fig. B-342 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Moderado para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.04g, N2] (fuente: preparado por el autor)

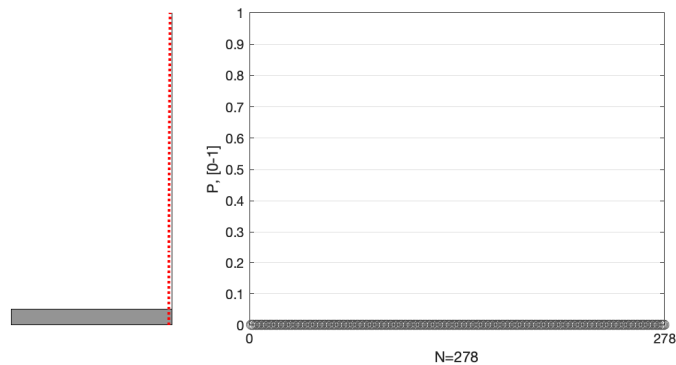


Fig. B-343 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Extenso para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.04g, N2] (fuente: preparado por el autor)

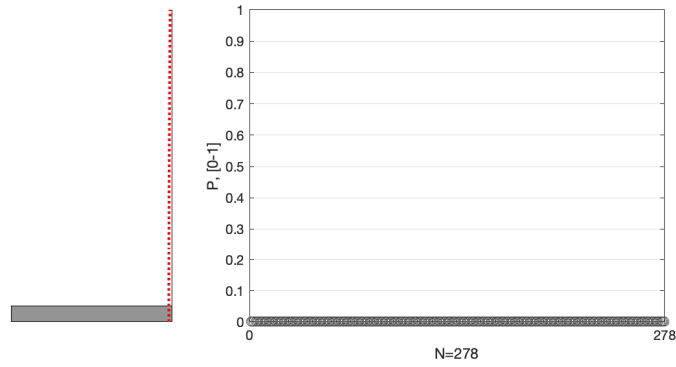


Fig. B-344 Probabilidades de pertenencia al estado de daño de Colapso para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.04g, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +Y, pga = 0.04 g

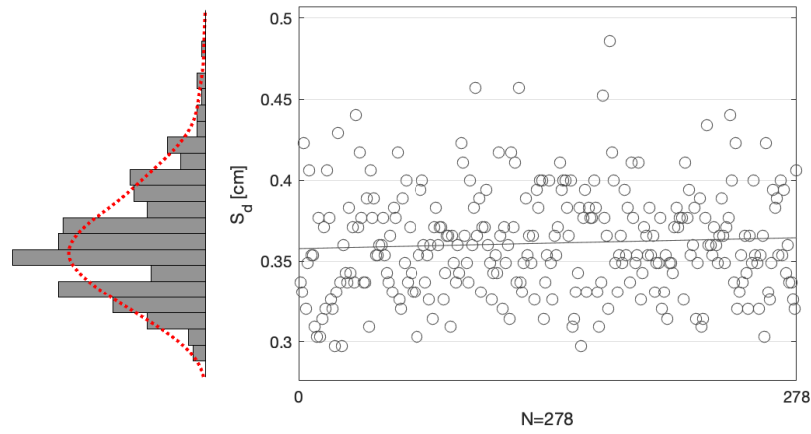


Fig. B-345 Desplazamientos espectrales, S_d , de los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0.04g, N2] (fuente: preparado por el autor)

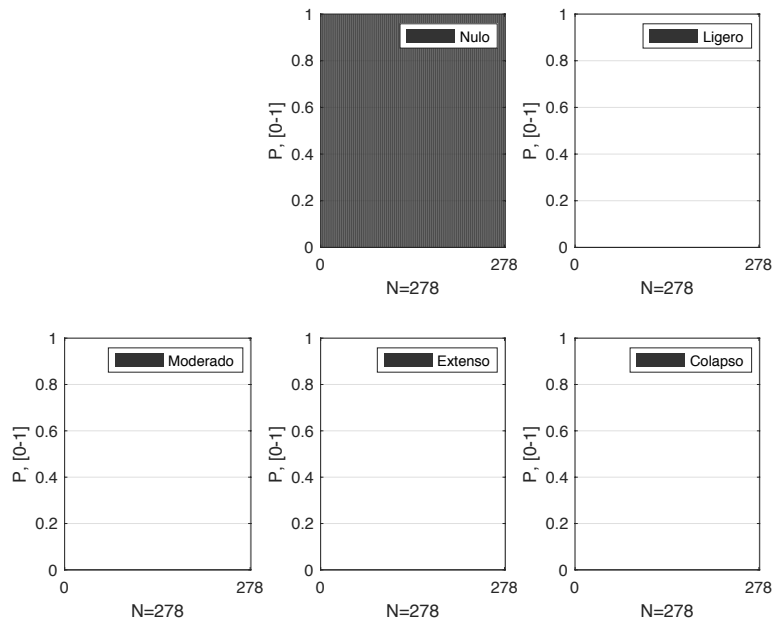


Fig. B-346 Probabilidades de pertenencia de los estados de daño nulo y no nulos para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0.04g, N2] (fuente: preparado por el autor)

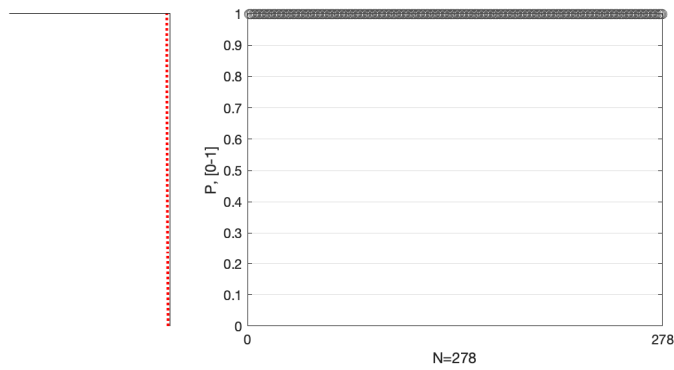


Fig. B-347 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Nulo para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0.04g, N2] (fuente: preparado por el autor)

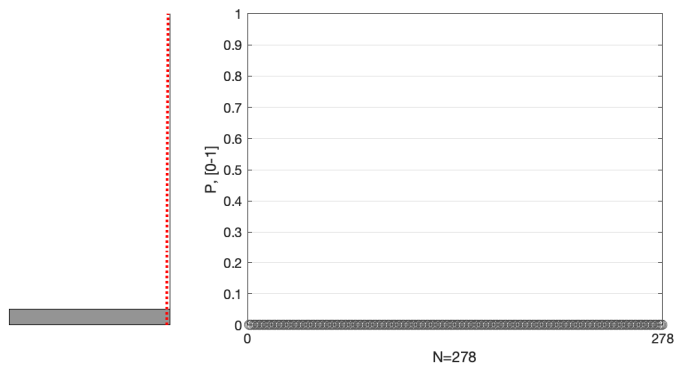


Fig. B-348 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Ligero para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0.04g, N2] (fuente: preparado por el autor)

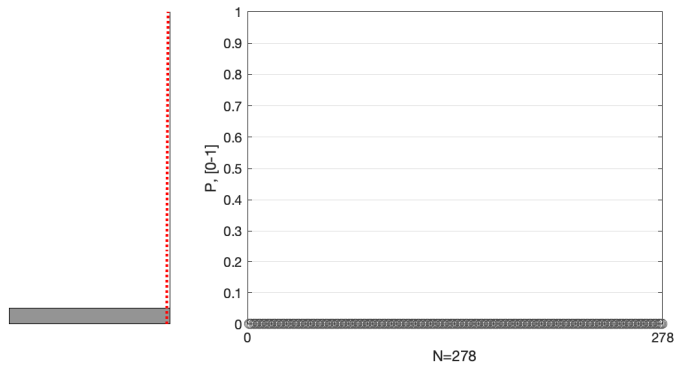


Fig. B-349 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Moderado para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0.04g, N2] (fuente: preparado por el autor)

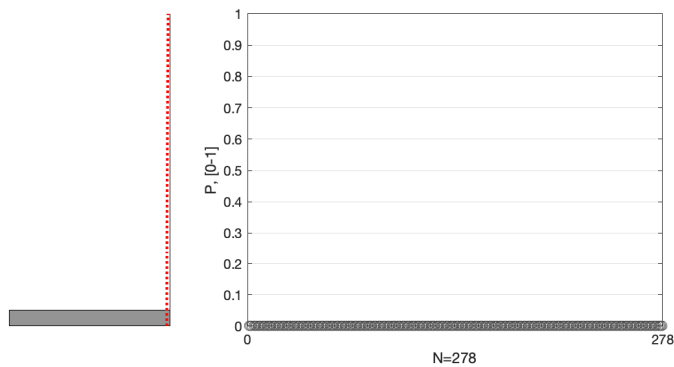


Fig. B-350 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Extenso para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0.04g, N2] (fuente: preparado por el autor)

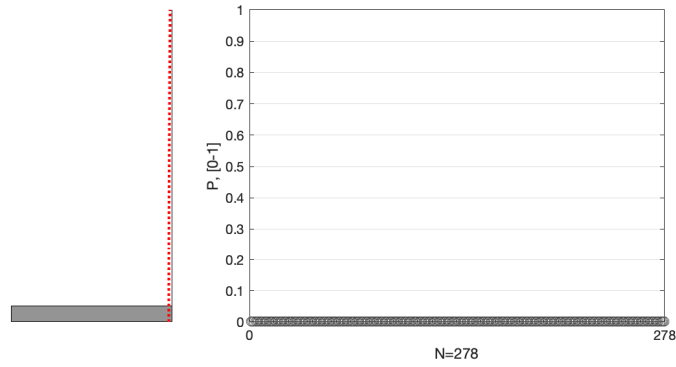


Fig. B-351 Probabilidades de pertenencia al estado de daño de Colapso para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0.04g, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +X, pga = 0.141 g

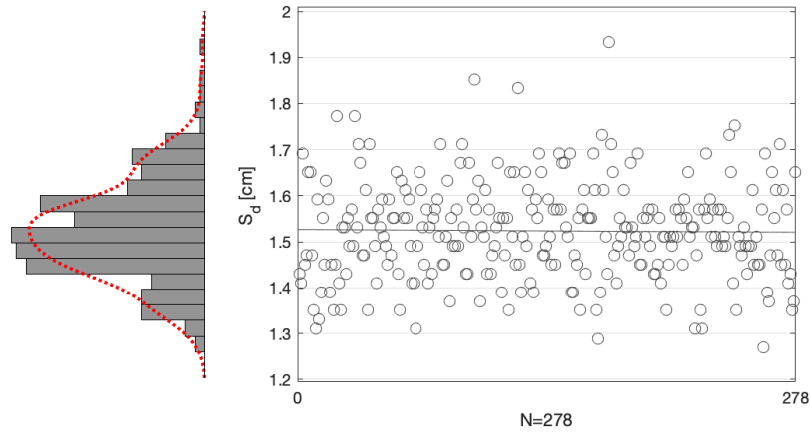


Fig. B-352 Desplazamientos espectrales, S_d , de los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.141g, N2] (fuente: preparado por el autor)

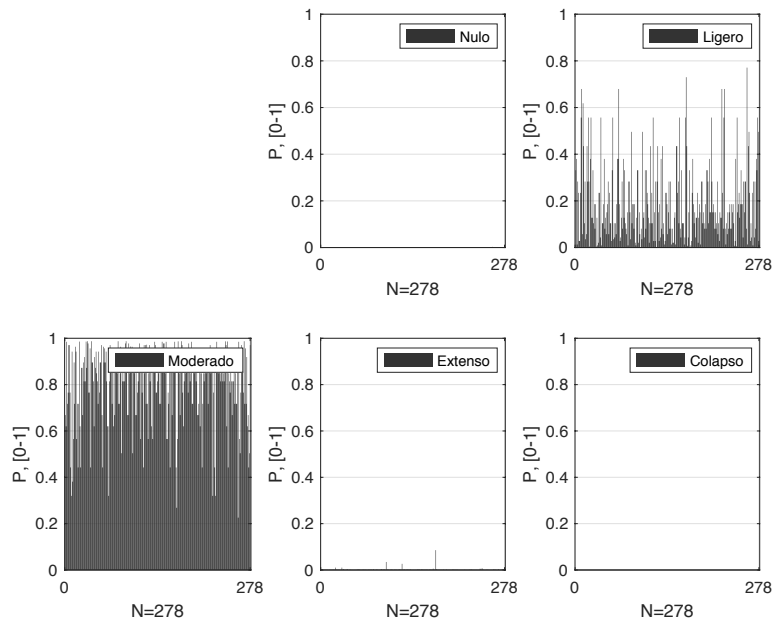


Fig. B-353 Probabilidades de pertenencia de los estados de daño nulo y no nulos para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.141g, N2] (fuente: preparado por el autor)

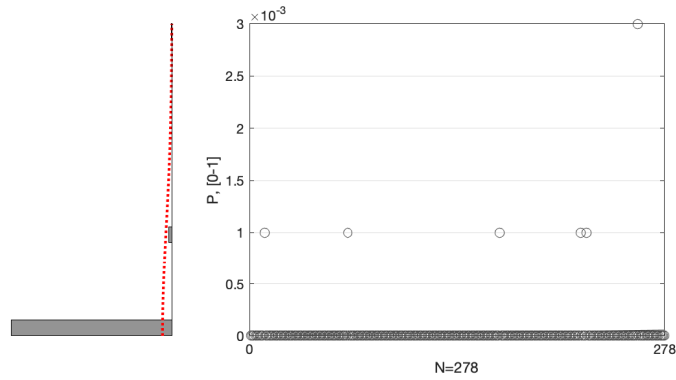


Fig. B-354 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Nulo para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.141g, N2] (fuente: preparado por el autor)

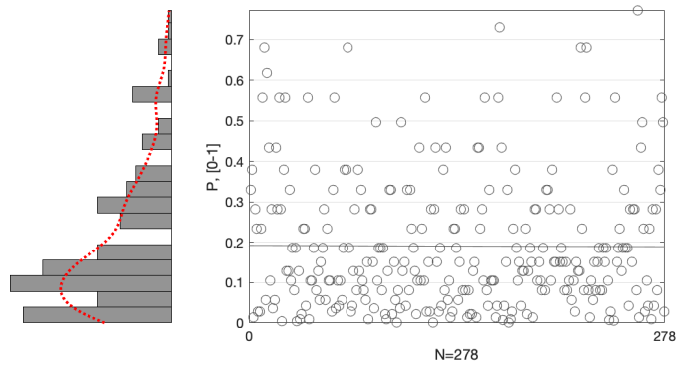


Fig. B-355 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Ligero para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0. 141g, N2] (fuente: preparado por el autor)

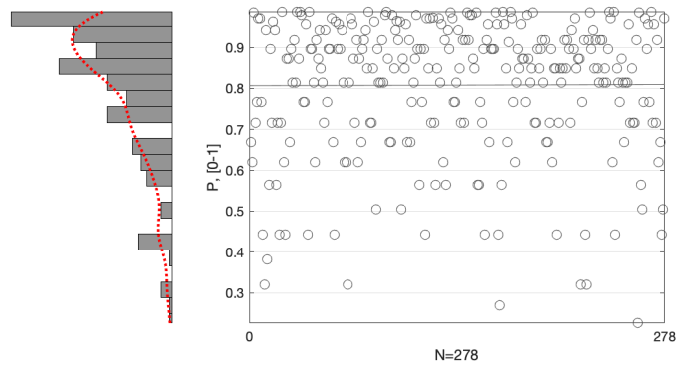


Fig. B-356 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Moderado para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0. 141g, N2] (fuente: preparado por el autor)

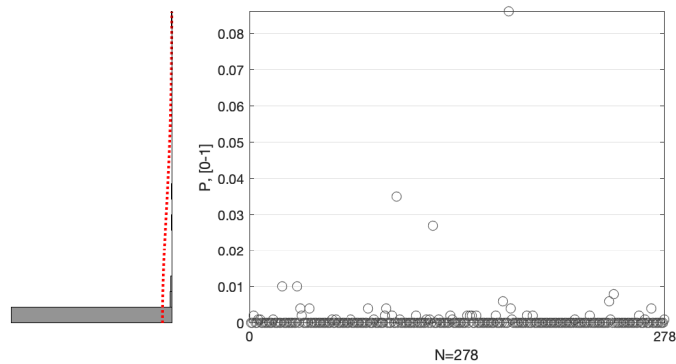


Fig. B-357 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Severo para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0. 141g, N2] (fuente: preparado por el autor)

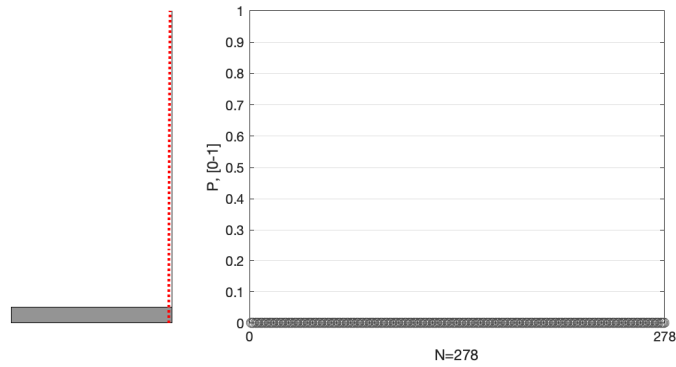


Fig. B-358 Probabilidades de pertenencia al estado de daño de Colapso para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0. 141g, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +Y, pga = 0.141 g

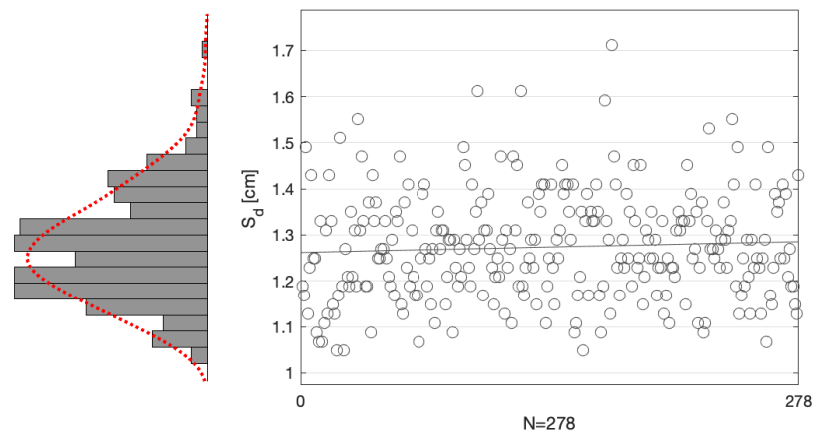


Fig. B-359 Desplazamientos espectrales, S_d , de los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0.141g, N2] (fuente: preparado por el autor)

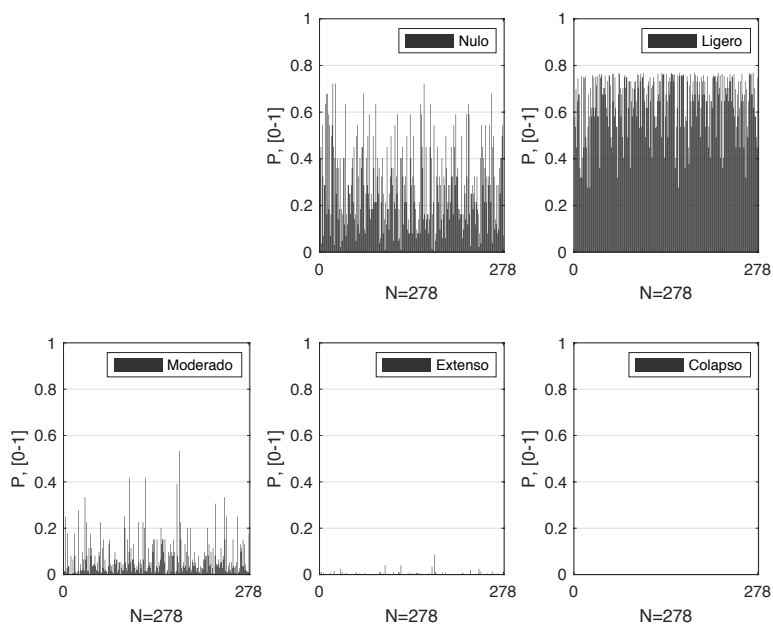


Fig. B-360 Probabilidades de pertenencia de los estados de daño nulo y no nulos para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0.141g, N2] (fuente: preparado por el autor)

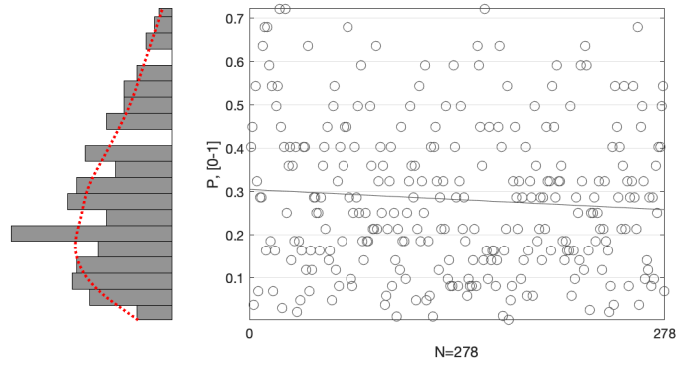


Fig. B-361 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Nulo para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0.141g, N2] (fuente: preparado por el autor)

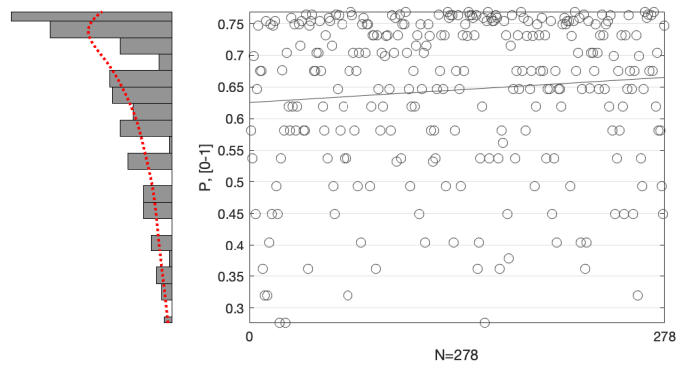


Fig. B-362 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Ligero para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0. 0.141g, N2] (fuente: preparado por el autor)

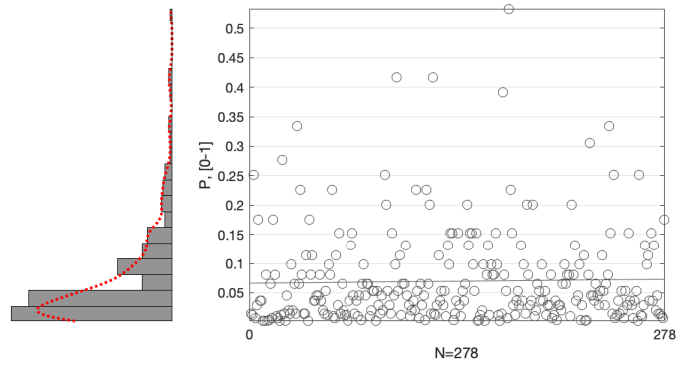


Fig. B-363 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Moderado para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0. 0.141g, N2] (fuente: preparado por el autor)

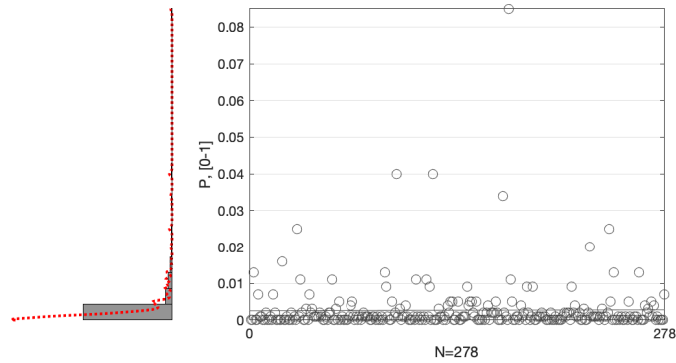


Fig. B-364 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Extenso para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0. 0.141g, N2] (fuente: preparado por el autor)

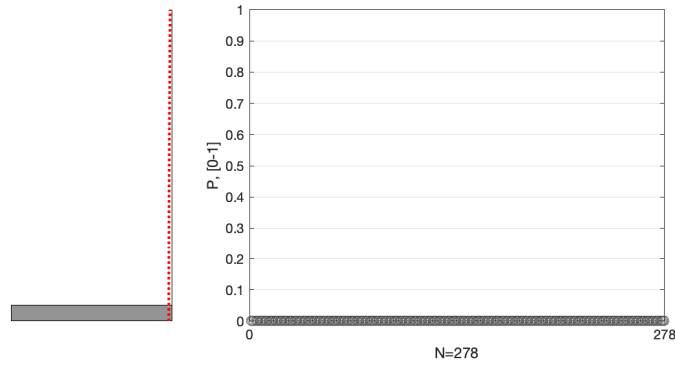


Fig. B-365 Probabilidades de pertenencia al estado de daño de Colapso para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0. 0.141g, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +X, pga = 0.194 g

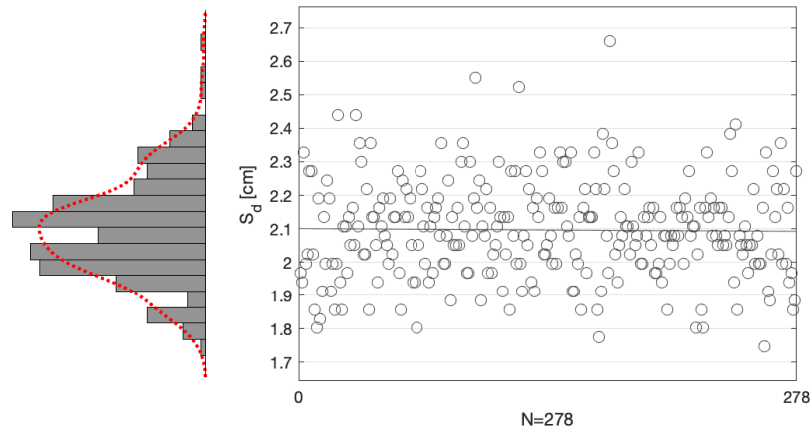


Fig. B-366 Desplazamientos espectrales, S_d , de los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.194g, N2] (fuente: preparado por el autor)

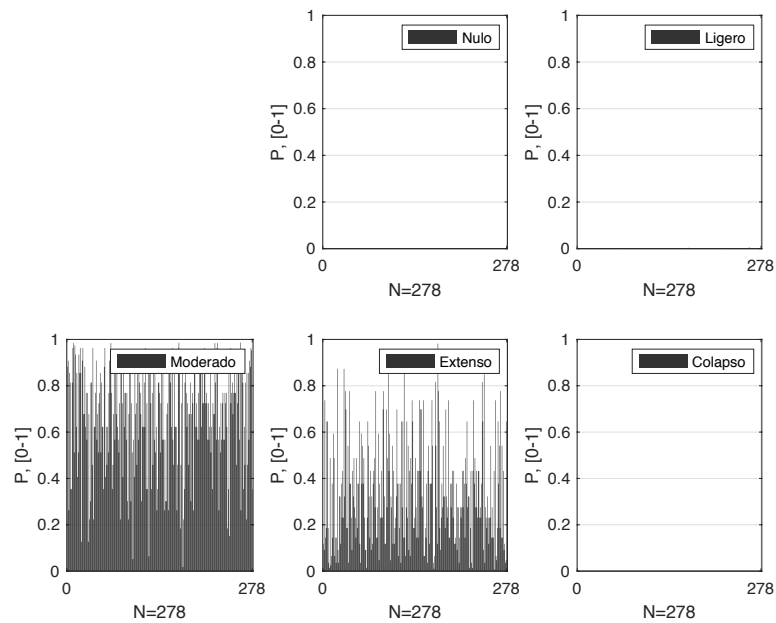


Fig. B-367 Probabilidades de pertenencia de los estados de daño nulo y no nulos para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.194g, N2] (fuente: preparado por el autor)

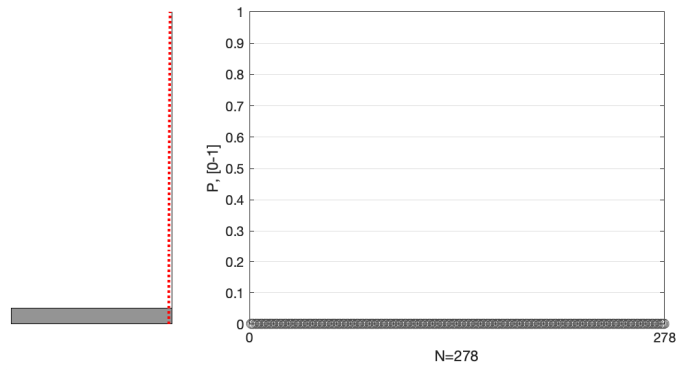


Fig. B-368 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Nulo para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.194g, N2] (fuente: preparado por el autor)

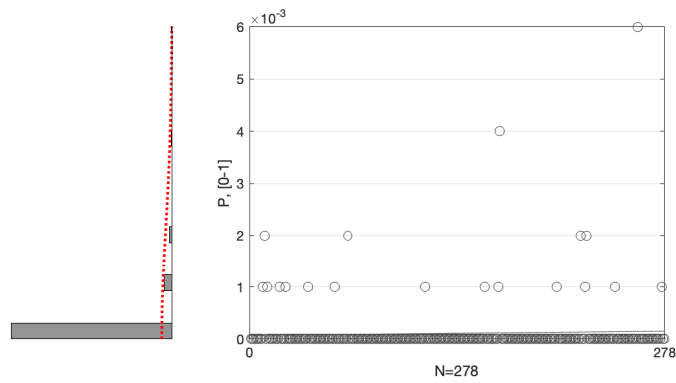


Fig. B-369 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Ligero para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.194g, N2] (fuente: preparado por el autor)

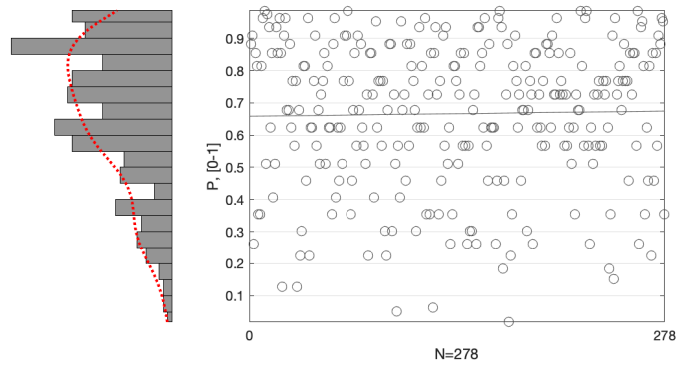


Fig. B-370 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Moderado para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.194g, N2] (fuente: preparado por el autor)

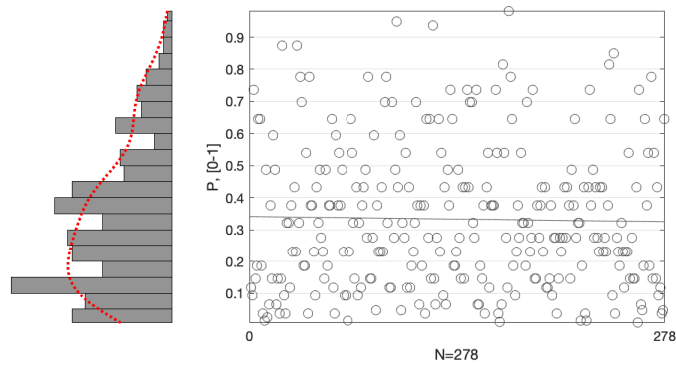


Fig. B-371 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Severo para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.194g, N2] (fuente: preparado por el autor)

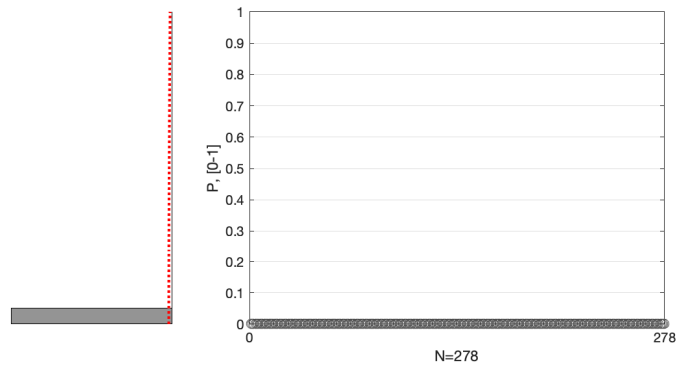


Fig. B-372 Probabilidades de pertenencia al estado de daño de Colapso para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.194g, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +Y, pga = 0.194 g

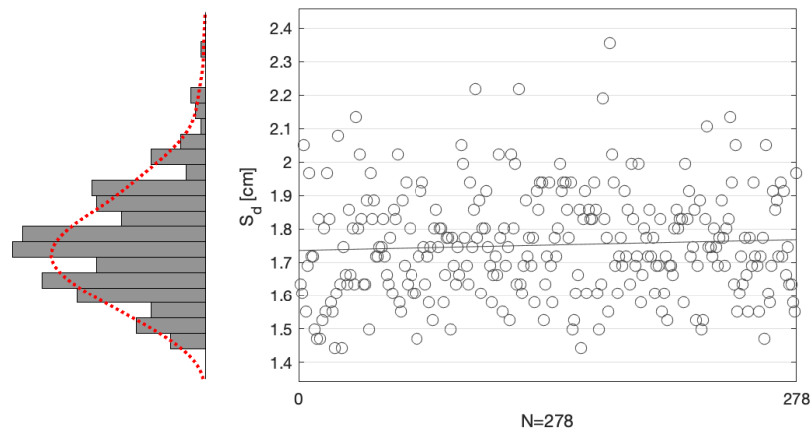


Fig. B-373 Desplazamientos espectrales, S_d , de los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0.194g, N2] (fuente: preparado por el autor)

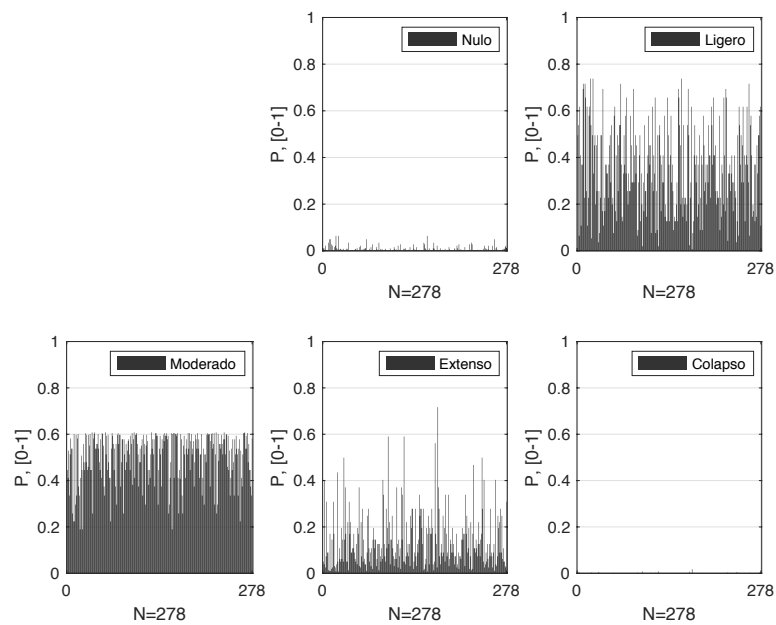


Fig. B-374 Probabilidades de pertenencia de los estados de daño nulo y no nulos para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0.194g, N2] (fuente: preparado por el autor)

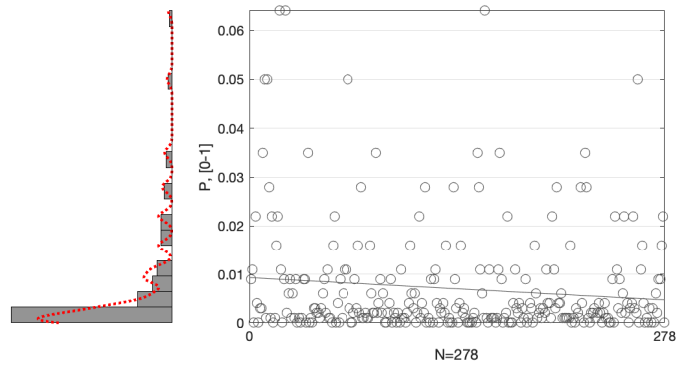


Fig. B-375 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Nulo para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0.194g, N2] (fuente: preparado por el autor)

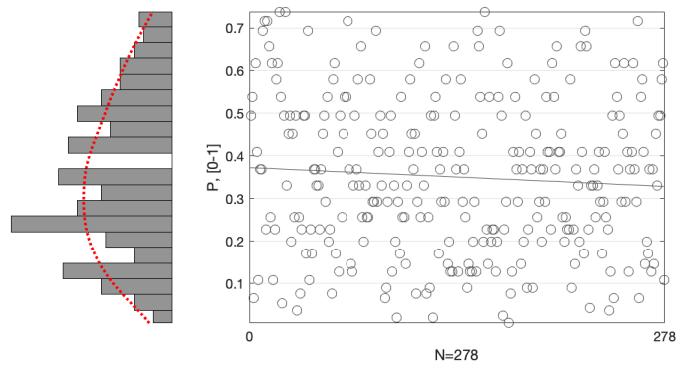


Fig. B-376 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Ligero para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0. 0. 194g, N2] (fuente: preparado por el autor)

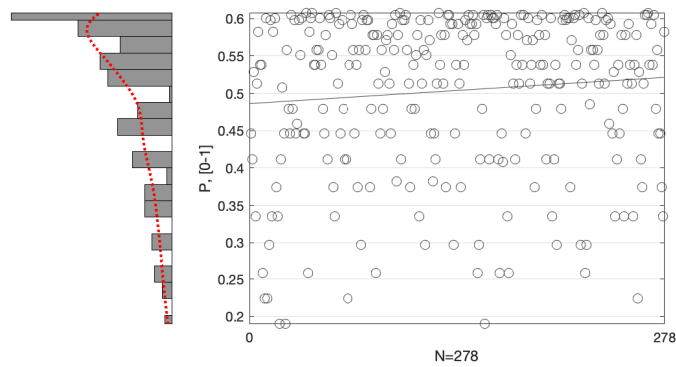


Fig. B-377 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Moderado para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0. 0. 194g, N2] (fuente: preparado por el autor)

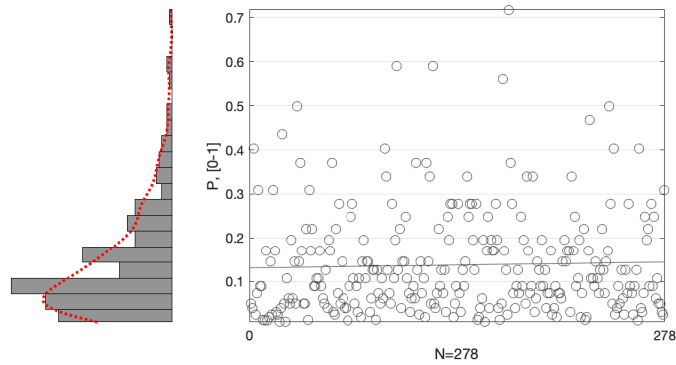


Fig. B-378 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Extenso para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0. 0. 194g, N2] (fuente: preparado por el autor)

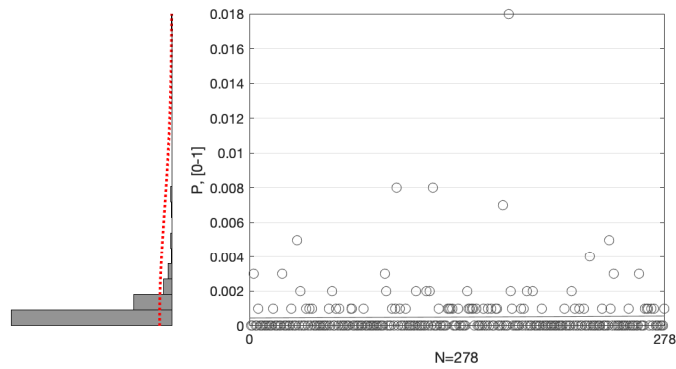


Fig. B-379 Probabilidades de pertenencia al estado de daño de Colapso para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0. 0. 194g, N2] (fuente: preparado por el autor)

B.6.3.4 Grado de daño medio

Dirección +X

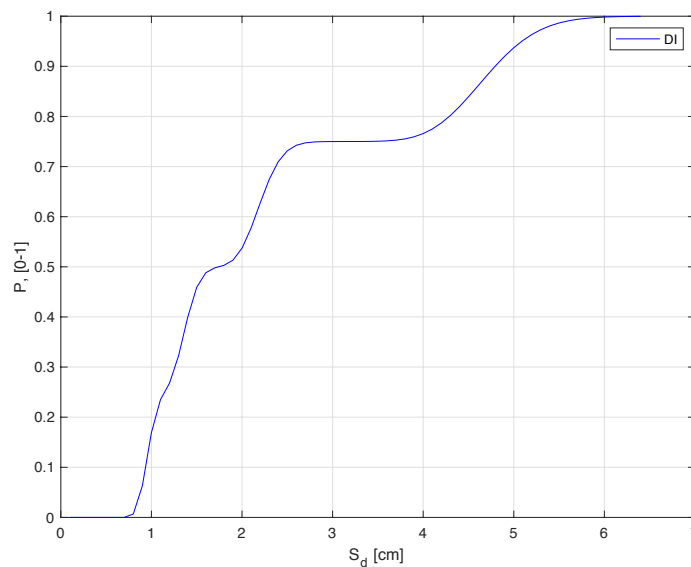


Fig. B-380 Curva del grado de daño medio (i.e. índice de Daño, DI) [Dir. +X, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +X, pga = 0.04 g

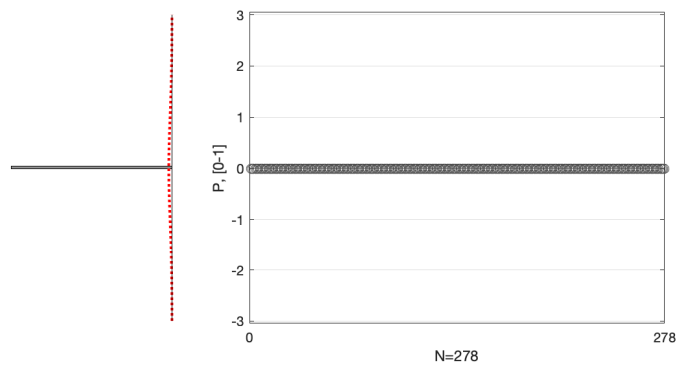


Fig. B-381 Probabilidades de ocurrencia de daño medio para los distintos puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.04g, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +X, $p_{ga} = 0.141 \text{ g}$

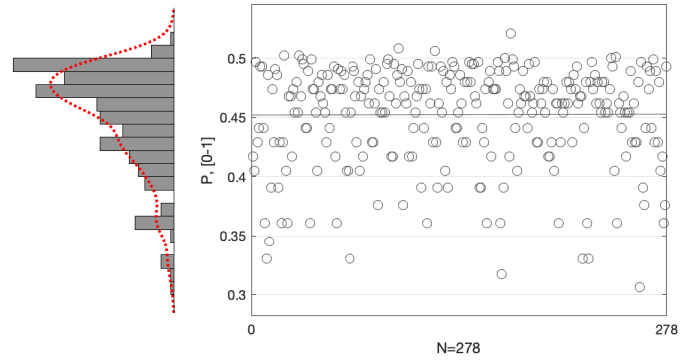


Fig. B-382 Probabilidades de ocurrencia de daño medio para los distintos puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, $p_{ga}= 0.141\text{g}$, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +X, $p_{ga} = 0.194 \text{ g}$

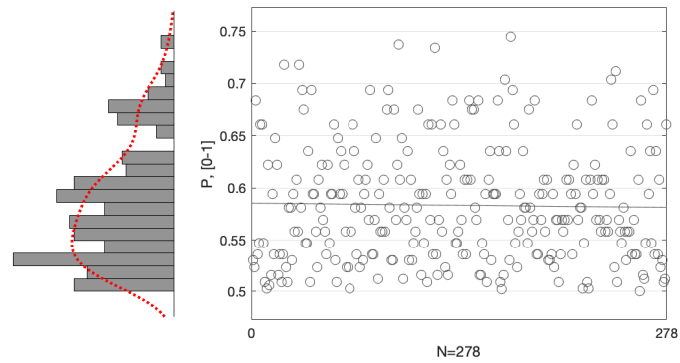


Fig. B-383 Probabilidades de ocurrencia de daño medio para los distintos puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, $p_{ga}= 0.194\text{g}$, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +Y

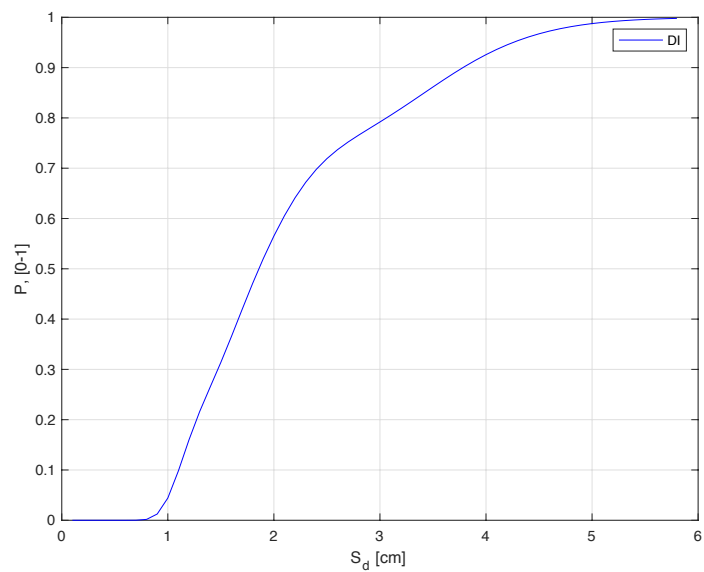


Fig. B-384 Curva del grado de daño medio (i.e. índice de Daño, DI) [Dir. +Y, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +Y, pga = 0.04 g

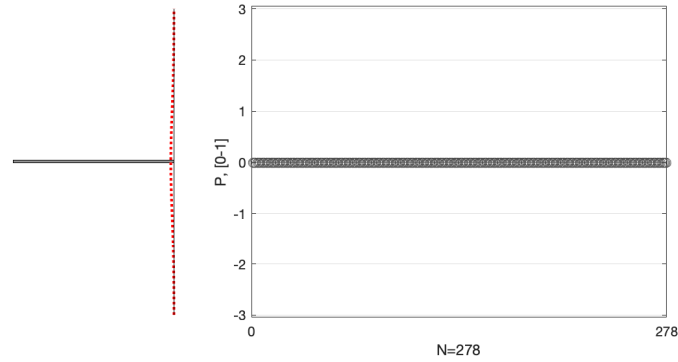


Fig. B-385 Probabilidades de ocurrencia de daño medio para los distintos puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0.04g, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +Y, pga = 0.141 g

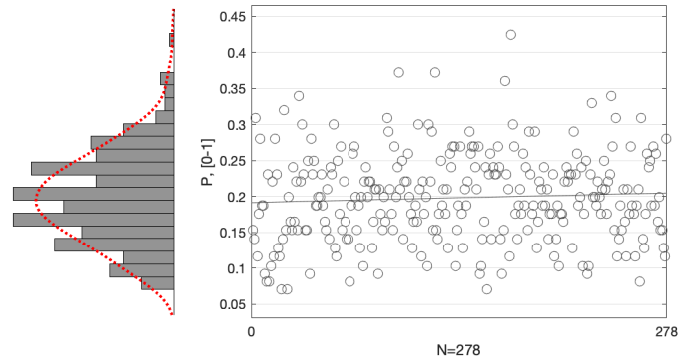


Fig. B-386 Probabilidades de ocurrencia de daño medio para los distintos puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0.141g, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +Y, pga = 0.194 g

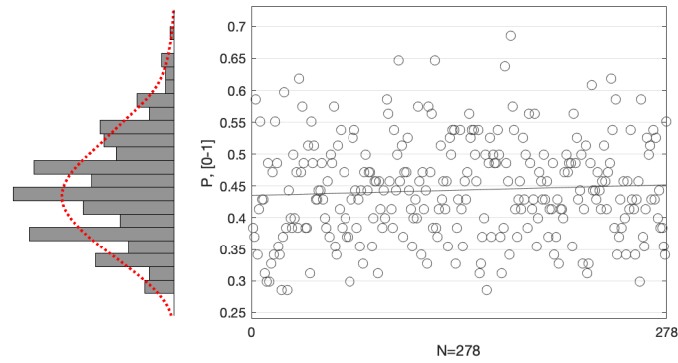


Fig. B-387 Probabilidades de ocurrencia de daño medio para los distintos puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0.194g, N2] (fuente: preparado por el autor)

B.6.4 Análisis dinámico incremental

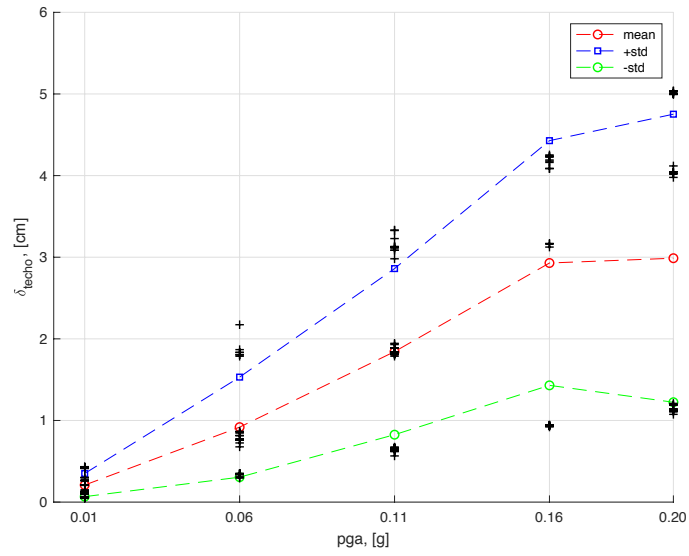


Fig. B-388 Desplazamiento en el techo vs pga de los distintos análisis dinámicos realizados en el agregado AG-02 en la dirección +X (fuente: preparado por el autor)

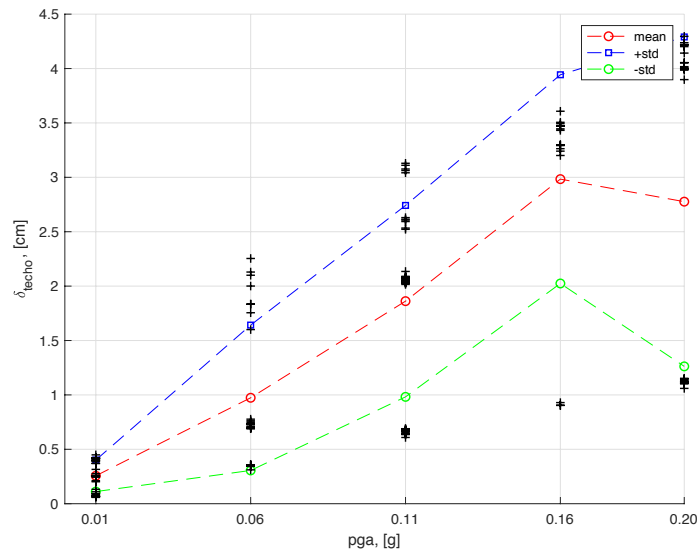


Fig. B-389 Desplazamiento en el techo vs pga de los distintos análisis dinámicos realizados en el agregado AG-02 en la dirección +Y (fuente: preparado por el autor)

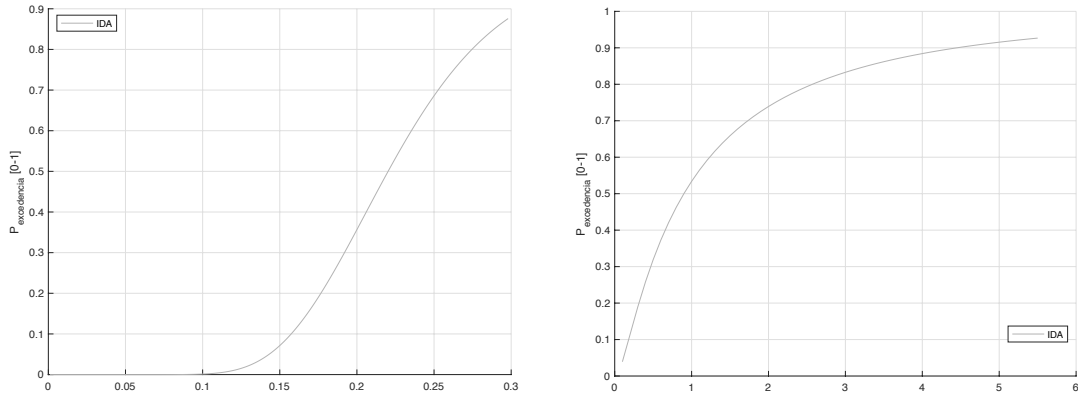


Fig. B-390 Curva de daño esperado para el agregado AG-02 y un $IM = pga$ (izq) ó $IM = S_d$ (der.) (fuente: preparado por el autor)

Tabla B-18 Estadísticas básicas de los conjuntos de puntos asociados a cada valor de pga del agregado AG-02 en ambas direcciones principales [cm] (fuente: preparado por el autor)

	Dir.	min	max	mean	median	std
$P_{0.01g}$	+X	0,05	0,43	0,21	0,18	0,14
	+Y	0,06	0,45	0,26	0,26	0,14
$P_{0.06g}$	+X	0,29	2,17	0,92	0,77	0,61
	+Y	0,31	2,25	0,97	0,73	0,67
$P_{0.11g}$	+X	0,57	3,33	1,84	1,83	1,02
	+Y	0,61	3,13	1,86	2,06	0,88
$P_{0.16g}$	+X	0,92	4,25	2,93	3,63	1,50
	+Y	0,90	3,61	2,98	3,37	0,96
$P_{0.20g}$	+X	1,08	5,04	2,99	4,00	1,76
	+Y	1,06	4,30	2,78	3,99	1,51

B.7 AG-03

B.7.1 Análisis modal

Tabla B-19 Resultados del análisis modal para el edificio agregado AG-03 (fuente: preparado por el autor)

# Modo	T [s]	f [rad/s]	ω [Hz]	Mx [kg]	My [kg]	Mz [kg]	ΣM [kg]
1	0,657	1,52	9,56	1981376,50	1635257,64	0,05	3616634,19
2	0,620	1,61	10,14	1714671,04	1968076,28	71,94	3682819,26
3	0,564	1,77	11,14	180894,60	261600,85	1,24	442496,69
4	0,220	4,55	28,57	278956,18	149196,74	11,92	428164,84
5	0,213	4,69	29,45	266246,80	382495,71	31,31	648773,83
6	0,189	5,30	33,28	47694,14	59061,17	8,97	106764,28
7	0,156	6,40	40,21	371,73	554,66	6451,81	7378,21
8	0,139	7,20	45,24	315,02	184,97	3407523,35	3408023,33
9	0,134	7,48	47,02	4483,28	1049,05	13981,95	19514,28
10	0,133	7,53	47,33	8958,70	13018,76	182156,16	204133,61
11	0,126	7,92	49,77	19188,47	10214,70	34424,73	63827,90
12	0,125	8,00	50,25	26587,07	30372,92	15090,84	72050,83
13	0,125	8,02	50,42	7107,50	16969,13	5033,73	29110,36
14	0,123	8,16	51,28	3925,75	2989,46	1095,82	8011,02
15	0,122	8,22	51,62	20939,08	34426,53	85898,16	141263,76
16	0,119	8,39	52,72	2632,93	3547,68	25901,89	32082,50
17	0,119	8,42	52,90	436,25	386,22	1178,67	2001,14
18	0,112	8,89	55,88	1403,13	1474,82	19666,66	22544,61
19	0,110	9,06	56,93	3317,38	4743,64	1,54	8062,55
20	0,108	9,22	57,93	3275,76	2635,93	421,56	6333,25
21	0,108	9,27	58,22	887,25	447,98	2655,66	3990,89

Tabla B-20 Resultados del análisis modal para el edificio agregado AG-03 (continuación) (fuente: preparado por el autor)

# Modo	T [s]	IFx [%]	IFy [%]	IFz [%]	RAMx [%]	RAMy [%]	RAMz [%]	AAMx [%]	AAMy [%]	AAMz [%]
1	0,657	54,785	45,215	0,000	43,321	35,714	0,000	38,897	32,102	0,000
2	0,620	46,559	53,439	0,002	37,490	42,983	0,002	33,661	38,636	0,001
3	0,564	40,880	59,119	0,000	3,955	5,713	0,000	3,551	5,136	0,000
4	0,220	65,152	34,846	0,003	6,099	3,258	0,000	5,476	2,929	0,000
5	0,213	41,038	58,957	0,005	5,821	8,354	0,001	5,227	7,509	0,001
6	0,189	44,672	55,319	0,008	1,043	1,290	0,000	0,936	1,159	0,000
7	0,156	5,038	7,518	87,444	0,008	0,012	0,170	0,007	0,011	0,127
8	0,139	0,009	0,005	99,985	0,007	0,004	89,634	0,006	0,004	66,894
9	0,134	22,974	5,376	71,650	0,098	0,023	0,368	0,088	0,021	0,274
10	0,133	4,389	6,378	89,234	0,196	0,284	4,792	0,176	0,256	3,576
11	0,126	30,063	16,004	53,934	0,420	0,223	0,906	0,377	0,201	0,676
12	0,125	36,900	42,155	20,945	0,581	0,663	0,397	0,522	0,596	0,296
13	0,125	24,416	58,292	17,292	0,155	0,371	0,132	0,140	0,333	0,099
14	0,123	49,004	37,317	13,679	0,086	0,065	0,029	0,077	0,059	0,022
15	0,122	14,823	24,370	60,807	0,458	0,752	2,260	0,411	0,676	1,686
16	0,119	8,207	11,058	80,735	0,058	0,077	0,681	0,052	0,070	0,508
17	0,119	21,800	19,300	58,900	0,010	0,008	0,031	0,009	0,008	0,023
18	0,112	6,224	6,542	87,234	0,031	0,032	0,517	0,028	0,029	0,386
19	0,110	41,145	58,835	0,019	0,073	0,104	0,000	0,065	0,093	0,000
20	0,108	51,723	41,620	6,656	0,072	0,058	0,011	0,064	0,052	0,008
21	0,108	22,232	11,225	66,543	0,019	0,010	0,070	0,017	0,009	0,052

B.7.2 Análisis de capacidad

B.7.2.1 Curva de capacidad

Dirección +X

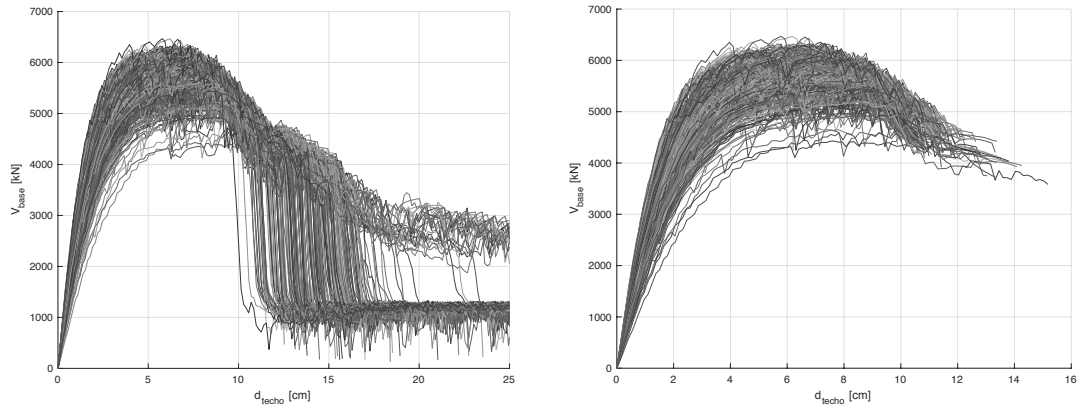


Fig. B-391 Curvas de capacidad originales (izq. - 3muri) y procesadas (der. - criterio de punto último) [Dir. +X] (fuente: preparado por el autor)

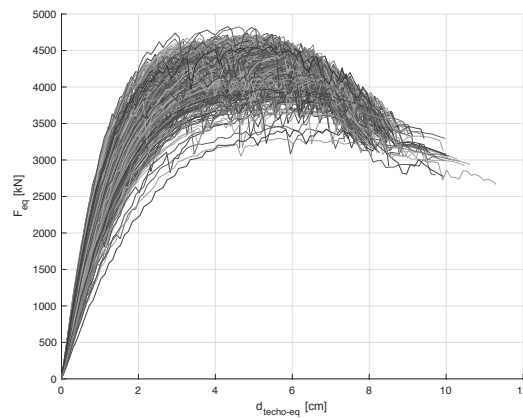


Fig. B-392 Curvas de capacidad de los sistemas equivalentes de 1GDL [Dir. +X, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +Y

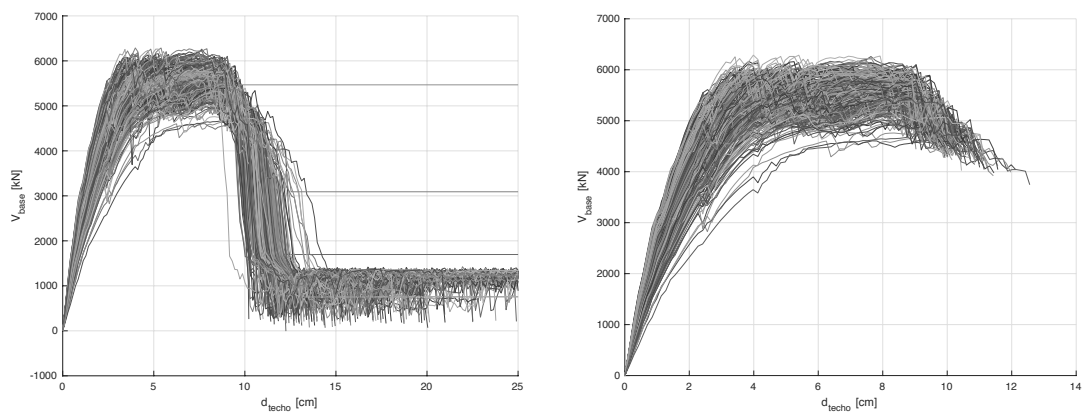


Fig. B-393 Curvas de capacidad originales (izq. - 3muri) y procesadas (der. - criterio de punto último) [Dir. +Y] (fuente: preparado por el autor)

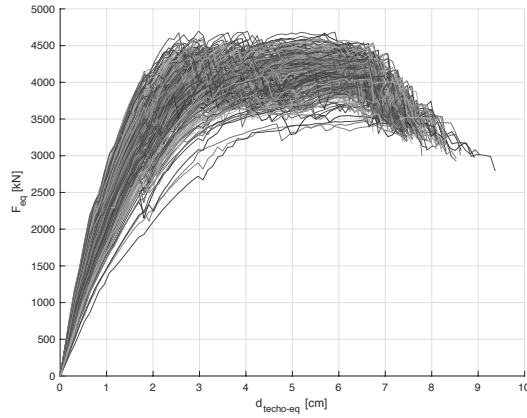


Fig. B-394 Curvas de capacidad de los sistemas equivalentes de 1GDL [Dir. +Y, N2] (fuente: preparado por el autor)

B.7.2.2 Curva de capacidad en formato aceleración-desplazamiento (ADRS)

Dirección +X

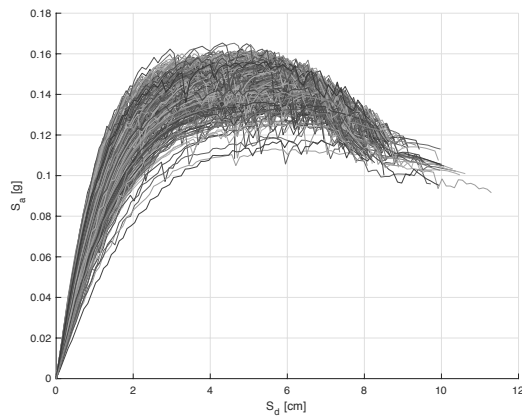


Fig. B-395 Curvas de capacidad en formato desplazamiento-aceleración (ADRS) [Dir. +Y, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +Y

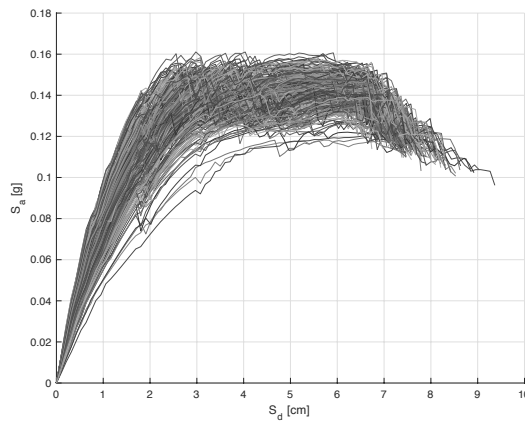


Fig. B-396 Curvas de capacidad en formato desplazamiento-aceleración (ADRS) [Dir. +Y, N2] (fuente: preparado por el autor)

B.7.2.3 Representación bilineal

Dirección +X

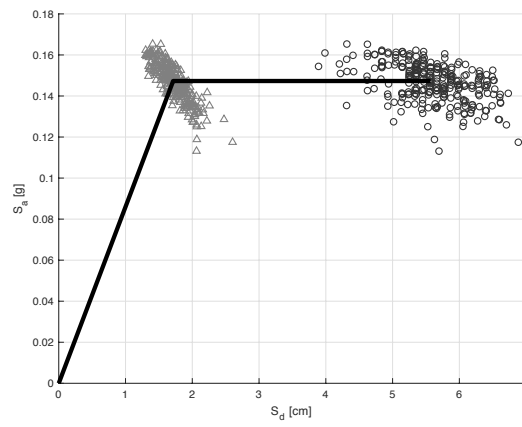


Fig. B-397 Representación bilineal promedio y nubes de valores de los puntos de fluencia y último [Dir. +X, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +Y

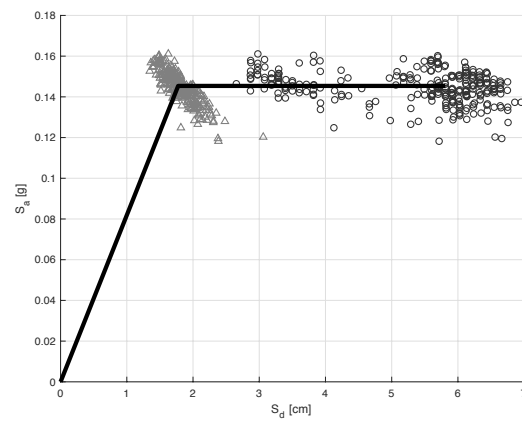


Fig. B-398 Representación bilineal promedio y nubes de valores de los puntos de fluencia y último [Dir. +Y, N2] (fuente: preparado por el autor)

B.7.3 Fragilidad y daño esperado

B.7.3.1 Curvas de fragilidad

Dirección +X

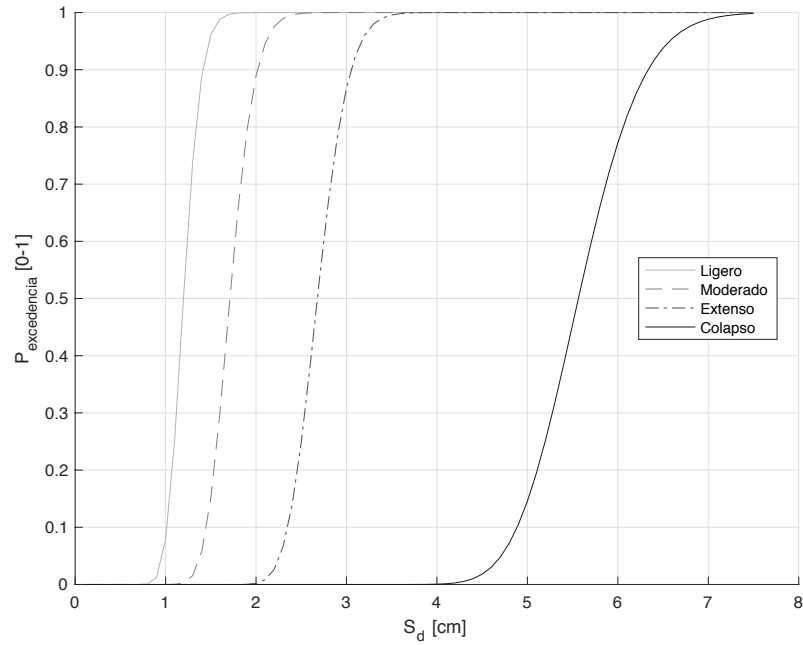


Fig. B-399 Curvas de fragilidad [Dir. +X, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +Y

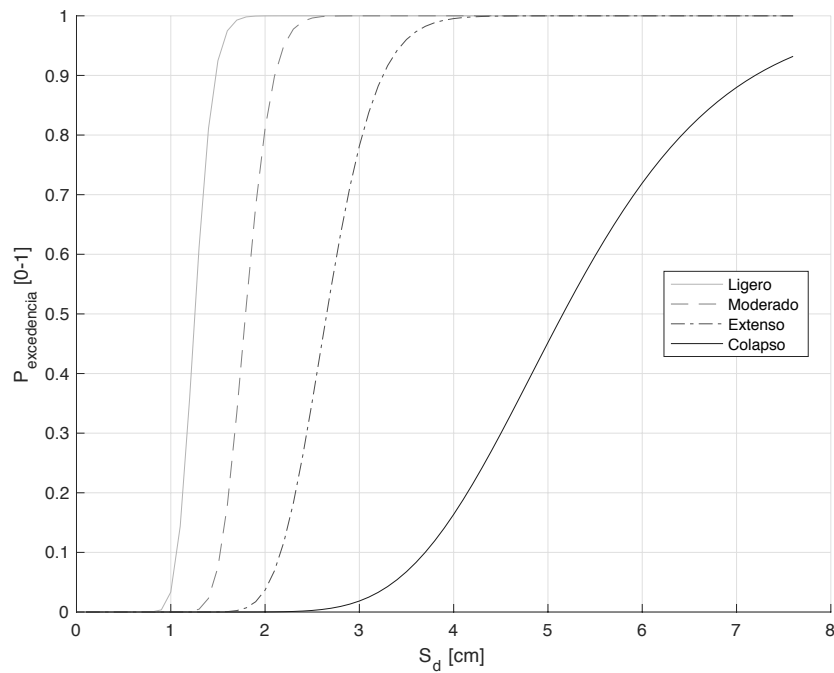


Fig. B-400 Curvas de fragilidad [Dir. +Y, N2] (fuente: preparado por el autor)

B.7.3.2 Estados de daño

Dirección +X

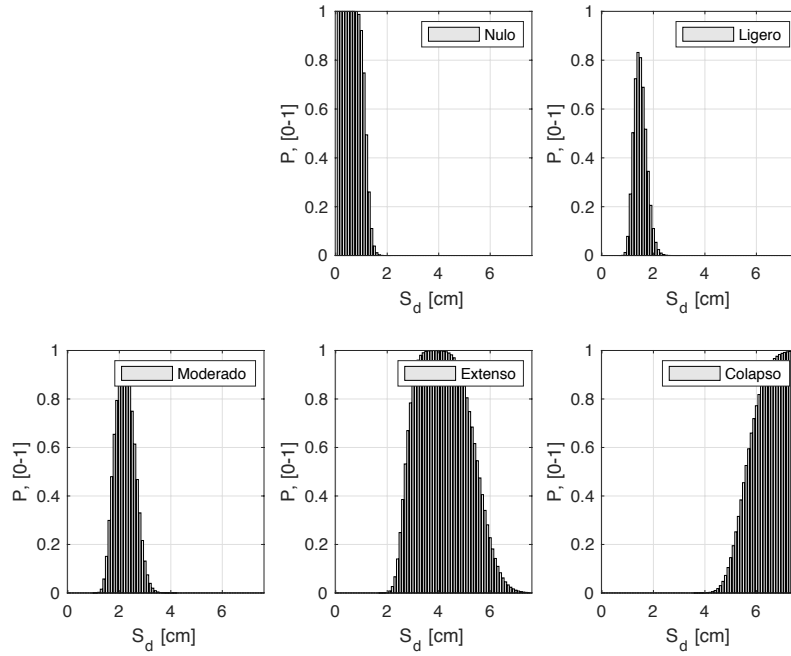


Fig. B-401 Probabilidades de ocurrencia de los distintos estados de daño para diversos desplazamientos espectrales posibles obtenidos a partir de las curvas de fragilidad [Dir. +X, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +Y

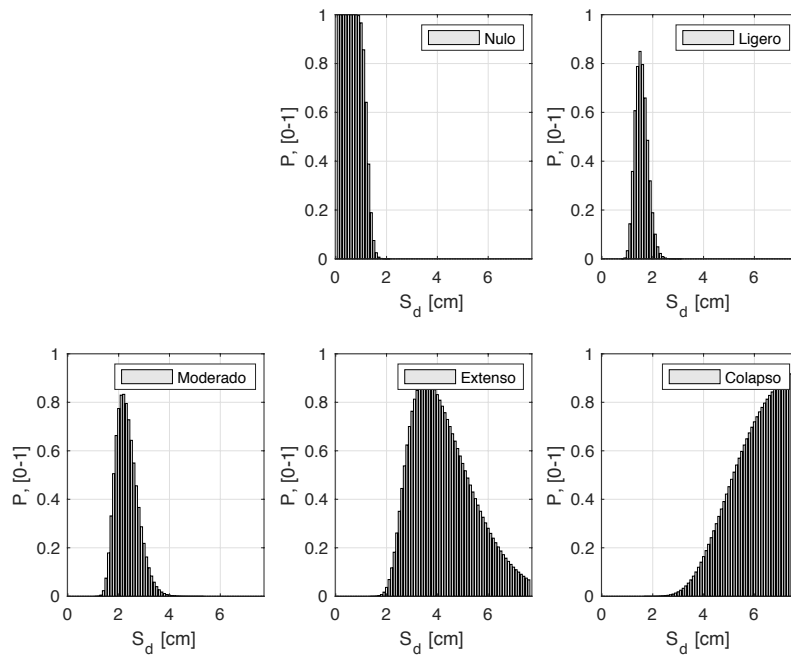


Fig. B-402 Probabilidades de ocurrencia de los distintos estados de daño para diversos desplazamientos espectrales posibles obtenidos a partir de las curvas de fragilidad [Dir. +Y, N2] (fuente: preparado por el autor)

B.7.3.3 Punto de desempeño

Dirección +X, $p_{ga} = 0.04$ g

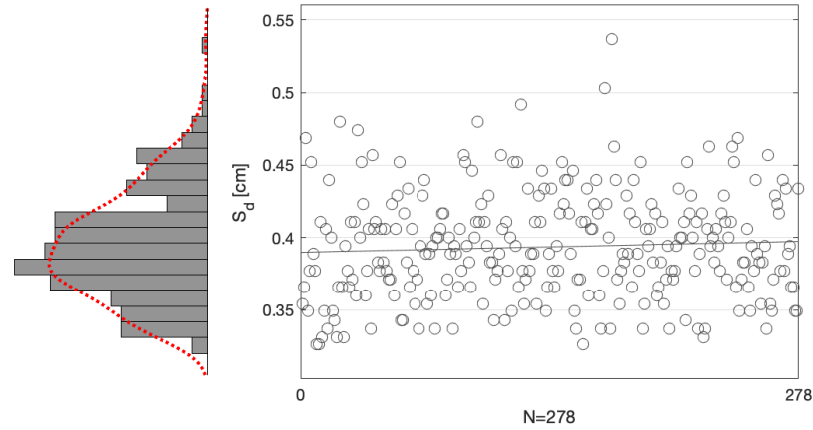


Fig. B-403 Desplazamientos espectrales, S_d , de los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, $p_{ga}=0.04g$, N2] (fuente: preparado por el autor)

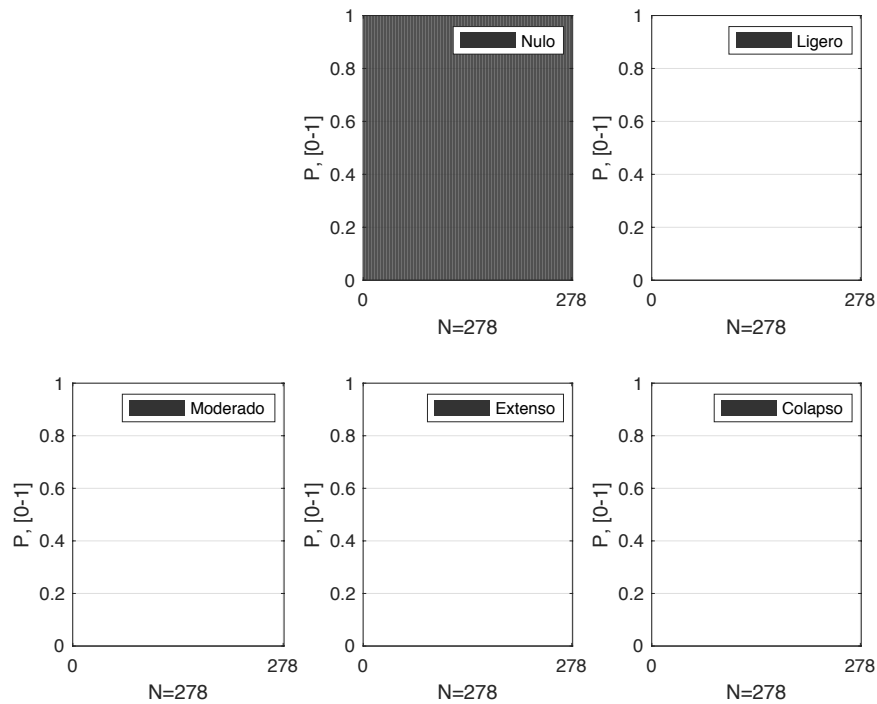


Fig. B-404 Probabilidades de pertenencia de los estados de daño nulo y no nulos para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, $p_{ga}=0.04g$, N2] (fuente: preparado por el autor)

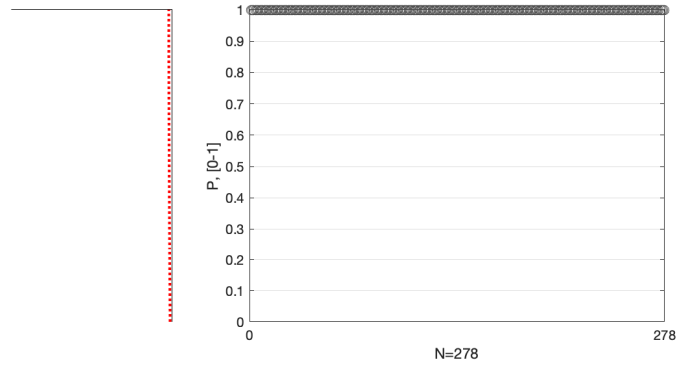


Fig. B-405 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Nulo para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.04g, N2] (fuente: preparado por el autor)

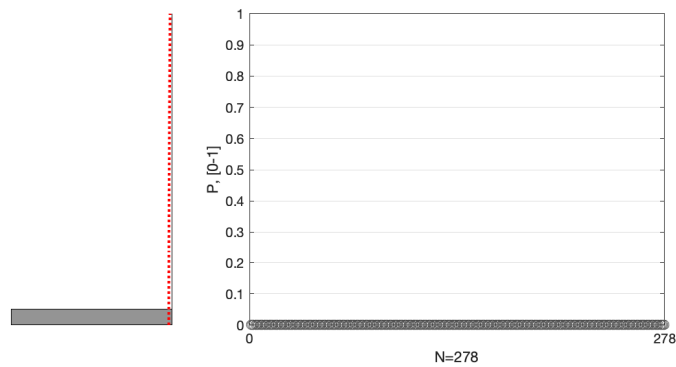


Fig. B-406 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Ligero para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.04g, N2] (fuente: preparado por el autor)

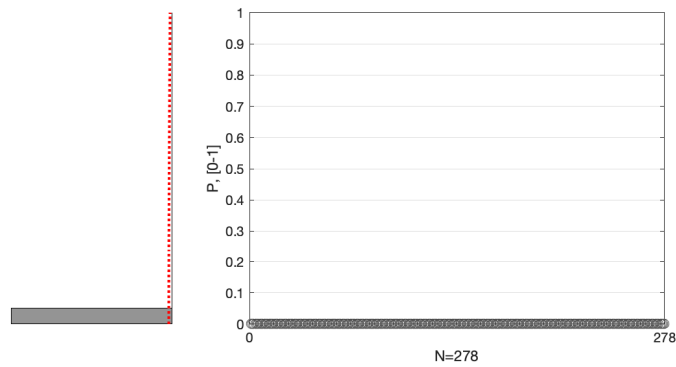


Fig. B-407 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Moderado para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.04g, N2] (fuente: preparado por el autor)

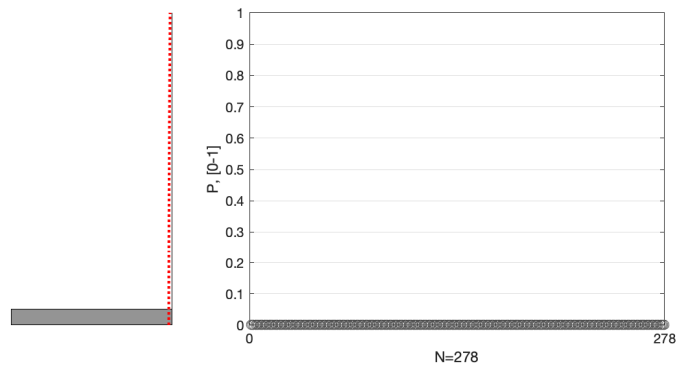


Fig. B-408 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Extenso para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.04g, N2] (fuente: preparado por el autor)

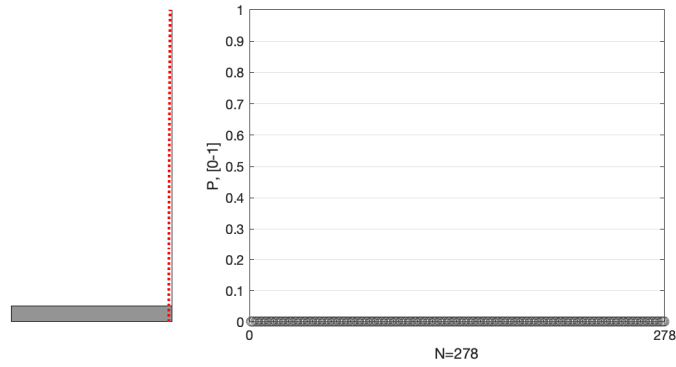


Fig. B-409 Probabilidades de pertenencia al estado de daño de Colapso para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.04g, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +Y, pga = 0.04 g

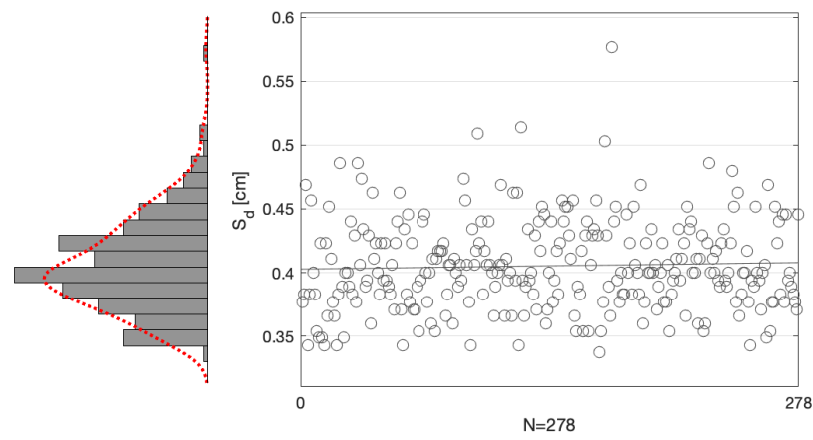


Fig. B-410 Desplazamientos espectrales, S_d , de los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0.04g, N2] (fuente: preparado por el autor)

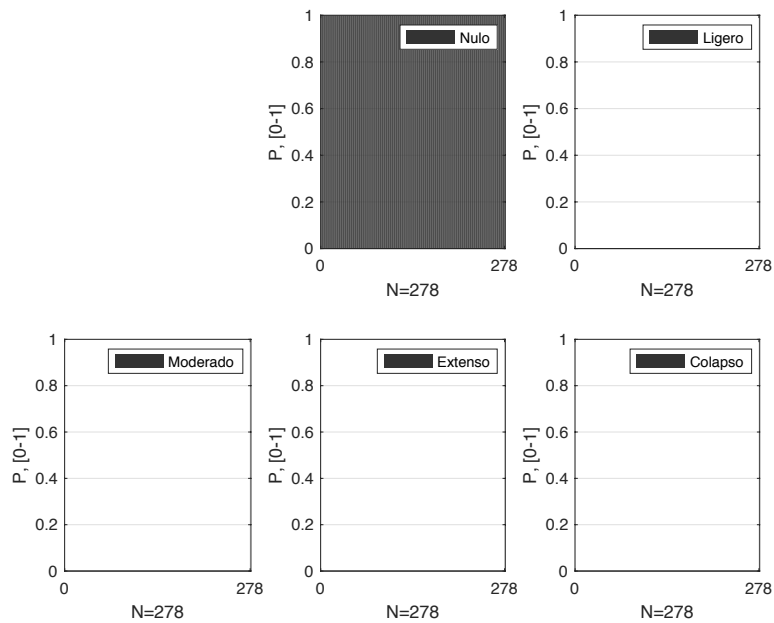


Fig. B-411 Probabilidades de pertenencia de los estados de daño nulo y no nulos para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0.04g, N2] (fuente: preparado por el autor)

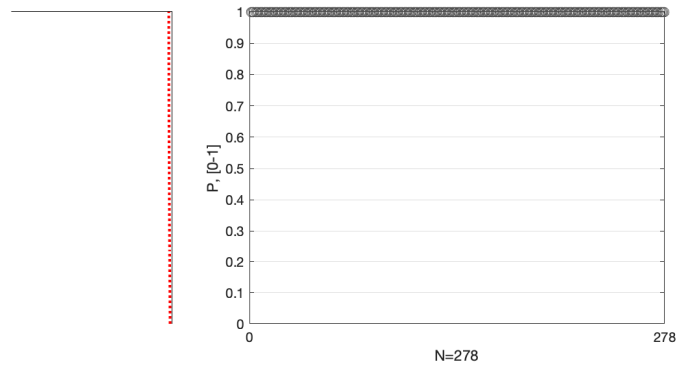


Fig. B-412 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Nulo para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0.04g, N2] (fuente: preparado por el autor)

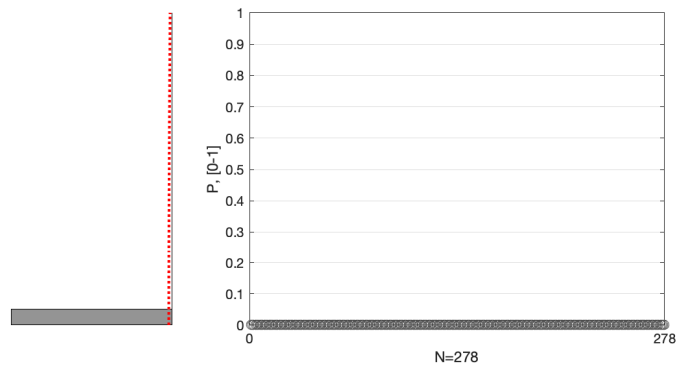


Fig. B-413 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Ligero para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0.04g, N2] (fuente: preparado por el autor)

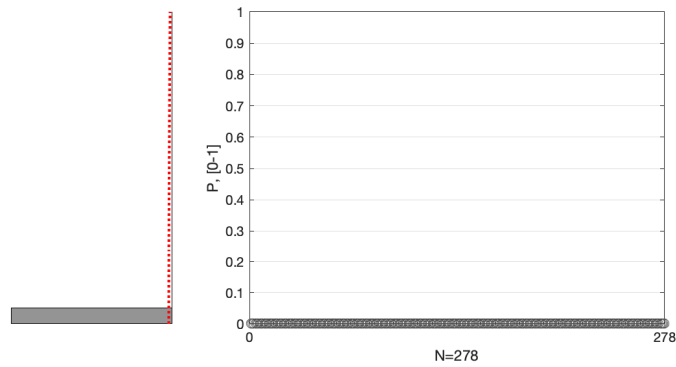


Fig. B-414 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Moderado para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0.04g, N2] (fuente: preparado por el autor)

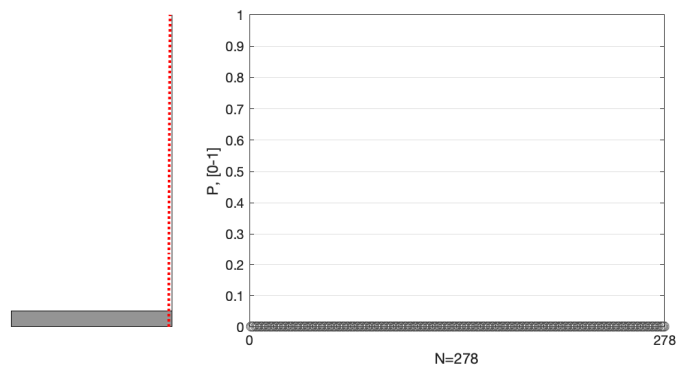


Fig. B-415 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Extenso para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0.04g, N2] (fuente: preparado por el autor)

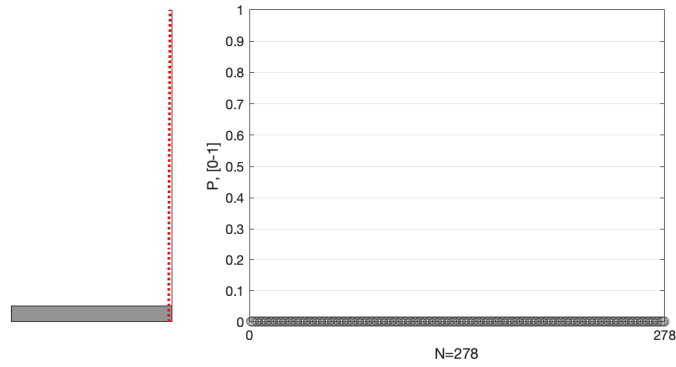


Fig. B-416 Probabilidades de pertenencia al estado de daño de Colapso para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0.04g, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +X, pga = 0.141 g

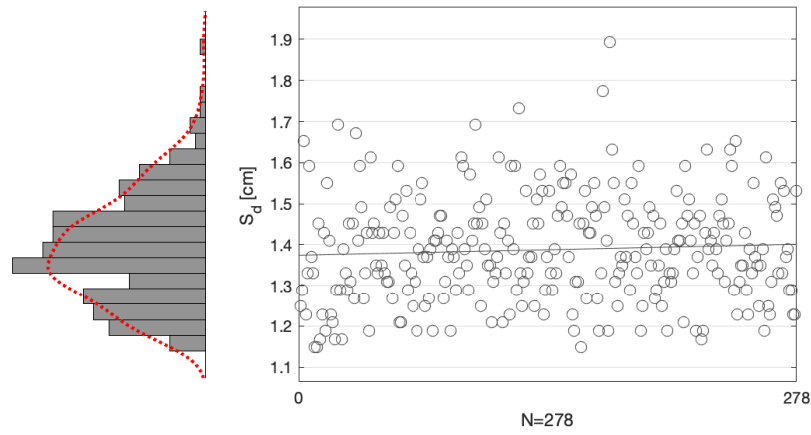


Fig. B-417 Desplazamientos espectrales, S_d , de los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.141g, N2] (fuente: preparado por el autor)

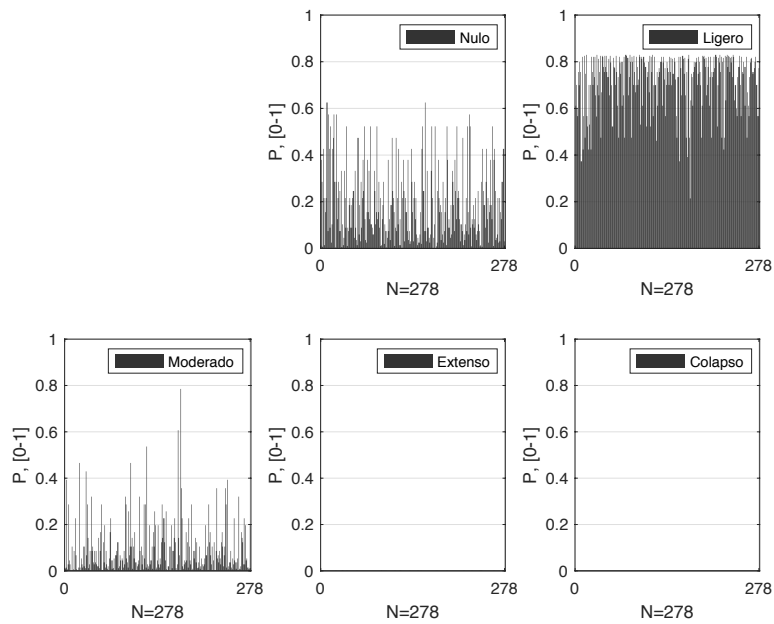


Fig. B-418 Probabilidades de pertenencia de los estados de daño nulo y no nulos para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.141g, N2] (fuente: preparado por el autor)

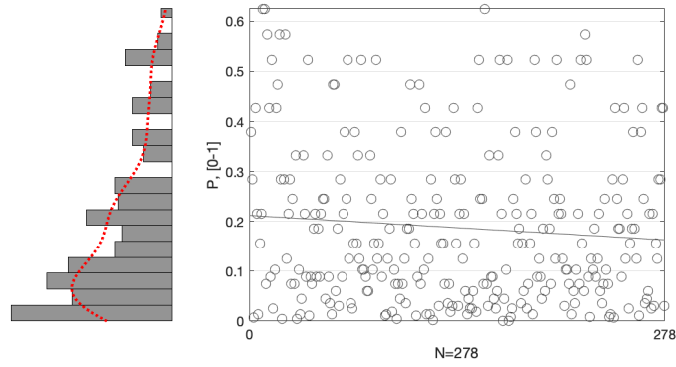


Fig. B-419 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Nulo para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.141g, N2] (fuente: preparado por el autor)

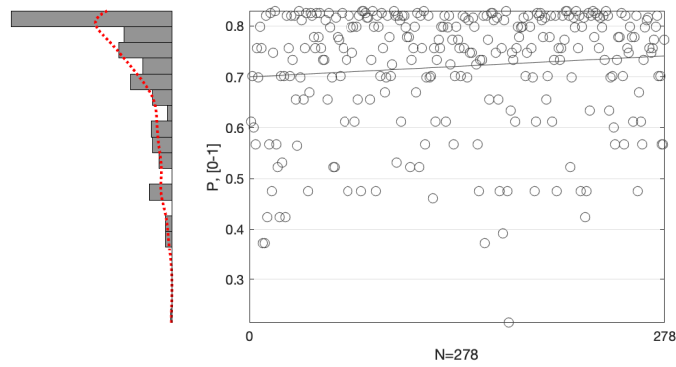


Fig. B-420 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Ligero para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0. 141g, N2] (fuente: preparado por el autor)

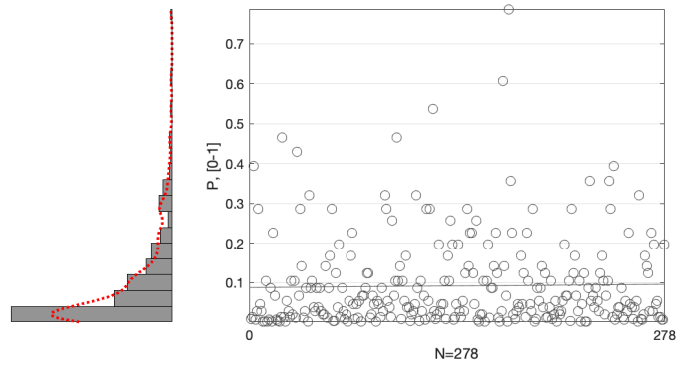


Fig. B-421 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Moderado para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0. 141g, N2] (fuente: preparado por el autor)

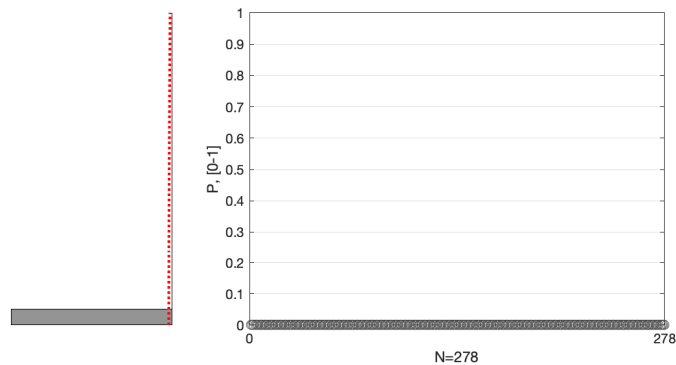


Fig. B-422 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Severo para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0. 141g, N2] (fuente: preparado por el autor)

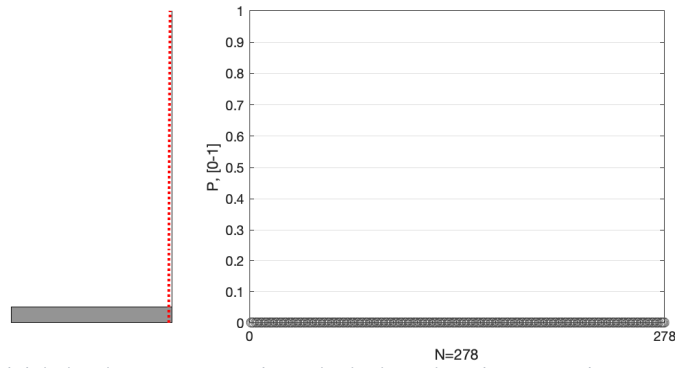


Fig. B-423 Probabilidades de pertenencia al estado de daño de Colapso para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0. 141g, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +Y, pga = 0.141 g

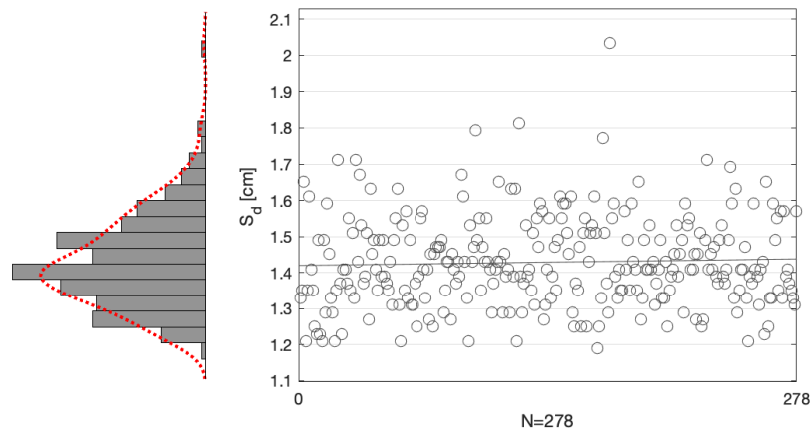


Fig. B-424 Desplazamientos espectrales, S_d , de los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0.141g, N2] (fuente: preparado por el autor)

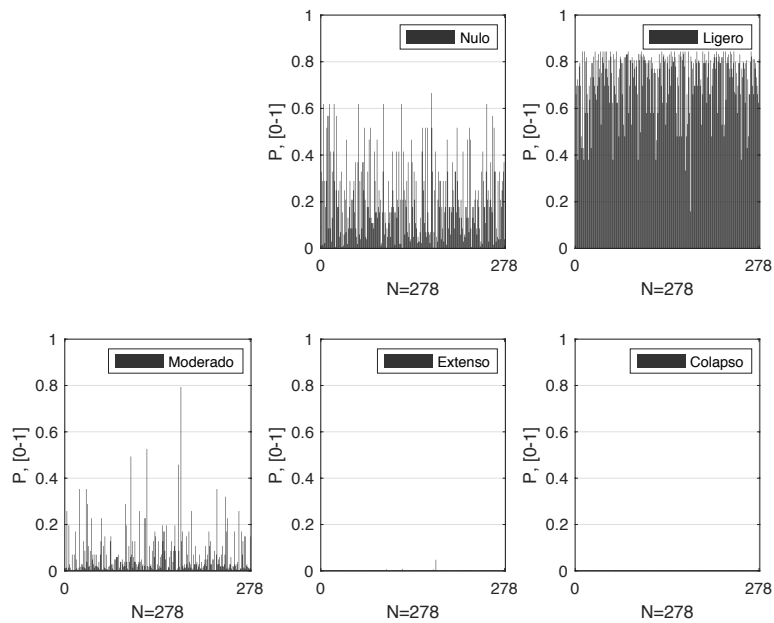


Fig. B-425 Probabilidades de pertenencia de los estados de daño nulo y no nulos para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0.141g, N2] (fuente: preparado por el autor)

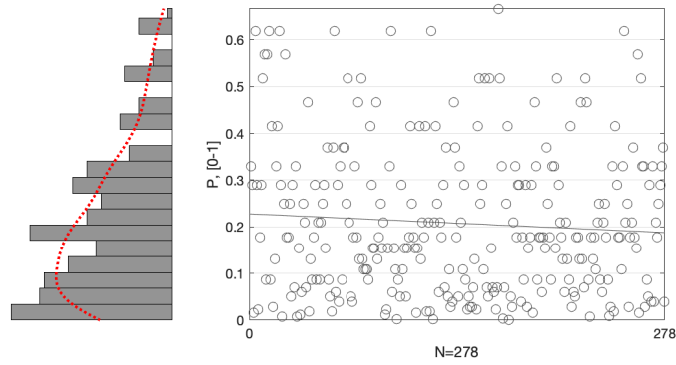


Fig. B-426 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Nulo para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0.141g, N2] (fuente: preparado por el autor)

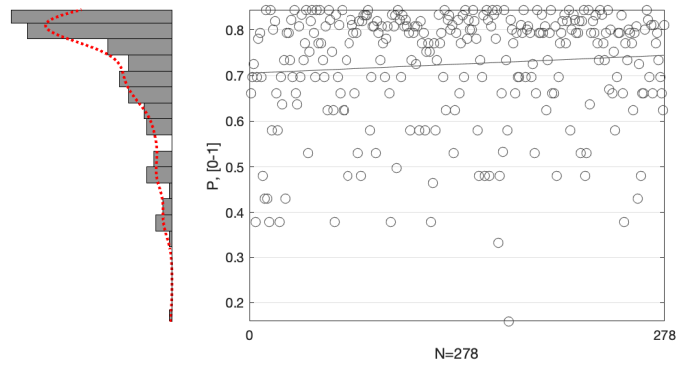


Fig. B-427 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Ligero para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0. 0.141g, N2] (fuente: preparado por el autor)

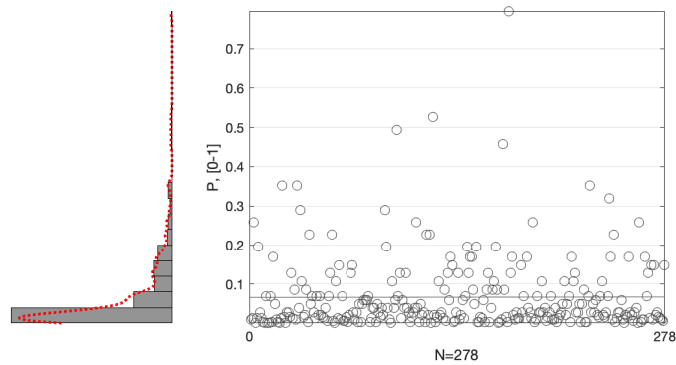


Fig. B-428 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Moderado para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0. 0.141g, N2] (fuente: preparado por el autor)

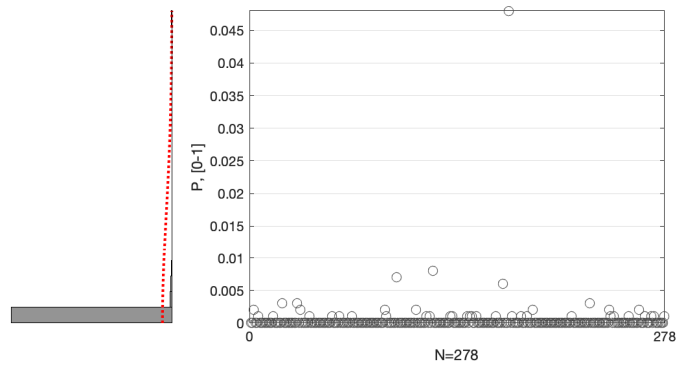


Fig. B-429 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Extenso para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0. 0.141g, N2] (fuente: preparado por el autor)

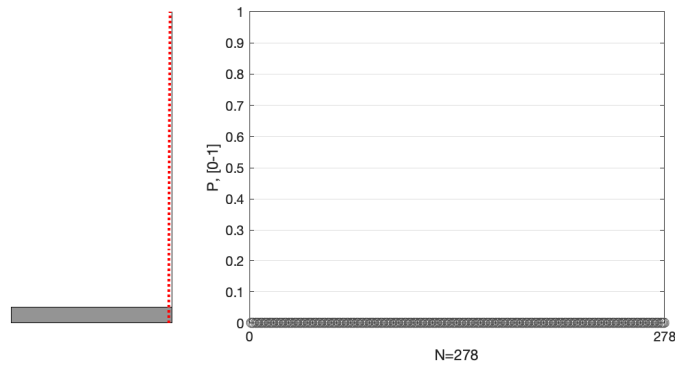


Fig. B-430 Probabilidades de pertenencia al estado de daño de Colapso para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0. 0.141g, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +X, pga = 0.194 g

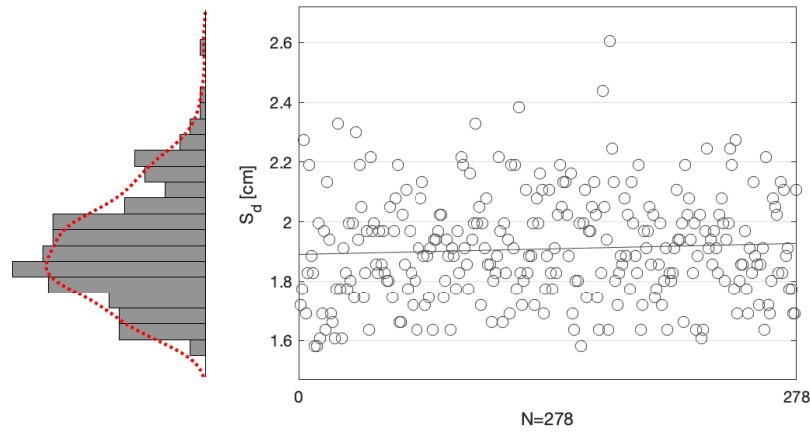


Fig. B-431 Desplazamientos espectrales, S_d , de los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.194g, N2] (fuente: preparado por el autor)

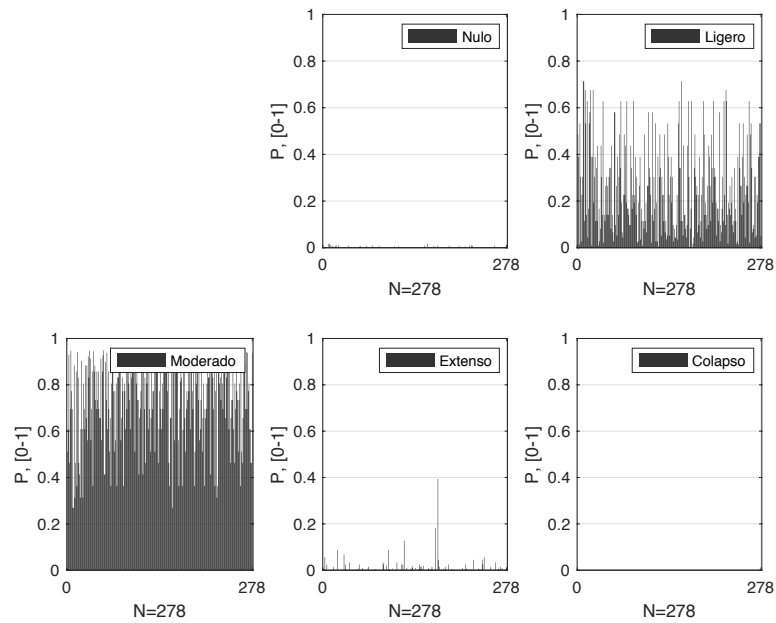


Fig. B-432 Probabilidades de pertenencia de los estados de daño nulo y no nulos para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.194g, N2] (fuente: preparado por el autor)

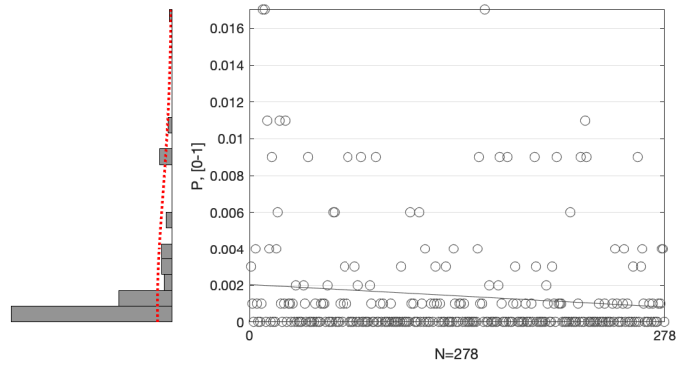


Fig. B-433 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Nulo para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.194g, N2] (fuente: preparado por el autor)

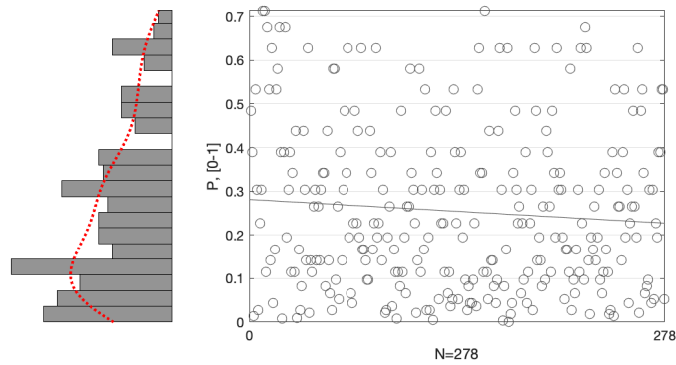


Fig. B-434 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Ligero para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.194g, N2] (fuente: preparado por el autor)

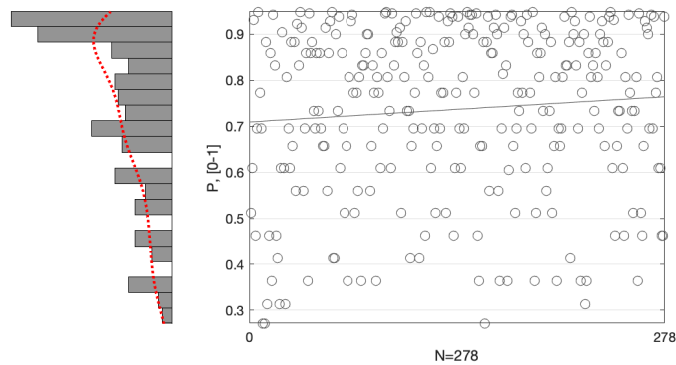


Fig. B-435 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Moderado para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.194g, N2] (fuente: preparado por el autor)

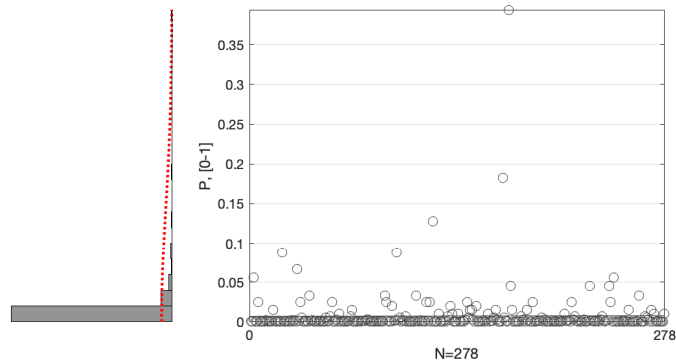


Fig. B-436 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Severo para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.194g, N2] (fuente: preparado por el autor)

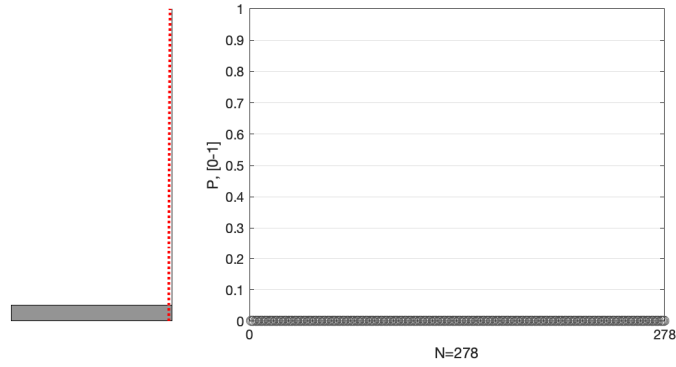


Fig. B-437 Probabilidades de pertenencia al estado de daño de Colapso para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.194g, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +Y, pga = 0. 194 g

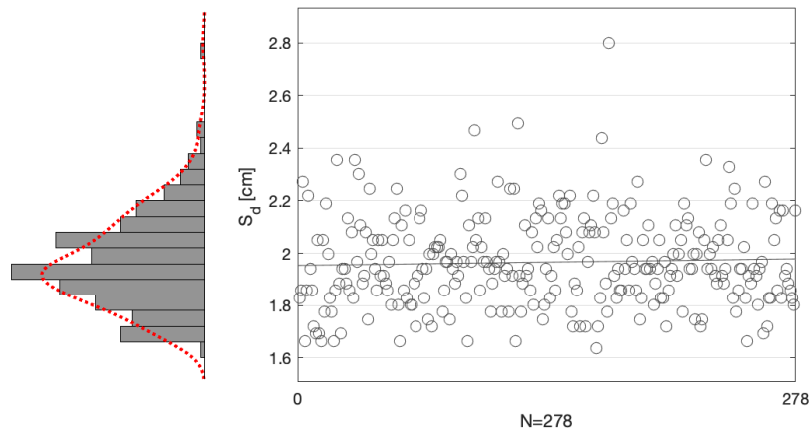


Fig. B-438 Desplazamientos espectrales, S_d , de los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0.194g, N2] (fuente: preparado por el autor)

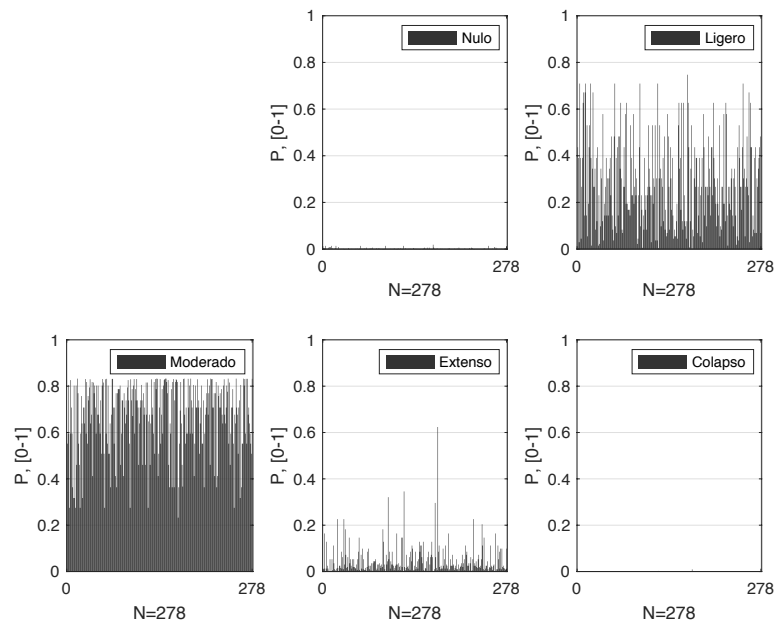


Fig. B-439 Probabilidades de pertenencia de los estados de daño nulo y no nulos para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0.194g, N2] (fuente: preparado por el autor)

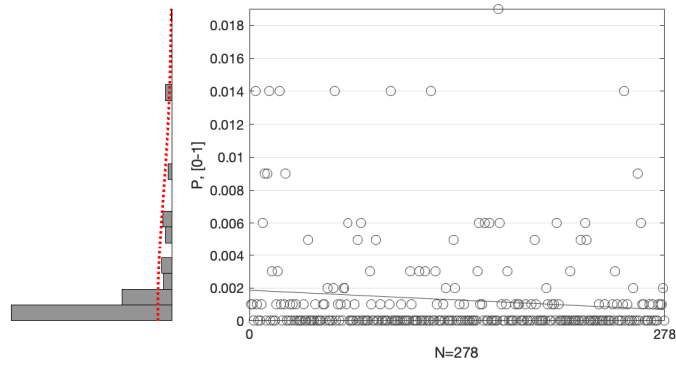


Fig. B-440 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Nulo para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0.194g, N2] (fuente: preparado por el autor)

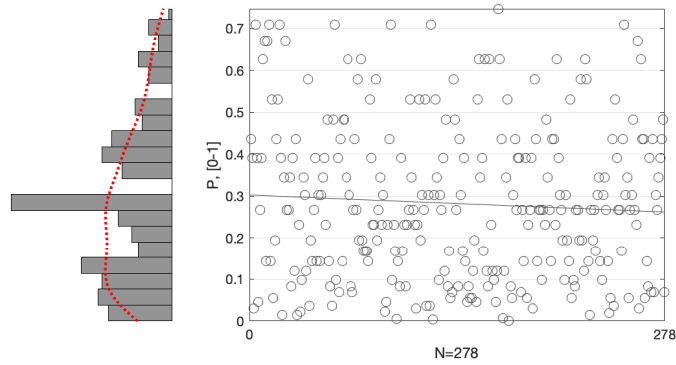


Fig. B-441 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Ligero para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0. 0. 194g, N2] (fuente: preparado por el autor)

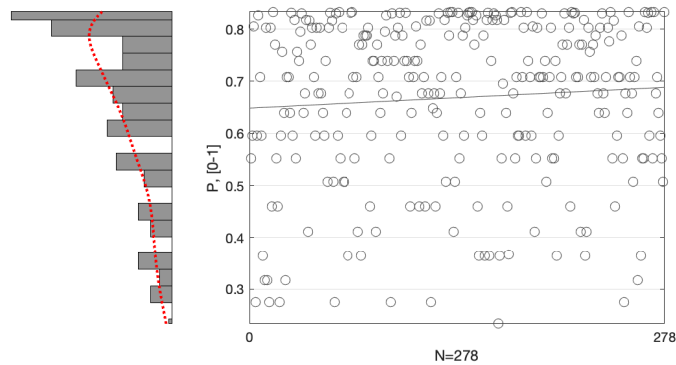


Fig. B-442 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Moderado para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0. 0. 194g, N2] (fuente: preparado por el autor)

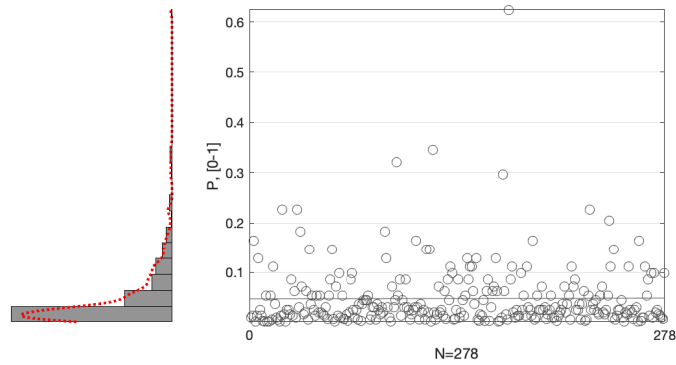


Fig. B-443 Probabilidades de pertenencia al estado de daño Extenso para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0. 0. 194g, N2] (fuente: preparado por el autor)

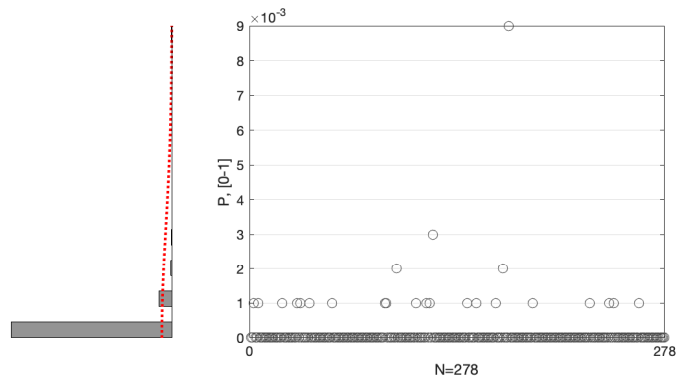


Fig. B-444 Probabilidades de pertenencia al estado de daño de Colapso para los puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0. 0. 194g, N2] (fuente: preparado por el autor)

B.7.3.4 Grado de daño medio

Dirección +X

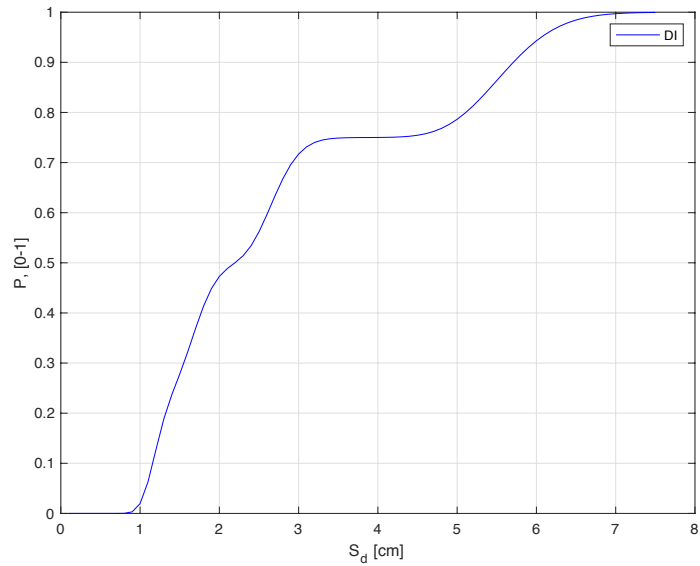


Fig. B-445 Curva del grado de daño medio (i.e. índice de Daño, DI) [Dir. +X, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +X, pga = 0.04 g

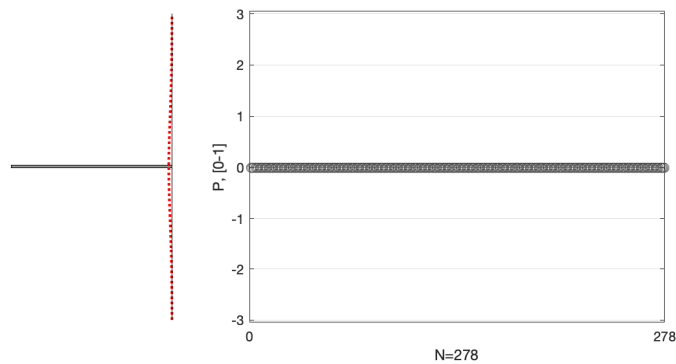


Fig. B-446 Probabilidades de ocurrencia de daño medio para los distintos puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, pga= 0.04g, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +X, $p_{ga} = 0.141 \text{ g}$

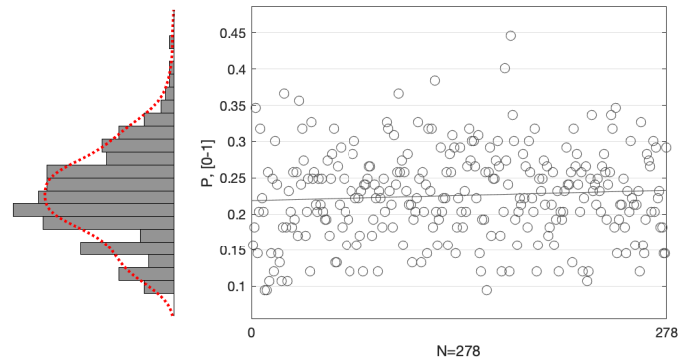


Fig. B-447 Probabilidades de ocurrencia de daño medio para los distintos puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, $p_{ga} = 0.141 \text{ g}$, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +X, $p_{ga} = 0.194 \text{ g}$

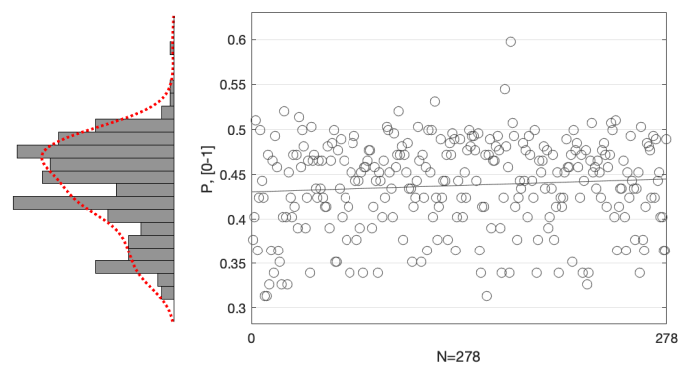


Fig. B-448 Probabilidades de ocurrencia de daño medio para los distintos puntos de desempeño obtenidos [Dir. +X, $p_{ga} = 0.194 \text{ g}$, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +Y

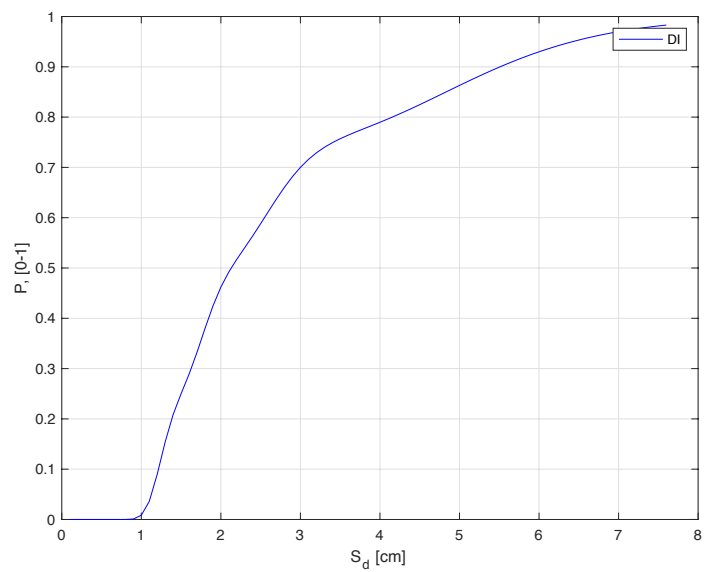


Fig. B-449 Curva del grado de daño medio (i.e. índice de Daño, DI) [Dir. +Y, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +Y, pga = 0.04 g

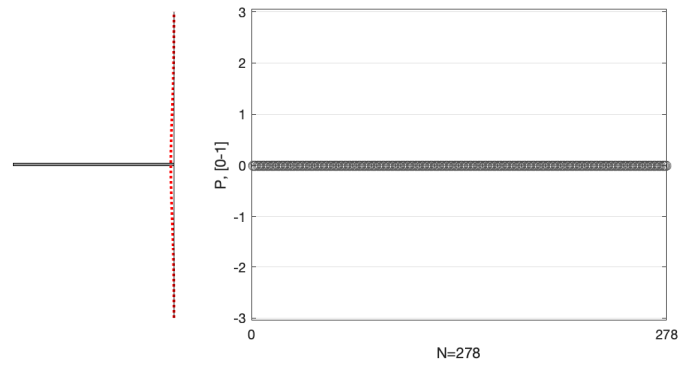


Fig. B-450 Probabilidades de ocurrencia de daño medio para los distintos puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0.04g, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +Y, pga = 0.141 g

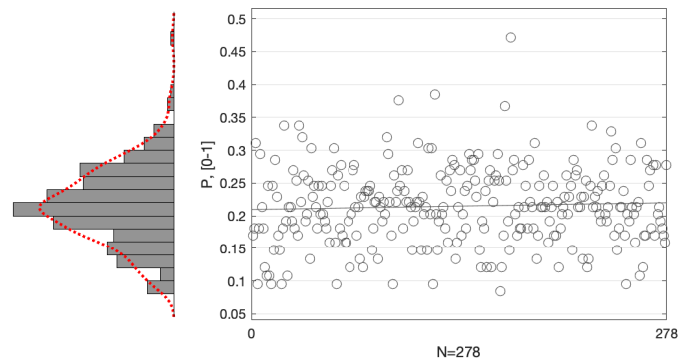


Fig. B-451 Probabilidades de ocurrencia de daño medio para los distintos puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0.141g, N2] (fuente: preparado por el autor)

Dirección +Y, pga = 0.194 g

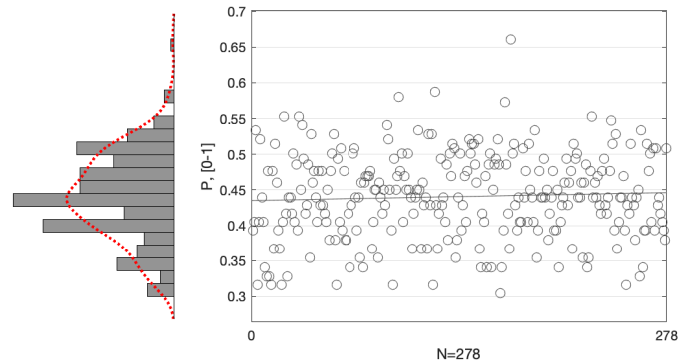


Fig. B-452 Probabilidades de ocurrencia de daño medio para los distintos puntos de desempeño obtenidos [Dir. +Y, pga= 0.194g, N2] (fuente: preparado por el autor)

C Códigos MATLAB

Este Anejo contiene la referencia a algunas de rutinas generadas por el autor, con la finalidad de agilizar el pre y post procesado de los diversos análisis y procedimientos llevados a cabo para la realización de este trabajo, las cuales se comparten como material anexo electrónico (archivos .m - MATLAB)

La modificación y uso de los diversos scripts, en lo que respecta al autor, es completamente libre, esperando que dichos códigos sean de utilidad.

C.1 convertCCtoADRS.m

Función que, a partir de un número n de curvas de capacidad, obtiene su representación en formato desplazamiento-aceleración (ADRS).

Como datos de entrada se requieren:

- *fileNumbers* – número de curvas a analizar
- *dRoof* – vector con los valores correspondientes a los desplazamientos en el techo de las n curvas a analizar.
- *vBase* – vector con los valores correspondientes a los cortantes basales en el techo de las n curvas a analizar.
- *yieldPoint* – vector con los valores correspondientes a los desplazamientos del punto de fluencia previamente calculado para las n curvas a analizar.
- *gammas* – vector con los valores correspondientes al factor gamma de transformación obtenido a partir de las propiedades modales y masas del edificio de las n curvas a analizar.
- *mStars* – vector con los valores correspondientes a las masas equivalentes del edificio de las n curvas a analizar

Como resultado, se obtienen los desplazamientos (Sd_ADRS) y aceleraciones (Sa_ADRS) espectrales del sistema para cada una de las n curvas analizadas, así como el punto de fluencia en formato desplazamiento-aceleración (*yieldPoint_ADRS*).

C.2 obtainBilinearN2.m

Función que, a partir de un número n de curvas de capacidad, permite obtener las representaciones bilineales de acuerdo a lo establecido en el procedimiento N2 (Fajfar & Gašperšič, 1996; Fajfar, 2000).

Como datos de entrada se requieren:

- *fileNumbers* – número de curvas a analizar
- *Sd* – vector con los valores correspondientes a los desplazamientos espectrales obtenidos para n curvas a analizar.
- *Sa* – vector con los valores correspondientes a las aceleraciones espectrales obtenidas para n curvas a analizar.

Como resultado, se obtiene los vectores con los valores correspondientes al punto de fluencia (*yieldingPointN2_Bilinear*), al punto último (*ultimatePointN2_Bilinear*) y al punto de fluencia al cruce del 60% (*yieldingPointN2_Bilinear_60pct*).

C.3 defineDamageStates_RISKUE

Función que, a partir de un número n de curvas de capacidad, define sus estados de daños correspondientes, de acuerdo a la definición de los mismos en el documento RISK-UE (Giovinazzi & Lagomarsino, 2002; Mouroux *et al.*, 2004).

Como datos de entrada se requieren:

- *fileNumbers* – número de curvas a analizar
- *dy* – vector con los valores correspondientes al punto de fluencia de las n curvas a analizar.
- *du* – vector con los valores correspondientes al punto último de las n curvas a analizar.

Como resultado, se obtiene la matriz con los cuatro estados de daño definidos (*DamageStates*).

C.4 probability.m

Función que, a partir de un número n de curvas de capacidad, permite obtener las probabilidades asociadas a cada uno de los estados de daño de la totalidad de puntos (*desplazamientos espectrales*) que se consideran para ello.

Como datos de entrada se requieren:

- *fileNumbers* – número de curvas a analizar
- *excProb* – matriz con los valores correspondientes a la probabilidad de excedencia agregada de los cuatro estados de daño, obtenidas a partir de las curvas de fragilidad para n curvas a analizar.

Como resultado, se obtiene la matriz con las probabilidades (*probDS*) para cada uno de los cuatro estados de daño definidos. Adicionalmente, se obtiene la matriz con el cociente de daño (*damageRatio*), definido a partir del costo de reparación sobre el costo de reemplazo estructural y no estructural, y la matriz con su valor acumulado (*cumMeanDamageRatio*) para todos los puntos analizados de cada una n de las curvas.

C.5 damageIndex.m

Función que, a partir de un número n de curvas de capacidad, permite obtener los valores de daño medio o índice de daño (*DI*).

Como datos de entrada se requieren:

- *fileNumbers* – número de curvas a analizar
- *probDS* – matriz con los valores correspondientes a la probabilidad de cada uno de los cuatro estados de daño para n curvas a analizar.

Como resultado, se obtiene el vector con las probabilidades de ocurrencia del índice de daño (*DI*).

