



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
ESCOLA TÈCNICA SUPERIOR D'ENGINYERS
DE CAMINS, CANALS I PORTS



Departamento de Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica

Programa de doctorado: Ingeniería Sísmica y Dinámica Estructural

Vulnerabilidad y daño sísmico de edificios porticados de hormigón armado, irregulares en planta, en Barquisimeto - Venezuela

Tesis Doctoral presentada para optar al grado de Doctor por la
Universitat Politècnica de Catalunya

Autor:

Reyes Indira Herrera González

Director:

Dr. Alex H. Barbat

Co-Director:

Dr. Lluís G. Pujades

BARCELONA, DICIEMBRE DE 2016

Esta Tesis ha sido financiada por una beca de la Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado (UCLA), Venezuela. Este trabajo ha sido también parcialmente financiado por el Fondo Nacional de Ciencia Tecnología e Innovación adscrito al MPPCTI y el Consejo de Desarrollo Científico Humanístico y Tecnológico de la UCLA, a través de los proyectos de referencias FONACIT No 2011001332 y CDCHT No 002-DIC-2013.



Acta de calificación de tesis doctoral

Curso académico: 2016 / 2017

Nombre y apellidos

Reyes Indira Herrera González

Programa de doctorado

Ingeniería Sísmica y Dinámica Estructural

Unidad estructural responsable del programa

Departamento de Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica

Resolución del Tribunal

Reunido el Tribunal designado a tal efecto, el doctorando / la doctoranda expone el tema de la su tesis doctoral titulada: “*Vulnerabilidad y daño sísmico de edificios porticados de hormigón armado, irregulares en planta, en Barquisimeto – Venezuela*”

Acabada la lectura y después de dar respuesta a las cuestiones formuladas por los miembros titulares del tribunal, éste otorga la calificación:

- NO APTO
- APROBADO
- NOTABLE
- SOBRESALIENTE

(Nombre, apellidos y firma) Presidente/a		(Nombre, apellidos y firma) Secretario/a	
(Nombre, apellidos y firma) Vocal	(Nombre, apellidos y firma) Vocal	(Nombre, apellidos y firma) Vocal	(Nombre, apellidos y firma) Vocal

_____, _____ de _____ de _____

El resultado del escrutinio de los votos emitidos por los miembros titulares del tribunal, efectuado por la Escuela de Doctorado, a instancia de la Comisión de Doctorado de la UPC, otorga la MENCIÓN CUM LAUDE:

- SÍ
- NO

(Nombre, apellidos y firma)	(Nombre, apellidos y firma)
Presidente de la Comisión Permanente de la Escuela de Doctorado	Secretario de la Comisión Permanente de la Escuela de Doctorado

Barcelona a _____ de _____ de _____

DEDICATORIA

A mi Dios Jehová,

A mis padres Yolanda y Juan,

A mi esposo Richard,

A mi hija Valeria Stephania, el amor de mi vida

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi Dios Jehová, por la oportunidad de la vida.

Quiero expresar un sincero agradecimiento a mis Directores de tesis Profesores Alex Barbat y Lluís Pujades, por sus orientaciones y consejos en este trabajo.

Agradecer a mis compañeros de trabajo Ronald Ugel por su ánimo, consejos y ayuda en esta etapa y a Hermenegildo Rodríguez por su compañía en esta aventura académica.

Mi agradecimiento a la oficina del Departamento de Ingeniería Estructural, del Decanato de Ingeniería Civil de la Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado, por su disponibilidad en las gestiones administrativas en la UCLA durante este doctorado.

También quiero agradecer a la oficina del Departamento de Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica de la Universitat Politècnica de Catalunya, por su disponibilidad en las gestiones administrativas en la UPC durante este doctorado.

De la misma forma, expresar mis agradecimientos a las instituciones que financiaron este Doctorado y Tesis Doctoral, Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado Barquisimeto Venezuela (UCLA) mediante el Consejo de Desarrollo Científico Humanístico y Tecnológico (CDCHT), y la Dirección de Formación de Personal Académico (DFPA), al Observatorio Nacional de ciencia y Tecnología (ONCTI), y por supuesto a la Institución donde se desarrolló este doctorado Universitat Politècnica de Catalunya, BarcelonaTech (UPC).

RESUMEN

En este trabajo se analiza la respuesta sísmica, la vulnerabilidad y el daño esperado en edificios residenciales de hormigón armado con irregularidad estructural en planta. Esta irregularidad se debe principalmente a entrantes o salientes en las esquinas y, también, a diafragmas discontinuos causados por esta geometría irregular. Además, también se estudia la influencia de plantas simétricas en el comportamiento sísmico de la estructura. Esta clase de edificaciones y de configuraciones son típicas de la zona metropolitana de Barquisimeto en Venezuela, donde la peligrosidad sísmica es importante. Vale la pena mencionar que los edificios fueron proyectados de acuerdo a la norma sismorresistente del país. Así, se propone un método específico de evaluación, basado en los análisis estático y dinámico clásicos, pero teniendo en cuenta la tridimensionalidad del problema. El estudio estático, incluye el análisis de la rigidez inicial, de curvas de capacidad, así como de desplazamientos globales y relativos. Los resultados del análisis estático se contrastan con los del análisis dinámico incremental, para el que se usan tres acelerogramas registrados y tres artificiales. Los seis acelerogramas se han seleccionado de forma que son compatibles con las características geológicas y geotécnicas de la zona de estudio y, al mismo tiempo, sus espectros de respuesta son compatibles con el espectro de diseño de la norma para una zona de peligrosidad sísmica alta. Para el análisis de la tridimensionalidad del problema las acciones sísmicas se aplican de acuerdo a combinaciones adecuadas según los dos ejes X e Y, promediando los resultados para obtener la curva envolvente IDA, los desplazamientos en función de la aceleración pico, la torsión y la rotación de los ejes resistentes verticales, hallándose una buena correlación entre los resultados del análisis estático y los del dinámico. Por otra parte, el análisis de fragilidad y evaluación del daño esperado se realiza mediante la conocida propuesta del proyecto Risk-UE y mediante una propuesta novedosa de modelo de fragilidad y de índice de daño basada en la curva de capacidad. Los principales resultados obtenidos indican lo siguiente: i) los momentos torsionales en ejes resistentes adyacentes a las áreas entrantes son mayores que en ejes resistentes lejanos; ii) en edificios con aberturas internas, la torsión aumenta en estructuras asimétricas y disminuye en modelos con simetría en planta; iii) el daño esperado es mayor en edificios irregulares; para estos edificios y para las acciones sísmicas esperadas en la zona son esperables estados de daño entre *Severo* y *Colapso*, siendo significativamente menores los esperados para edificios regulares. Finalmente, una conclusión importante de este trabajo es la conveniencia de revisar la consideración de la irregularidad en la norma sísmica del país, dado que, edificios con una irregularidad de diseño permitida, muestran una respuesta sísmica insatisfactoria.

ABSTRACT

In this research, the seismic response, the vulnerability and the expected damage in reinforced concrete residential buildings, with irregular plants, are analyzed. This irregularity is mainly due to inbound and outbound areas at the corners and also to discontinuous diaphragms caused by this irregular geometry. Moreover, the influence that symmetries on several plants may have on the seismic performance is also studied. It is worth noting that these buildings and configurations are typical of the metropolitan area of Barquisimeto in Venezuela, where seismic hazard is important. Besides, buildings were projected according to the seismic code of the country. Thus, a specific evaluation method is proposed. The method is based on classical static and dynamic analyses, but it also takes into account the three-dimensionality of the problem. The static study includes the analysis of initial stiffness, capacity curves and global and relative displacements. The results of the static analysis are then checked with the ones coming from the incremental dynamic analysis. For the dynamic analyses three recorded and three artificial accelerograms are used. Those six accelerograms were selected in such a way that they are compatible with the geological and geotechnical characteristics of the area and also their response spectra are compatible with the design spectrum provided in the seismic code for high seismic hazard zones. In order to take into account the three-dimensionality of the problem, accelerograms are applied to the two X and Y axes according to suitable combinations, thus obtaining the IDA envelope curve, the displacements as functions of the peak ground acceleration and the torsion and rotation of the vertical resistant axes. A fair good correlation between the results of the static and dynamic analyses is obtained. On the other hand, a fragility analysis and the assessment of expected damage is performed by means of the well-known method proposed in the framework of the Risk-UE project and also by means of a recently proposed new fragility model and new damage index based on the capacity curve. The obtained results are as follow: i) the torsional moments in resistant axes nearby to the inbound areas are greater than the ones in distant resistant axes; (ii) in buildings with internal gaps, torsion increases in asymmetric structures and it decreases in models with symmetry in plant; (iii) expected damage is greater in irregular buildings; for these buildings and for the likely seismic actions in the area, damage states between *Severe* and *Collapse* damage states are expected; however, the expected damage states for regular buildings are significantly lower. Finally, an important conclusion of this work is that it is worthwhile to review the irregularity conditions in the seismic code, since buildings with an allowable design irregularity show an unsatisfactory seismic behavior.

ÍNDICE

ÍNDICE.....	i
ÍNDICE DE FIGURAS	v
ÍNDICE DE TABLAS	xi
Capítulo 1: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Motivación.....	6
1.3 Objetivos.....	6
1.3.1 Objetivo general	7
1.3.2 Objetivos específicos de la investigación.....	7
1.4 Alcance del estudio.....	8
1.5 Metodología.....	8
1.6 Contenido del documento	12
1.7 Principales aportes del trabajo.....	13
Capítulo 2: ASPECTOS CONCEPTUALES	15
2.1 Introducción.....	15
2.2 Vulnerabilidad	17
2.3 Métodos de evaluación de la vulnerabilidad sísmica	20
2.3.1 Clasificación de los métodos según Corsanego y Petrini (1990)	20
2.3.2 Clasificación según Dolce et al. (1994).....	23
2.3.3 Clasificación según Calvi et al. (2006).....	24
2.4 El análisis inelástico	27
2.4.1 Caracterización de la demanda sísmica	28
2.4.2 Métodos de análisis sísmicos no lineales	41
2.5 Evaluación del desempeño sísmico.	58
2.5.1 Punto de capacidad por demanda (punto de desempeño).....	58
2.5.2 Método N2.....	59
2.5.3 Método del espectro de capacidad (CSM).....	61
2.5.4 Método del coeficiente de desplazamiento (MCD).....	63
2.5.5 Extensión de nuevos procedimientos estáticos para la evaluación de estructuras irregulares.....	64
2.6 Verificación del desempeño sísmico.	67
2.7 Fragilidad y daño sísmico estructural en edificios	68

2.7.1	Los estados o umbrales de daño	69
2.7.2	Las curvas de fragilidad.....	70
2.7.3	Los índices de daño basados en análisis inelásticos	71
2.8	Resumen y discusión	76

Capítulo 3: CONFIGURACIONES ESTRUCTURALES EN PLANTA.....79

3.1	Introducción.....	79
3.2	Configuraciones de algunos edificios típicos en Venezuela	79
3.3	Consideraciones de torsión y flexibilidad del diafragma	82
3.3.1	Torsión.....	82
3.3.2	Flexibilidad del diafragma.....	85
3.4	Configuración y regularidad estructural	87
3.4.1	Irregularidad horizontal o en planta.....	89
3.5	Resumen	96

Capítulo 4: DEMANDA, CAPACIDAD Y DAÑO. ASPECTOS

METODOLOGICOS99

4.1	Introducción.....	99
4.2	Demanda.....	99
4.2.1	Fuentes de información	100
4.2.2	Acelerogramas seleccionados.....	100
4.2.3	Espectros de respuesta	102
4.3	La capacidad	104
4.3.1	Edificios existentes	105
4.3.2	Edificios modelados	110
4.3.3	Definición de variables de configuración estructural de los edificios.....	113
4.4	Propiedades del modelado de los edificios.....	114
4.4.1	Inelasticidad de los elementos	114
4.4.2	Materiales	115
4.4.3	Masa y cargas	117
4.4.4	Amortiguamiento.....	118
4.4.5	Modelo del diafragma.....	119
4.5	Análisis no lineal o inelástico aplicado.	119
4.5.1	Análisis estático no lineal para sistemas tridimensionales	119
4.5.2	Análisis dinámico no lineal para sistemas tridimensionales	120
4.5.3	Análisis dinámico de modos propios.....	122
4.6	Análisis del daño	122
4.7	Resumen y discusión	123

Capítulo 5: ESTUDIO DE LA CAPACIDAD SÍSMICA DE EDIFICIOS

IRREGULARES EN PLANTA.....125

5.1	Introducción.....	125
5.2	Propiedades dinámicas de los edificios estudiados	125
5.3	Curvas de capacidad de los edificios	127
5.3.1	Modelo ME2.....	127

5.3.2	Modelo ME5.....	129
5.4	Curvas de desplazamiento lateral de los edificios.....	131
5.4.1	Modelo ME2.....	131
5.4.2	Modelo ME5.....	134
5.5	Evaluación de la respuesta torsional en planta de los edificios existentes ...	138
5.5.1	Modelo ME2.....	138
5.5.2	Modelo ME5.....	141
5.6	Evaluación de la respuesta torsional de los modelos MR1, MU2 y MH3....	144
5.7	Resumen y discusión de los resultados.....	151
Capítulo 6: EL DAÑO EN EDIFICIOS IRREGULARES EN PLANTA		155
6.1	Introducción.....	155
6.2	Modelo de capacidad.....	155
6.3	Modelo de daño.....	158
6.4	Modelo de fragilidad.....	159
6.5	Estado o grado de daño medio.....	164
6.6	Índice de daño basado en el análisis dinámico.....	166
6.7	Resumen y discusión.....	168
Capítulo 7: CONCLUSIONES.....		171
7.1	Introducción.....	171
7.2	Capacidad y desplazamiento.....	171
7.3	Comportamiento torsional.....	173
7.4	Modelo de daño.....	175
7.5	Conclusiones generales.....	176
7.6	Líneas futuras de investigación.....	178
7.7	Otras propuestas.....	179
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		181
ANEXOS I. Irregularidad estructural		191
ANEXO II. Modelo ME8		199
ANEXOS III. Modelo paramétrico de daño y fragilidad de los sistemas ME2 y ME5.....		201

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	Sistemas principales de fallas en el centro y oeste de Venezuela, la falla de Boconó y falla de San Sebastián (Rocabado et al. 2007)	4
Figura 1.2	Componentes que incluyen un estudio de la vulnerabilidad sísmica.....	10
Figura 2.1	Pérdidas económicas directas por terremotos en los últimos 113 años (Daniell 2012).....	16
Figura 2.2	Técnicas de análisis de evaluación de la vulnerabilidad (Vicente et al. 2011).....	22
Figura 2.3	Clasificación de las técnicas de evaluación de la vulnerabilidad (Dolce et al. 1994).....	23
Figura 2.4	Componentes de una evaluación de riesgo sísmico y métodos	24
Figura 2.5	Componentes del cálculo de las curvas de fragilidad y matrices de probabilidad de daño con métodos analíticos (Dumova-Jovanoska 2004).....	26
Figura 2.6	Representación esquemática del uso de procedimientos de análisis inelásticos para estimar las fuerzas y deformaciones inelásticas (FEMA 2005).....	27
Figura 2.7	Componentes NS y EW del acelerograma del sismo de Tucacas-Venezuela ocurrido el 12/septiembre/2009.	29
Figura 2.8	Acelerograma sintético para Mw 6.4 y rp 179 km	31
Figura 2.9	Funciones envolventes para la generación de acelerogramas artificiales, envolvente a) Trapezoidal, b) Sagaroni y Hart (Seismosoft 2013a).....	32
Figura 2.10	Mapa de iso-períodos de las ciudades de Barquisimeto y Cabudare (Rocabado et al. 2007).....	34
Figura 2.11	Mapa de microzonas sísmica de Barquisimeto, Cabudare-Venezuela, ajustado según Morales (2012)	35
Figura 2.12	Mapa de zonificación sísmica de Venezuela (COVENIN 1756 2001).....	36
Figura 2.13	a) Espectros de respuesta elástica, 5% amortiguada, propuestos en la norma sísmica venezolana, para los diferentes tipos de suelo	40
Figura 2.14	Métodos de análisis aplicados en ingeniería sísmica (Elnashai y DiSarno 2008).....	42
Figura 2.15	Curvas de respuesta del análisis pushover convencional, adaptativo y dinámico para diferentes modelos estructurales para sistemas regulares (derecha) e irregulares (izquierda).....	46
Figura 2.16	Curva de capacidad (V vs δ) del análisis pushover convencional.	47
Figura 2.17	Curva bilineal (Izquierda) ATC-40, (Derecha) N2 de EC8, para el edificios de dos pisos.....	48
Figura 2.18	Curva de respuesta para un sistema estructural sujetos a cargas horizontales, con variaciones de la rigidez.....	49
Figura 2.19	Curva de capacidad para un sistema estructural sujeto a cargas horizontales	51
Figura 2.20	Concentraciones de esfuerzos causadas por pequeñas (izquierda) y grandes (derecha) aberturas en los diafragmas horizontales (Elnashai y DiSarno 2008)	52

Figura 2.21	Curva de respuesta para el comportamiento de la ductilidad de una estructura frágil (A) y dúctil (B) (Elnashai y DiSarno 2008)	53
Figura 2.22	Relación entre el factor de reserva de resistencia Ω , ductilidad μ y factor de reducción de respuesta R (Mwafy y Elnashai 2002)	54
Figura 2.23	Curvas de desplazamientos IDA (izquierda) para diferentes registros sísmicos y curvas envolvente de capacidad IDA y Pushover PA (derecha) (Vargas 2013).....	58
Figura 2.24	Esquema para estimar el punto de desempeño (Lantada 2007).....	59
Figura 2.25	a) Modelo MDOF de un edificio, b) Espectro de respuesta elástico de aceleración	60
Figura 2.26	Rango de períodos cortos.....	60
Figura 2.27	Rango de períodos largos.....	60
Figura 2.28	Ejemplo varios patrones de fuerza y su factor de participación modal y coeficiente de masa modal (ATC 1996)	63
Figura 2.29	Umbral de los estados de daño propuestos en proyecto Risk-UE	70
Figura 2.30	Esquema de curvas de fragilidad que contiene 4 estados de daño diferentes al grado de daño nulo. A partir de las curvas de fragilidad se obtienen las matrices de probabilidad de daño para un desplazamiento espectral S_d	71
Figura 2.31	Comparación de las funciones de Estado por daño medio de Risk-UE, índice de Park y Ang y el índice basado en capacidad de Pujades et al. (2015)	76
Figura 3.1	a) Edificios y urbanismo en Caracas, b) Vivienda típicas en diferentes ciudades, c) Edificio de vivienda multifamiliar Lecherias, d) Edificios modernos en construcción Barquisimeto.....	80
Figura 3.2	Edificios de hormigón armado con irregularidad geométrica en planta ubicados en Barquisimeto-Venezuela: a) Vivienda de 2 niveles, b) Edificio de 5 niveles, c) Edificio de 10 niveles.....	81
Figura 3.3	Edificios en Mérida-Venezuela con: a) con planta baja libre y b) con discontinuidad en planta	82
Figura 3.4	Torsión en planta rectangular causada por una distribución descompensada de rigidez de los elementos portantes (Alonso 2012).....	84
Figura 3.5	Representación de la torsión accidental (Alonso 2012).....	85
Figura 3.6	Flexibilidad del diafragma según ASCE/SEI 7-10 (ASCE 2010)	86
Figura 3.7	Esquema de la configuración estructural de los edificios (Adaptado de Alonso 2012)	88
Figura 3.8	Plano del edificio Miramar-Cumana, a) Plano de primera planta del edificio, b) Edificio antes del terremoto de Cariaco 1997 y c) Después del terremoto de Cariaco 1997 (Hernández et al. 2007)	91
Figura 3.9	Hospital con daños severos en terremoto de Chile en 2010 (http://gallery.usgs.gov/).....	92
Figura 3.10	Irregularidad geométrica horizontal o en plantas, a) Por excentricidad extrema o torsión, b) Por esquina entrante, c) Por plantas con esquinas entrantes, d) Por discontinuidad en el diafragma.....	94
Figura 3.11	Irregularidad por discontinuidad fuera del plano resistente vertical (ASCE 2010).....	94

Figura 3.12	Modelo analítico y comportamiento modal de un edificio con sistemas portantes no paralelos (Izquierda), edificio en la Ciudad de México con daños estructurales y no estructurales por el terremoto de 1985 (Alonso 2012)	95
Figura 3.13	Irregularidad por relación de esbeltez en planta	96
Figura 4.1	Acelerogramas artificiales a) 1 y b) 2 de la Tabla 4.1. Los espectros son compatibles con el espectro de diseño del suelo S2.	102
Figura 4.2	Comparación de espectros de respuesta híbridos basados en reales y artificiales compatibles con el suelo S2.....	103
Figura 4.3	Comparación de espectros de desplazamiento del grupo de seis sismos con el del suelo S2.....	103
Figura 4.4	Espectro de respuesta medio en formato Sa-Sd.....	104
Figura 4.5	Localización de los casos de estudio en la ciudad de Barquisimeto, Venezuela..	105
Figura 4.6	Esquema en 3D del modelo de edificio o vivienda de dos niveles (ME2)	106
Figura 4.7	Planta y alzado de edificio de dos niveles (dimensiones en m).....	106
Figura 4.8	a) sección transversal de columnas y b) sección transversal típica de vigas Nivel 1	107
Figura 4.9	Esquema en 3D del modelo de edificio de cinco niveles (ME5).....	108
Figura 4.10	Planta y alzado de edificio de cinco niveles (dimensiones en m).....	108
Figura 4.11	a) sección de columnas y b) sección típica de vigas Nivel 1	109
Figura 4.12	Esquema en 3D del modelo de edificio de ocho niveles (ME8).....	109
Figura 4.13	Planta y alzado de edificio de ocho niveles (dimensiones en m).....	110
Figura 4.14	Esquema 3D de los modelos virtuales de las estructuras de seis niveles, a) regular, sin entrante: MR1, b) con un entrante: MU2, c) con dos entrantes: MH3.....	111
Figura 4.15	Planta de los edificios de seis niveles, a) sin entrantes: MR1, b) con un entrante: MU2, c) con dos entrantes: MH3 y d) alzado de los mismos (dimensiones en m).....	112
Figura 4.16	Discretización de una sección típica del modelo de fibras de hormigón armado (adaptado de Seismosoft 2004).....	114
Figura 4.17	Subdivisión del elemento estructural en cuatro partes.....	115
Figura 4.18	Modelo constitutivo y propiedades del hormigón armado según Mander et al. (1988).....	116
Figura 4.19	Modelo constitutivo y propiedades del acero de refuerzo según Menegotto y Pinto (1973)	117
Figura 5.1	Deformada del modelo ME2 para los primeros modos de vibración en a) traslacional, b) traslacional y torsión, c) torsional	127
Figura 5.2	Deformada del modelo ME5 para los primeros modos de vibración en a) traslacional, b) torsional, c) traslacional	127
Figura 5.3	Curvas de capacidad en dirección a) X y b) Y, del edificio o modelo ME2.....	128
Figura 5.4	Curvas de capacidad en dirección a) X y b) Y, del edificio o modelo ME5.....	130
Figura 5.5	Desplazamientos globales de cubierta del análisis estático en a) Dirección X, b) Dirección Y del edificio o modelo (ME2).....	132

Figura 5.6	Desplazamientos relativos en (%) del análisis estático en a) Dirección X, b) Dirección Y del edificio o modelo (ME2).....	132
Figura 5.7	Desplazamientos globales de cubierta del análisis dinámico en a) Dirección X, b) Dirección Y del edificio o modelo (ME2).....	133
Figura 5.8	Media de desplazamientos relativos en (%) en términos de PGA del análisis dinámico en a) Dirección X, b) Dirección Y del edificio o modelo (ME2)	133
Figura 5.9	Desplazamientos globales de cubierta del análisis estático en a) Dirección X, b) Dirección Y del edificio o modelo (ME5).....	135
Figura 5.10	Desplazamientos relativos máximos en (%) del análisis estático en a) Dirección X, b) Dirección Y del edificio o modelo (ME5)	136
Figura 5.11	Desplazamientos globales de cubierta del análisis dinámico en a) Dirección X, b) Dirección Y del edificio o modelo (ME5).....	136
Figura 5.12	Media de desplazamientos relativos en (%) en términos de PGA del análisis dinámico en a) Dirección X, b) Dirección Y del edificio o modelo (ME5)	137
Figura 5.13	Momentos torsores en planta del modelo ME2 para los acelerogramas a) S1, b) S2, c) S3, d) S4, e) S5, f) S6.....	138
Figura 5.14	Rotaciones máximas en planta Nivel 1 para los acelerogramas a) S1, b) S2, c) S3, d) S4, e) S5, f) S6 del Modelo ME2	139
Figura 5.15	Representación en planta de los momentos torsores para un PGA de 0.30g del Modelo ME2.....	140
Figura 5.16	Comportamiento del momento torsor máximo por nivel para el ME2, para todos los acelerogramas.....	141
Figura 5.17	Momentos torsores en planta base para los acelerogramas a) S1, b) S2, c) S3, d) S4, e) S5, f) S6 del modelo (ME5)	142
Figura 5.18	Rotaciones máximas en planta nivel 1 para los acelerogramas a) S1, b) S2, c) S3, d) S4, e) S5, f) S6 del modelo (ME5).....	143
Figura 5.19	Media de los momentos maximos en planta del modelo ME5 para todos los acelerogramas	143
Figura 5.20	Comportamiento del momentos torsor máximos por nivel para el ME2, para todos los acelerogramas.....	144
Figura 5.21	Deformada del modelo MR1 para los tres primeros modos de vibración, a) Traslación Y, b) Traslación X, c) Torsión.....	145
Figura 5.22	Deformada del modelo MU2 para los tres primeros modos de vibración, a) Traslación X e Y, b) Traslación Y, c) Torsión	146
Figura 5.23	Deformada del modelo MH3 para los tres primeros modos de vibración, a) Traslación X, b) Traslación Y, c) Torsión	146
Figura 5.24	Curvas de capacidad estática y dinámica del modelo MR1 a) dirección X, b) dirección Y, para el MU2 c) dirección X, d) dirección Y y para el MH3 e) dirección X f) dirección Y	147
Figura 5.25	Momentos torsores en planta baja o base de las columna para: el MR1 y los acelerogramas a) S1, b) S3, c) S5, el MU2 y los acelerogramas d) S1, e) S3, f) S5 y el MH3 y los acelerogramas g) S1, h) S3, i) S5.....	148
Figura 5.26	Momentos de torsión del modelo MR1, para los acelerogramas y un PGA de 0.30g.	149

Figura 5.27	Momentos de torsión del modelo MU2, para los acelerogramas y un PGA de 0.30g.	149
Figura 5.28	Momentos de torsión del modelo MH3 para los acelerogramas y un PGA de 0.30g.	150
Figura 6.1	Curvas de capacidad de los valores originales, ajustado y mejorado de los modelos analíticos estructurales MR1, MU2, MH3	156
Figura 6.2	Formas bilineales de las curvas de capacidad de los valores originales y ajustados de los modelos analíticos estructurales MR1, MU2, MH3	157
Figura 6.3	Curvas normalizadas de índice de daño DIN, capacidad no lineal, degradación de energía, rigidez tangente y secante de los MR1, MU2, MH3.....	159
Figura 6.4	Umbrales de los estados de daño de los modelos analíticos estructurales MR1, MU2, MH3, de acuerdo al método Pujades et al. (2015)	160
Figura 6.5	Curvas de fragilidad de los modelos analíticos estructurales MR1, MU2, MH3, según Risk-UE.....	162
Figura 6.6	Curvas de fragilidad de los modelos analíticos estructurales MR1, MU2, MH3, según Pujades et al. (2015).....	162
Figura 6.7	Curvas de daño medio normalizado de los modelos analíticos estructurales MR1, MU2, MH3	164
Figura 6.8	Comparación de las curvas de daño medio normalizado para los modelos analíticos estructurales MR1, MU2, MH3 según IDcc y Risk-UE.....	165
Figura 6.9	Comparación entre las curvas de daño medio IDcc en función del PGA para la a) dirección X; b) dirección Y de los sistemas estructurales MR1 (regular), MU2 (un entrante), MH3 (dos entrantes)	167
Figura 6.10	Curvas de índice de daño medio IDcc en función del PGA considerando variables probabilistas desviación estándar, media y promedio. a) Modelo MR1X, b) Modelo MH3Y	168

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1	Grandes terremotos ocurridos en el centro y occidente de Venezuela	3
Tabla 2.1	Aceleración horizontal para cada zona de Venezuela.....	37
Tabla 2.2	Tipos de suelo, forma espectral y factor de corrección (ϕ) correspondiente	38
Tabla 2.3	Factor de importancia de acuerdo al uso de la edificación	41
Tabla 2.4	Valores límite de la deriva máxima de entrepiso para el estado de daño y niveles de desempeño (SEAOC 1995).....	68
Tabla 2.5	Umbral de los estados de daño proyecto Risk-UE	70
Tabla 2.6	Rango de valores de los índices de Park y Ang para cinco estados de daño	73
Tabla 2.7	Rango de valores de los índices de Park y Ang para cuatro estados de daño	73
Tabla 3.1	Criterios para la irregularidad torsional extrema	90
Tabla 3.2	Criterios para las esquinas entrantes.....	92
Tabla 3.3	Criterios para la discontinuidad en el diafragma	93
Tabla 3.4	Comparación de criterios para la relación de esbeltez en planta	96
Tabla 4.1	Propiedades de acelerogramas sintéticos y artificiales compatibles con el espectro de suelo S2.....	101
Tabla 4.2	Parámetros sísmicos de la zona 5 según COVENIN 1756 (2001).....	102
Tabla 4.3	Geometría de las secciones, edificio de dos niveles.	107
Tabla 4.4	Geometría de las secciones del edificio de cinco niveles, para el primer nivel....	109
Tabla 4.5	Geometría de las secciones del edificio de ocho niveles, nivel 1 eje E y eje 5	110
Tabla 4.6	Geometría de las secciones de los edificios de seis niveles MR1, MU2, MH3, nivel 1 eje A.....	112
Tabla 4.7	Relación aspecto de longitudes y de áreas de entrantes para las configuraciones analizadas	113
Tabla 4.8	Cargas permanente de servicio para las estructuras analizadas	117
Tabla 4.9	Peso y centro de masas de las estructuras analizadas	118
Tabla 5.1	Periodos y porcentajes de masas modales efectivas del ME2 y ME5	126
Tabla 5.2	Valores de la curva media del análisis pushover estático adaptativo del edificio (ME2)	128
Tabla 5.3	Valores de la curva de capacidad media del análisis dinámico incremental IDA del ME2	129
Tabla 5.4	Envoltura media del análisis pushover estático adaptativo (APA) del edificio o modelo ME5	130
Tabla 5.5	Valores de la curva envoltura media del análisis dinámico incremental IDA del ME5	131
Tabla 5.6	Media de desplazamientos globales y relativos del análisis APA (ME2).....	132
Tabla 5.7	Media de desplazamientos relativos del análisis IDA en términos de PGA (ME2).....	134

Tabla 5.8	Media de desplazamientos globales y relativos del análisis APA (ME5).....	135
Tabla 5.9	Media de desplazamientos relativos del análisis IDA en términos de PGA (ME5) para diferentes intensidades	137
Tabla 5.10	Comportamiento de los momentos y rotaciones en planta ME2	139
Tabla 5.11	Comportamiento de los momentos y rotaciones en planta ME5	142
Tabla 5.12	Propiedades dinámicas de los modos propios de los modelos MR1, MU2, MH3.....	145
Tabla 6.1	Parámetros independientes de las curvas de capacidad	156
Tabla 6.2	Parámetros de las curvas de capacidad bilineales de las curvas originales y mejoradas.....	158
Tabla 6.3	Umbrales de los estados de daño de Risk-UE y del método Pujades et al. (2015).....	161
Tabla 6.4	Comparación de los parámetros de las curvas de capacidad de los sistemas estructurales según Risk-UE y Pujades et al. (2015)	163
Tabla 6.5	Tabla de valores del índice de daño del modelo de capacidad de Pujades et al. (2015) en base al índice de Park y Ang para cuatro estados de daño	167