

**VULNERABILIDAD Y RIESGO SÍSMICO DE  
EDIFICIOS. APLICACIÓN A ENTORNOS  
URBANOS EN ZONAS DE AMENAZA ALTA Y  
MODERADA.**

**TESIS DOCTORAL**

**RICARDO LEÓN BONETT DÍAZ**

**DIRECTORES:**

**DR. LUÍS G. PUJADES BENEIT**

**DR. JORGE E. HURTADO GÓMEZ**

---

**BARCELONA, 17 DE OCTUBRE DE 2003**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DEL TERRENO, CARTOGRÁFICA Y GEOFÍSICA**

**ETS DE INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS DE BARCELONA  
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUÑA**



TESIS DOCTORAL PARA OPTAR  
AL GRADO DE DOCTOR EN INGENIERÍA  
RICARDO LEÓN BONETT DÍAZ

DIRECTORES:  
DR. LUÍS G. PUJADES BENEIT  
DR. JORGE E. HURTADO GÓMEZ

**TRIBUNAL DE TESIS**

**PRESIDENTE**  
(Nombre y apellidos)

---

**SECRETARIO**  
(Nombre y apellidos)

---

**VOCAL 1**  
(Nombre y apellidos)

---

**VOCAL 2**  
(Nombre y apellidos)

---

**VOCAL 3**  
(Nombre y apellidos)

---

**CALIFICACIÓN:** \_\_\_\_\_

Barcelona, a \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de 2003.



*A la memoria de mi hermano.  
A mi esposa y a mis padres.*



## RESUMEN

Las nuevas tendencias en la Ingeniería Sísmica, reconocen la necesidad de evaluar la vulnerabilidad de los edificios en entornos urbanos. De hecho, es allí donde se concentra la mayor parte de la población mundial, las infraestructuras y los servicios. Así pues, el comportamiento de los edificios ante la ocurrencia de sismos intensos, es el responsable de evitar verdaderas catástrofes sísmicas, como las que hasta la fecha, continúan dejando pérdidas económicas millonarias y un número inaceptable de víctimas mortales. De lo anterior, se deduce la motivación del presente trabajo, que ha sido estructurado en tres grandes bloques. En el primero de ellos, se han analizado los aspectos conceptuales y metodológicos relacionados con la evaluación de la vulnerabilidad y el riesgo sísmico de edificios en entornos urbanos. En la segunda parte, se ha analizado detalladamente, el comportamiento sísmico esperado de los edificios aperticados de hormigón armado, situados en la ciudad de Manizales (Colombia), caracterizada por una amenaza sísmica alta. El desarrollo y aplicación de métodos y técnicas avanzadas de análisis del desempeño, vulnerabilidad y fragilidad de las edificaciones, ha permitido establecer, de forma cuantitativa, la importancia que, para la minoración del riesgo sísmico, tiene el diseño y construcción sismo-resistente. La tercera parte, se ha dedicado al análisis del riesgo sísmico en la ciudad de Barcelona (España), que por hallarse situada en un entorno de amenaza sísmica entre moderada y baja, no ha incorporado en sus costumbres y hábitos constructivos, ninguna conciencia ni precaución sísmica, lo que ha resultado en una elevada vulnerabilidad y fragilidad de sus edificios y, por lo tanto, en un considerable riesgo.

Las metodologías utilizadas en este trabajo, han sido desarrolladas a partir de consideraciones estocásticas, que permiten tener en cuenta, de forma natural, las incertidumbres en la acción dinámica, en las características materiales y estructurales de los edificios y, en consecuencia, en los resultados obtenidos. Diversos análisis de sensibilidad han permitido constatar, una vez más, la importancia de una correcta y ajustada definición de la acción sísmica, que, en caso de ser posible, debe fundamentarse en acelerogramas registrados en la zona de estudio. La ciudad de Manizales en Colombia, ha sido uno de los escenarios que ha permitido una aplicación clara de la importancia de preferir espectros compatibles con acciones reales sobre otros espectros generales que promedian una gran cantidad de información y que, finalmente, pueden llegar a no ser representativas de ninguna, como es el caso incluso, de los espectros de respuesta simplificados que proveen las normativas y códigos de diseño sísmico. Esta elevada sensibilidad de los resultados a las características de la acción ha quedado también patente en el otro escenario elegido, Barcelona.

Los resultados obtenidos demuestran cómo la adopción de unas medidas sencillas de protección sísmica, pueden llegar a disminuir hasta en un grado el daño esperado, mientras que la ausencia de memoria sísmica, la despreocupación y abandono de unas precauciones mínimas, lo puede incrementar en un grado.



## AGRADECIMIENTOS

*La oportunidad que nos brinda la vida de expresar nuestro agradecimiento, a cada una de aquellas personas que hacen posible la culminación y el alcance de las metas propuestas, es la mejor recompensa al trabajo realizado.*

En primer lugar, quiero agradecer muy especialmente a los profesores Luís G. Pujades Beneit y Jorge Eduardo Hurtado Gómez, por introducirme en el mundo de la investigación. Ha sido un verdadero placer trabajar con personas que combinan perfectamente el rigor y la exigencia de la academia, con la calidad humana que requiere, la dura tarea de enseñar. La realización de este trabajo ha sido posible gracias a su apoyo constante e incansable y a la orientación recibida durante estos 5 años. Por todo esto, cuentan con mi eterno agradecimiento y mi más sincera admiración.

Agradezco, también de forma especial, al profesor Alex Barbat, el seguimiento del trabajo, su disponibilidad y las expertas orientaciones que, entre otros aspectos, me han ayudado a dimensionar de forma adecuada, los modelos de los edificios de mampostería de l'Eixample.

A los Doctores Xavier Goula y Antonio Roca y a la Doctora Teresa Susagna, del Instituto Cartográfico de Cataluña, debo agradecerles, las interesantes discusiones sobre la amenaza sísmica que es razonable esperar en la ciudad. Los trabajos de Janira Irizarri, han sido fundamentales para dimensionarla correctamente y para analizar el desempeño sísmico de los edificios de Barcelona.

Con la profesora Nieves Lantada, que ha sido también una compañera en la aventura del doctorado, he compartido largas horas de discusión y análisis. Su conocimiento y habilidad en el tratamiento geográfico de la información han sido fundamentales en la elaboración de los mapas de riesgo. Gracias por todo ello y por tu amistad.

De igual forma, quiero expresar mi más sincero agradecimiento a las siguientes personas e instituciones, que contribuyeron a la culminación de esta tesis:

- Al Ministerio de Educación, Cultura y Deporte de España, por su apoyo económico a través de la beca de Formación de Personal Investigador, que me permitió realizar mis estudios de doctorado y las estancias en Centros Internacionales de Investigación.
- A José Ignacio Restrepo y Athol Carr de la Universidad de Canterbury, Sergio Alcocer y Juan Guillermo Arias de la Universidad Nacional Autónoma de México y Sergio Lagomarsino, Andrea Penna y Alessandro Galasco de la Universidad de Génova.

- A mis compañeros de la Universidad Politécnica de Cataluña, en especial a, Rosangel Moreno, Consuelo Soberón, Francisco Zárata, José Antonio Rodríguez y Albert Marqués.
- Al personal administrativo de la Universidad Politécnica de Cataluña por su amabilidad y colaboración con todas las tareas administrativas.
- A todos mis amigos en Barcelona por su compañía durante estos 5 años.
- A la empresa Española COTCA S.A por la información suministrada para el desarrollo de los modelos de l'Eixample.

Finalmente, quiero agradecer a mi esposa Catalina, por estar siempre a mi lado. Tu sabes muy bien, que tu apoyo y sacrificio, han sido fundamentales para la terminación de este trabajo. A mis padres Farly y Luz Elena, por todo el cariño, confianza y apoyo que me han brindado siempre, y a mi hermano Carlos, porque siempre confió en este proyecto y me motivó con su fuerza y valentía a seguir adelante.

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por los proyectos de investigación:

Análisis de riesgo sísmico: peligrosidad, efectos de suelo y vulnerabilidad. (AMB98-0558), Riesgo sísmico: aspectos sismológicos y de Ingeniería Sísmica (REN2000-1740-C05-001 RIES), An advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to different European towns (RISK-UE). EESD-ENV-99-2 (JO 1999/C330/10) y Desarrollo y aplicación de procedimientos avanzados para la obtención de escenarios de riesgo sísmico (REN2001-24184-C04-01 RIES).

# Indice

<b>1</b>	<b>Introducción</b>	<b>1</b>
1.1	Objetivos y alcance del estudio . . . . .	2
1.1.1	Motivación . . . . .	2
1.1.2	Objetivos . . . . .	3
1.1.3	Alcance . . . . .	4
1.2	Contenido de la memoria . . . . .	5
<b>I</b>	<b>Conceptos y Métodos</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>Vulnerabilidad y daño sísmicos: concepto y evaluación</b>	<b>9</b>
2.1	Introducción . . . . .	9
2.2	Metodologías para el análisis de vulnerabilidad sísmica . . . . .	11
2.2.1	Clasificación de acuerdo al tipo de resultado . . . . .	11
2.2.2	Clasificación de acuerdo a los datos, método y resultados . . .	17
2.3	Daño sísmico . . . . .	19
2.3.1	Introducción . . . . .	19
2.3.2	Elementos propensos al daño . . . . .	20
2.3.3	Clasificación de los indicadores de daño . . . . .	21
2.3.4	Representación del daño . . . . .	22
2.3.5	Estados discretos de daño . . . . .	23
2.3.6	Indicadores e índices de daño . . . . .	25
2.3.7	Relaciones entre los estados discretos y los índices de daño . .	43
2.4	Resumen y discusión . . . . .	45
<b>3</b>	<b>Desempeño sísmico de edificios: binomio capacidad-demanda</b>	<b>47</b>
3.1	Introducción . . . . .	47
3.2	Marco conceptual . . . . .	49
3.3	Niveles de desempeño . . . . .	51
3.3.1	Propuesta del Comité VISION 2000 . . . . .	51
3.3.2	Propuesta del ATC-40 . . . . .	52
3.4	Movimientos sísmicos de diseño . . . . .	56

3.4.1	Propuesta del comité VISION 2000 . . . . .	56
3.4.2	Propuesta del ATC-40 . . . . .	57
3.5	Objetivos del diseño por desempeño . . . . .	58
3.5.1	Propuesta del comité VISION 2000 . . . . .	58
3.5.2	Propuesta del ATC-40 . . . . .	59
3.6	Capacidad estructural . . . . .	60
3.6.1	Análisis estático no lineal (Análisis "Pushover") . . . . .	60
3.6.2	Representación bilineal de la curva de capacidad . . . . .	62
3.7	Demanda sísmica . . . . .	65
3.8	Métodos para estimar el punto de desempeño . . . . .	67
3.8.1	Método del Espectro de Capacidad (MEC) . . . . .	67
3.8.2	Método del Coeficiente de Desplazamiento (MCD) . . . . .	77
3.8.3	Método N2 (MN2) . . . . .	83
3.9	Verificación del desempeño . . . . .	93
3.9.1	Limites de los niveles de desempeño . . . . .	94
3.9.2	Ejemplo numérico . . . . .	95
3.10	Resumen y discusión . . . . .	96
<b>4</b>	<b>Curvas de fragilidad y matrices de probabilidad de daño</b>	<b>99</b>
4.1	Introducción . . . . .	99
4.2	Métodos basados en observaciones de campo . . . . .	100
4.3	Métodos experimentales . . . . .	102
4.4	Métodos a partir de la opinión de expertos . . . . .	103
4.5	Métodos analíticos . . . . .	105
4.5.1	Métodos probabilistas . . . . .	106
4.5.2	Método expedito . . . . .	125
4.6	Resumen y discusión . . . . .	128
<b>5</b>	<b>Comportamiento sísmico de edificios aporticados de hormigón armado</b>	<b>131</b>
5.1	Introducción . . . . .	131
5.2	Propiedades mecánicas . . . . .	132
5.2.1	Hormigón sin confinar . . . . .	132
5.2.2	Hormigón confinado . . . . .	135
5.2.3	Relaciones esfuerzo-deformación del acero . . . . .	139
5.3	Comportamiento bajo cargas cíclicas y dinámicas . . . . .	143
5.3.1	Miembros bajo flexión uniaxial sin fuerza axial . . . . .	144
5.3.2	Miembros bajo flexión uniaxial con fuerza axial . . . . .	149
5.3.3	Miembros bajo flexión y fuerza axial con esfuerzos de cortante elevados . . . . .	151
5.4	Modelos analíticos del comportamiento histerético . . . . .	153
5.4.1	Modelos bilineales . . . . .	154

5.4.2	Modelo de rigidez degradante de Clough y variantes . . . . .	154
5.4.3	Modelo de Takeda y variantes . . . . .	156
5.4.4	Modelo Q-Hyst . . . . .	158
5.4.5	Modelo de Roufaiel y Meyer y sus variantes . . . . .	158
5.4.6	Modelo de Park et al. y variantes . . . . .	160
5.5	Comportamiento sísmico de conexiones viga-columna . . . . .	161
5.5.1	Comportamiento de conexiones interiores . . . . .	165
5.5.2	Comportamiento de conexiones exteriores . . . . .	168
5.6	Comportamiento de los edificios de hormigón armado durante sismos	171
5.6.1	Observaciones del concepto estructural . . . . .	172
5.6.2	Observaciones sobre las proporciones y el detallado estructural	179
5.7	Resumen y discusión . . . . .	183
<b>6</b>	<b>Comportamiento sísmicos de edificios de mampostería no reforzada</b>	<b>185</b>
6.1	Introducción . . . . .	185
6.2	Materiales de la mampostería . . . . .	187
6.2.1	Unidades de mampostería . . . . .	188
6.2.2	Mortero . . . . .	194
6.3	Comportamiento mecánico de la mampostería en compresión . . . . .	196
6.3.1	Relación esfuerzo - deformación . . . . .	199
6.3.2	Módulo de elasticidad de la mampostería $E_m$ . . . . .	200
6.4	Comportamiento de la mampostería a cortante . . . . .	202
6.4.1	Modos de fallo . . . . .	202
6.4.2	Resistencia a cortante de la mampostería . . . . .	205
6.4.3	Factores que afectan la resistencia de adherencia . . . . .	207
6.4.4	Propiedades deformacionales . . . . .	207
6.5	Comportamiento de la mampostería a tracción . . . . .	208
6.5.1	Modos de fallo . . . . .	208
6.6	Comportamiento de la mampostería a flexo-compresión y cortante . . . . .	208
6.6.1	Modos de fallo . . . . .	210
6.7	Comportamiento bajo cargas cíclicas y dinámicas en el plano . . . . .	212
6.7.1	Modos de fallo . . . . .	213
6.8	Principales mecanismos de fallo . . . . .	214
6.8.1	Fallos fuera del plano . . . . .	214
6.8.2	Fallos en el plano . . . . .	215
6.8.3	Fallos de anclaje o conexión . . . . .	217
6.8.4	Flexibilidad de los diafragmas y resistencia . . . . .	219
6.8.5	Daños por impacto . . . . .	220
6.8.6	Fallos de fundación y deformaciones permanentes . . . . .	220
6.8.7	Fallos inducidos por configuración . . . . .	222
6.8.8	Amplificaciones de suelos blandos . . . . .	222
6.8.9	Calidad del mortero y de los ladrillos . . . . .	223

6.8.10	Edad de la construcción . . . . .	223
6.9	Resumen y discusión . . . . .	224
<b>II Aplicación a Manizales (Colombia)</b>		<b>227</b>
<b>7</b>	<b>La acción sísmica</b>	<b>229</b>
7.1	Introducción . . . . .	229
7.2	La ciudad: datos generales . . . . .	230
7.3	La ciudad: descripción geológica . . . . .	231
7.4	La ciudad: amenaza sísmica . . . . .	232
7.4.1	Tectónica y sismicidad . . . . .	232
7.4.2	Mapas de amenaza sísmica . . . . .	239
7.4.3	Modelo estocástico . . . . .	242
7.5	Demanda sísmica . . . . .	256
7.5.1	Espectros elásticos de diseño de las normativas Colombianas . . . . .	256
7.5.2	Modelo estocástico . . . . .	260
7.6	Resumen y discusión . . . . .	262
<b>8</b>	<b>Capacidad de los edificios aporricados de hormigón armado</b>	<b>265</b>
8.1	Introducción . . . . .	265
8.2	Descripción y evolución de las construcciones . . . . .	266
8.2.1	Período contemporáneo: 1983-1997 . . . . .	266
8.2.2	Período Pre-moderno: 1849-1983 . . . . .	267
8.3	Definición de los modelos . . . . .	272
8.3.1	Parámetros de análisis y diseño . . . . .	276
8.4	Capacidad sísmica . . . . .	276
8.5	Resumen y discusión . . . . .	279
<b>9</b>	<b>Fragilidad, desempeño y daño</b>	<b>281</b>
9.1	Introducción . . . . .	281
9.2	Desempeño sísmico . . . . .	282
9.2.1	Desempeño para la demanda de la normativas de diseño Colombianas . . . . .	282
9.2.2	Desempeño para la demanda correspondiente al modelo estocástico . . . . .	287
9.2.3	Influencia de la forma del espectro de demanda . . . . .	289
9.2.4	Caracterización de los estados de daño . . . . .	293
9.2.5	Verificación de los objetivos de desempeño . . . . .	296
9.3	Vulnerabilidad sísmica . . . . .	297
9.3.1	Incertidumbre en los parámetros . . . . .	298
9.3.2	Análisis dinámico no lineal . . . . .	301

9.3.3	Función de distribución de probabilidad para la deriva máxima entre piso . . . . .	303
9.3.4	Curvas de Fragilidad y matrices de probabilidad de daño . . .	307
9.4	Análisis comparativo de las metodologías empleadas . . . . .	313
9.5	Escenarios de daño . . . . .	315
9.6	Resumen y discusión . . . . .	317
<b>III Aplicación a Barcelona (España)</b>		<b>321</b>
<b>10</b>	<b>La acción sísmica</b>	<b>323</b>
10.1	Introducción . . . . .	323
10.2	La ciudad . . . . .	323
10.2.1	Geología . . . . .	324
10.3	La amenaza . . . . .	327
10.3.1	Tectónica y sismicidad . . . . .	327
10.3.2	Caracterización de la acción sísmica . . . . .	329
10.4	Demanda sísmica . . . . .	332
10.5	Resumen y Discusión . . . . .	341
<b>11</b>	<b>Capacidad de los edificios de mampostería no reforzada</b>	<b>343</b>
11.1	Introducción . . . . .	343
11.2	Evolución y descripción de las construcciones . . . . .	344
11.3	Definición de los modelos . . . . .	347
11.3.1	Modelos estructurales . . . . .	348
11.3.2	Modelo para los edificios de l'Eixample . . . . .	353
11.3.3	Incertidumbre en los materiales . . . . .	354
11.4	Capacidad sísmica . . . . .	357
11.5	Resumen y discusión . . . . .	361
<b>12</b>	<b>Fragilidad, desempeño y daño</b>	<b>363</b>
12.1	Introducción . . . . .	363
12.2	Desempeño sísmico . . . . .	364
12.2.1	Puntos de desempeño . . . . .	364
12.2.2	Límites de los estados de daño . . . . .	369
12.2.3	Verificación de los objetivos de desempeño . . . . .	374
12.3	Vulnerabilidad sísmica . . . . .	376
12.3.1	Parámetros de la función de distribución lognormal . . . . .	377
12.3.2	Curvas de Fragilidad y matrices de probabilidad de daño . . .	380
12.4	Análisis de sensibilidad de la fragilidad y el desempeño sísmicos . . .	384
12.4.1	Sensibilidad a las incertidumbres en los parámetros estructurales	385
12.4.2	Sensibilidad a los parámetros de los espectros suavizados de respuesta . . . . .	387

12.4.3	Sensibilidad a los umbrales de daño . . . . .	389
12.5	Escenarios de daño sísmico . . . . .	392
12.6	Resumen y discusión . . . . .	407
<b>13</b>	<b>Conclusiones y Recomendaciones</b>	<b>409</b>
13.1	Conclusiones . . . . .	410
13.1.1	Conceptos y métodos . . . . .	410
13.1.2	Aplicación a zonas de sismicidad alta . . . . .	414
13.1.3	Aplicación a zonas de sismicidad moderada . . . . .	416
13.1.4	Las expresiones simplificadas utilizadas para la generación de mapas de daño . . . . .	419
13.2	Recomendaciones y futuros trabajos de investigación . . . . .	419
	<b>Referencias</b>	<b>421</b>
<b>A</b>	<b>Lista de variables</b>	<b>445</b>
A.1	Capítulo 2 . . . . .	445
A.2	Capítulo 3 . . . . .	448
A.3	Capítulo 4 . . . . .	451
A.4	Capítulo 5 . . . . .	451
A.5	Capítulo 6 . . . . .	451
A.6	Capítulo 7 . . . . .	453
A.7	Capítulo 8 . . . . .	454
A.8	Capítulo 9 . . . . .	455
A.9	Capítulo 10 . . . . .	456
A.10	Capítulo 11 . . . . .	457
A.11	Capítulo 12 . . . . .	459
<b>B</b>	<b>Polinomios normales</b>	<b>461</b>
B.1	Introducción . . . . .	461
B.2	Definición del modelo . . . . .	461
B.3	Aplicación del modelo para el ajuste de curvas de fragilidad . . . . .	462
<b>C</b>	<b>Modelo de Clough y Penzien</b>	<b>465</b>

# Lista de Figuras

2.1	Parámetros que intervienen en el modelo propuesto por Banon et al. (1981) para evaluar el daño. . . . .	27
2.2	Parámetros del modelo de daño propuesto por Bracci et al. (1989). . . . .	28
2.3	Parámetros del modelo de daño sísmico propuesto por Stephens y Yao (1987). . . . .	31
2.4	Modelo de daño propuesto por Wang y Shah (1987). . . . .	32
2.5	Parámetros del modelo de daño sísmico propuesto por Chung et al. (1987): $M_u$ , $M_y$ y $M_f$ son los momentos último, de cedencia y de fallo, respectivamente, $\phi_y$ y $\phi_f$ son las curvaturas de cedencia y de fallo y $\Delta M_i$ es la pérdida de resistencia debida a un ciclo de carga. . . . .	32
2.6	Parámetros del modelo de daño sísmico propuesto por Kratzig et al. (1989). . . . .	35
2.7	Parámetros del modelo de daño de Bracci et al. (1989). . . . .	37
2.8	Modelo simplificado de daño propuesto por Bracci et al. (1989). . . . .	37
2.9	Variación del período fundamental de la estructura durante un sismo. . . . .	41
3.1	Diagrama del marco conceptual de la "ingeniería basada en el desempeño" (SEAOC Vision 2000 Committee, 1995) . . . . .	50
3.2	Ejemplo de una curva de capacidad (cortante en la base vs desplazamiento nivel superior). . . . .	61
3.3	Esquema del procedimiento utilizado para el análisis pushover. . . . .	62
3.4	Representación bilineal de la curva de capacidad - Procedimiento empleado en FEMA 273. . . . .	64
3.5	Espectros elásticos de aceleración y desplazamiento. . . . .	66
3.6	Espectro elástico de respuesta en formato AD. . . . .	66
3.7	Representación bilineal del espectro de capacidad - MEC. . . . .	69
3.8	Obtención del amortiguamiento equivalente para obtener el espectro de demanda reducido. . . . .	70
3.9	Espectro de respuesta reducido (ATC,1996). . . . .	72
3.10	Determinación del punto de desempeño de prueba del MEC a partir de la aproximación de desplazamientos iguales. . . . .	74
3.11	Punto de desempeño obtenido a partir del valor supuesto - MEC. . . . .	75
3.12	Planta típica y pórticos analizados para el edificio de HA de 5 niveles. . . . .	76

3.13	Espectro elástico de diseño para la ciudad de Manizales - (CCCSR-84).	76
3.14	Curva de capacidad del edificio de HA de 5 niveles - MEC. . . . .	77
3.15	Punto de desempeño obtenido a partir del valor supuesto para el edificio de HA - MEC. . . . .	78
3.16	Punto de desempeño del edificio de HA de 5 niveles - MEC. . . . .	78
3.17	Representación bilineal de la curva de capacidad - MCD. . . . .	79
3.18	Representación bilineal de la curva de capacidad del edificio de HA de 5 niveles. Procedimiento utilizado en FEMA-273 (1996). . . . .	82
3.19	Espectros de demanda reducidos para diferentes factores de ductilidad constantes, en formato AD. . . . .	85
3.20	Curva de capacidad y representación bilineal de un sistema de 1 GDL.	88
3.21	Espectros de demanda elástico e inelástico y espectro de capacidad. .	89
3.22	Curva de capacidad del edificio de HA de 5 niveles obtenida por el método N2. . . . .	91
3.23	Representación bilineal de la curva de capacidad del edificio de HA de 5 niveles - MN2. . . . .	92
3.24	Representación gráfica del punto de desempeño del edificio de HA de 5 niveles - MN2. . . . .	93
4.1	Curvas de fragilidad obtenidas a partir de los daños observados en el sismo de Kobe (Yamaguchi y Yamazaki, 2000). . . . .	102
4.2	Ejemplo de curvas de fragilidad experimentales para un desplazamiento relativo máximo de 1 pulgada (Chong y Soong, 2000). . . . .	104
4.3	Ejemplo de curvas de fragilidad obtenidas a partir de la opinión de expertos para un edificio de mampostería de elevación media (Anagnos et al., 1995). <i>df</i> es el factor de daño o "damage factor". . . . .	106
4.4	Esquema de los pasos requeridos para la generación de curvas de fragilidad y matrices de probabilidad de daño correspondientes, desde una óptica probabilista. . . . .	108
4.5	Representación del concepto de la deriva entre piso. . . . .	111
4.6	Acelerograma sintético generado a partir del espectro de diseño para la ciudad de Armenia (Quindío - Colombia) (Bonett et al., 2002). . .	113
4.7	Esquema general de los módulos de los programas PROMENVIR y STAC. . . . .	118
4.8	Ilustración del módulo para la definición de las variables aleatorias independientes. . . . .	119
4.9	Ilustración de la definición del proceso de ejecución (cuadro de análisis).120	
4.10	Funciones de distribución de probabilidad de no excedencia de una deriva entre piso. Aplicación a un edificio de HA de 5 niveles. . . . .	122

4.11	Procedimiento para la obtención de las curvas de fragilidad a partir de las $fdp$ y de los umbrales de los estados discretos de daño. a) Para el umbral de daño severo ( $\delta_{\max} = 0.9\%$ ) se leen las $fdp$ 's correspondientes a cada $PGA$ . b) $FD_i$ se obtiene como $1 - fdp_i$ y se ajusta la curva de probabilidad a los puntos obtenidos. . . . .	123
4.12	Curvas de fragilidad. Edificio de HA de 5 niveles. . . . .	124
4.13	Esquema para la generación de curvas de fragilidad de forma expedita. El método se basa en un análisis pushover de la estructura. a) Espectro de capacidad de la estructura. b) Curva de fragilidad para el estado de daño moderado. . . . .	127
4.14	Curvas de fragilidad de un edificio de 6 niveles de mampostería no reforzada localizado en la ciudad de Barcelona-España (Bonett et al., 2003). . . . .	128
5.1	Curvas esfuerzo-deformación para cilindros de hormigón cargados a compresión uniaxial (Paulay y Priestley, 1992). Ver explicación en el texto. . . . .	133
5.2	Curva esfuerzo-deformación para cilindros de hormigón con carga cíclica de compresión axial repetida de alta intensidad (Park y Paulay, 1994). . . . .	134
5.3	Curvas carga axial-deformación para prismas cuadrados de hormigón con distinto contenido de estribos cuadrados (Park y Paulay, 1994). Ver explicación en el texto. . . . .	136
5.4	Curva esfuerzo-deformación para el hormigón armado confinado por aros rectangulares - Modelo propuesto por Kent y Park (1971). Ver explicación en el texto. . . . .	137
5.5	Representación gráfica de la relación esfuerzo-deformación del acero de refuerzo. Ver explicación en el texto. . . . .	139
5.6	Curvas esfuerzo-deformación para el acero de refuerzo (Paulay y Priestley, 1992). Ver explicación en el texto. . . . .	140
5.7	Ciclos de histéresis del acero de refuerzo (Paulay y Priestley, 1992). Ver explicación en el texto. . . . .	141
5.8	Idealizaciones de la curva esfuerzo-deformación del acero (ver explicación en el texto). . . . .	142
5.9	Curvas de histerésis esfuerzo-deformación de una viga de hormigón doblemente reforzada sometida a carga cíclica (Park et al., 1972). . .	143
5.10	Curvas esfuerzo-deformación para un elemento de hormigón sin confinar sometido a carga cíclica (Sinha et al., 1964). . . . .	144
5.11	Relaciones esfuerzo-deformación de vigas con sección transversal y distribución del refuerzo simétrico (ACI Committee 318, 1989). (Ver explicación en el texto). . . . .	145

5.12	Relaciones fuerza-deformación en vigas con sección transversal simétrica y distribución del refuerzo asimétrico (ACI Committee 318, 1989). . .	148
5.13	Curvas momento-rotación de columnas sometidas a flexión uniaxial y bajo carga axial constante (Wakabayashi, 1986). Ver comentarios en el texto. . . . .	150
5.14	Ciclos de histéresis cortante-deformación de elementos de hormigón armado que fallan a cortante, bajo carga axial constante y flexión asimétrica cíclica (Ver explicación en el texto). . . . .	152
5.15	Modelo elasto-plástico (Ver explicación en el texto). . . . .	155
5.16	Modelo hysterético de Clough y Johnston (ver explicación en el texto). . . . .	155
5.17	Modelo hysterético propuesto por Takeda et al. (1970). Ver explicación en el texto. . . . .	157
5.18	Modelo hysterético de Takeda modificado (Otani, 1974). Ver explicación en el texto. . . . .	157
5.19	Modelo hysterético Q-Hyst propuesto por Saiidi y Sozen (1979). Ver explicación en el texto. . . . .	159
5.20	Modelo hysterético propuesto por Roufaiel y Meyer (1987). Ver explicación en el texto. . . . .	159
5.21	Modelo hysterético propuesto por Chung et al. (1987). Ver explicación en el texto. . . . .	160
5.22	Efectos de los parámetros que rigen el modelo hysterético propuesto por Park et al. (1987) (Ver comentarios en el texto). . . . .	162
5.23	Variantes de los parámetros que rigen el modelo hysterético propuesto por Park et al. (Kunnath et al., 1992). Ver comentario en el texto. . . . .	163
5.24	Ensayos sobre conexiones interiores típicas, con refuerzo longitudinal continuo y ausencia de refuerzo a cortante en los nudos (Pessiki et al., 1990). Ver comentarios en el texto. . . . .	166
5.25	Ensayos sobre conexiones interiores típicas con refuerzo longitudinal discontinuo y ausencia de refuerzo a cortante en los nudos (Pessiki et al., 1990). Ver comentarios en el texto. . . . .	167
5.26	Ejemplos de mecanismos de daño para conexiones exteriores en forma de "T": (a) barras de la viga dobladas hacia fuera de la región del nudo; (b) y (c) barras de la viga dobladas en la región del nudo; (d) barras con ganchos en los extremos: "mecanismo de cuña del hormigón". (Calvi et al., 2002). . . . .	169
5.27	Ejemplo de la formación del mecanismo de cuña en conexiones exteriores tipo "codo" (Calvi et al., 2002). . . . .	169
5.28	Ensayos sobre conexiones exteriores típicas con refuerzo longitudinal discontinuo y ausencia de refuerzo a cortante en los nudos (Pessiki et al., 1990). . . . .	171
5.29	Mecanismo de fallo de piso débil - Olive View Hospital ( <a href="http://nisee.berkeley.edu">http://nisee.berkeley.edu</a> ). . . . .	173

5.30	Fallo explosivo de las columnas del primer nivel - Sismo de Imperial Valley, (15 de octubre de 1979) ( <a href="http://nisee.berkeley.edu">http://nisee.berkeley.edu</a> ). . . . .	174
5.31	Fallo de "columna corta" producido por la mampostería de relleno y las ventanas ( <a href="http://nisee.berkeley.edu">http://nisee.berkeley.edu</a> ). . . . .	175
5.32	Daños producidos por las derivas excesivas en la planta baja de dos edificios aporricados de hormigón armado - Sismo de Izmit, Turquía, 17 de Agosto de 1999 ( <a href="http://nisee.berkeley.edu">http://nisee.berkeley.edu</a> ). . . . .	176
5.33	Daño producido por el impacto entre dos edificios de hormigón armado adyacentes, durante el sismo de México, 28 de Julio de 1957 . . . . .	177
5.34	Fallo en las columnas por un mal confinamiento del acero de refuerzo transversal - Sismo de Turquía, 17 de agosto de 1999. . . . .	181
5.35	Daños producidos en edificios por el comportamiento no dúctil de las vigas de hormigón armado - Sismo de Turquía, 17 de Agosto de 1999 (Sezen et al., 2003). . . . .	182
6.1	Relaciones esfuerzo-deformación para el mortero, las unidades aisladas y los paneles mampostería (Paulay y Priestley, 1992). . . . .	192
6.2	Ensayo de un murete para determinar la resistencia a la compresión de la mampostería. . . . .	197
6.3	Relaciones esfuerzo-deformación para la mampostería en compresión (Hendry, 1990). Ver explicación en el texto. . . . .	200
6.4	Relaciones analíticas esfuerzo-deformación propuestas por diferentes autores (Crisafulli, 1997). . . . .	201
6.5	Agrietamiento escalonado diagonalmente producido por un fallo de fricción-cortante. . . . .	203
6.6	Agrietamiento de las unidades de mampostería producido por un fallo de tensión diagonal. . . . .	203
6.7	Fallo por agrietamiento vertical excesivo producido por esfuerzos de compresión. . . . .	204
6.8	Curva envolvente de acuerdo a la teoría de fallo propuesta por Mann y Müller (1982). Ver explicación en el texto. . . . .	206
6.9	Modos de fallo de la mampostería sujeto a tensión directa. Ver explicación en el texto. . . . .	209
6.10	Agrietamiento por fallo a cortante en muros de mampostería no reforzada. Ver explicación en el texto. . . . .	211
6.11	Agrietamiento por fallo a flexión de muros de mampostería no reforzada. Ver explicación en el texto. . . . .	212
6.12	Respuesta histerética de un muro de mampostería no reforzada (Irimies y Bia, 2000). Ver explicación en el texto. . . . .	213
6.13	Fallo fuera del plano de dos muros de un edificio médico dental en la ciudad de Santa Cruz - Sismo de Loma Prieta ( <a href="http://nisee.berkeley.edu">http://nisee.berkeley.edu</a> ). . . . .	215

6.14	Fallo de parapetos en una casa de dos niveles durante el sismo de Loma Prieta ( <a href="http://nisee.berkeley.edu">http://nisee.berkeley.edu</a> ). . . . .	216
6.15	Grietas formadas por tensión diagonal entre las ventanas de un edificio de mampostería no reforzada - Sismo de Whittier Narrows, California - Estados Unidos, 1 de Octubre de 1987 ( <a href="http://nisee.berkeley.edu">http://nisee.berkeley.edu</a> ). . .	217
6.16	Fallo por flexión de las columnas de mampostería no reforzada (" <i>piers</i> ") en la ciudad Santa Cruz - Sismo de Loma Prieta ( <a href="http://nisee.berkeley.edu">http://nisee.berkeley.edu</a> ). . .	218
6.17	Fallo de un muro en la parte superior de un edificio por mala conexión entre el techo y el muro - Sismo de Chile, 25 de Mayo de 1960 ( <a href="http://nisee.berkeley.edu">http://nisee.berkeley.edu</a> ). . . . .	219
6.18	Fallo de un muro de adobe debido a conexiones inadecuadas en las esquinas de los muros - Sismo de Guerrero - México, 14 de Septiembre de 1995 (Juárez et al., 2000). . . . .	220
6.19	Daños producidos por el martilleo entre dos edificios vecinos - Sismo de Loma Prieta ( <a href="http://nisee.berkeley.edu">http://nisee.berkeley.edu</a> ). . . . .	221
6.20	Fallo de una casa de mampostería no reforzada por licuefacción del suelo. Sismo Chimbote - Perú, 31 de Mayo de 1970 ( <a href="http://nisee.berkeley.edu">http://nisee.berkeley.edu</a> ). . . . .	221
6.21	Daño típico de columna corta - Universidad Nacional de Arequipa - Sismo de Arequipa - Perú, 23 de Junio de 2001 ( <a href="http://www.pucp.edu">http://www.pucp.edu</a> ) . . . . .	223
6.22	Colapso de un edificio de mampostería no reforzada en la ciudad de Armenia - Sismo del Quindío - Colombia. . . . .	224
7.1	Localización de la ciudad de Manizales (Colombia). . . . .	230
7.2	Panorámica de la ciudad de Manizales - Colombia. . . . .	231
7.3	Emplazamiento tectónico del noroccidente de Suramérica (Sarria, 1995). . . . .	232
7.4	Principales sistemas de fallamiento en Colombia (AIS, 1998). . . . .	234
7.5	Distribución de las fuentes que pueden generar sismos en la zona Andina Colombiana (Informe del Instituto Geofísico Universidad Javeriana, 2002). . . . .	235
7.6	Distribución de los trazos de las fuentes que pueden generar sismos en la zona Andina Colombiana (Informe del Instituto Geofísico Universidad Javeriana, 2002). . . . .	235
7.7	Tasas de excedencia por fuente y total para el caso de aceleración máxima en Manizales (Informe del Instituto Geofísico Universidad Javeriana, 2002). . . . .	236
7.8	Participación de las fuentes más relevantes en la amenaza sísmica de Manizales para un período de retorno $T_R$ de 475 años (Informe del Instituto Geofísico Universidad Javeriana, 2002). . . . .	236
7.9	Mapa de zonificación sísmica de Colombia (AIS, 1998). . . . .	240
7.10	Mapa de valores de aceleración efectiva del terreno en roca Aa (AIS, 1998). . . . .	241

7.11	Acelerograma del sismo de Belalcázar, registrado en la estación "El cable" en Manizales [unidades: $cm/s^2$ ]. . . . .	245
7.12	Modelo probabilista de la frecuencia $\omega_o$ de Kanai-Tajimi para la ciu-	
9.1	Punto de desempeño sísmico del modelo A.1 SDSR para la demanda sísmica del CCCSR-84. . . . .	283
9.2	Punto de desempeño sísmico del modelo A.1 CDSR para la demanda sísmica del CCCSR-84. . . . .	283
9.3	Punto de desempeño sísmico del modelo B.3 SDSR para la demanda sísmica del CCCSR-84. . . . .	284
9.4	Punto de desempeño sísmico del modelo B.3 CDSR para la demanda sísmica del CCCSR-84. . . . .	284
9.5	Punto de desempeño sísmico del modelo C.2 SDSR para la demanda sísmica del CCCSR-84. . . . .	285
9.6	Punto de desempeño sísmico del modelo C.2 CDSR para la demanda sísmica del CCCSR-84. . . . .	285
9.7	Puntos de desempeño para el edificio A.1 CDSR - Demanda sísmica de los acelerogramas sintéticos. . . . .	289
9.8	Ajuste de un polinomio normal a los puntos de desempeño del modelo A.1 CDSR obtenidos a partir de los acelerogramas sintéticos. . . . .	290
9.9	Ajuste de un función de distribución lognormal a los puntos de desempeño del modelo A.1 CDSR obtenidos a partir de los acelerogramas sintéticos. . . . .	290
9.10	Representación gráfica de los principales parámetros que controlan la forma y las zonas de los espectros de respuesta suavizados. . . . .	291
9.11	Espectro de respuesta de aceleraciones del sismo del Quindío (Colombia), 25 de enero de 1999. . . . .	292
9.12	Identificación de los umbrales de los estados de daño - $S_{dmax}$ . . . . .	294
9.13	Relación entre los valores máximos de la deriva entre piso y los desplazamientos espectrales correspondientes. . . . .	294
9.14	Ejemplo de histograma de frecuencias para la resistencia a la compresión del hormigón $f'_c$ . . . . .	300
9.15	Esquema de la representación plana del modelo A.1 utilizada para el análisis pushover en el programa RUAUMOKO 2D. . . . .	301
9.16	Modelo histerético de Takeda modificado. . . . .	302
9.17	Modelo de pérdida de resistencia en función del número de ciclos histeréticos o de los factores de ductilidad. . . . .	303
9.18	Función de distribución de probabilidad de la deriva máxima entre piso - Modelo A.1. . . . .	304
9.19	Función de distribución de probabilidad de la deriva máxima entre piso - Modelo B.3. . . . .	305
9.20	Función de distribución de probabilidad de la deriva máxima entre piso - Modelo C.2. . . . .	306
9.21	Curvas de fragilidad para el edificio de 5 niveles (modelo A.1 SDSR, arriba y CDSR, abajo). . . . .	309

9.22	Curvas de fragilidad para el edificio de 9 niveles (modelo B.3 SDSR, arriba, y CDSR, abajo). . . . .	310
9.23	Curvas de fragilidad para el edificio de 13 niveles (modelo C.2 SDSR, arriba, y CDSR, abajo). . . . .	311
9.24	Valores de la probabilidad de ocurrencia de los estados de daño - Escenario correspondiente a la demanda del modelo estocástico - Edificios SDSR para $PGA = 0.25 g$ . . . . .	316
9.25	Valores de la probabilidad de ocurrencia de los estados de daño - Escenario correspondiente a la demanda del modelo estocástico - Edificios CDSR para $PGA = 0.25 g$ . . . . .	316
9.26	Comparación entre las probabilidades de ocurrencia de los estados de daño para el edificio de 5 niveles SDSR y CDSR. Modelo estocástico, $PGA = 0.25 g$ . . . . .	317
10.1	Localización de la ciudad de Barcelona. . . . .	324
10.2	Distribución de los 10 distritos de la ciudad de Barcelona. . . . .	325
10.3	Mapa Geológico de la región de Barcelona (Cid et al., 2001). . . . .	325
10.4	Sismicidad reciente (1986-2000) en Cataluña (ICC, 2003). . . . .	328
10.5	Mapa de amenaza sísmica de la NCSE-02. . . . .	329
10.6	Zonificación sísmica de Barcelona - Efectos locales (Cid et al., 2001). . . . .	331
10.7	Escenario sísmico determinista para Barcelona. El escenario tiene en cuenta los efectos de suelo y tiene el significado del mayor sismo esperado en Barcelona (Irizarry et al., 2003). . . . .	333
10.8	Escenario sísmico probabilista para Barcelona. El escenario tiene en cuenta los efectos de suelo y expresa niveles de PGA y valores de aceleración espectral para diferentes períodos con una probabilidad de ocurrencia del 10 % en 50 años, o con un período de retorno de 475 años (Irizarry et al., 2003). . . . .	334
10.9	Esquema del espectro elástico de respuesta normalizado propuesto por la NCSE-02 (amortiguamiento de 5%). . . . .	336
10.10	Espectro de diseño de la NCSE-02 en formato AD. . . . .	339
10.11	Espectros de respuesta propuestos por el ICC para los escenarios determinista y probabilista (Irizarry et al., 2003). . . . .	341
11.1	Tejido urbano formado de las típicas islas o manzanas de "l'Eixample". . . . .	344
11.2	Detalle del forjado de vigueta de madera y bovedilla cerámica tomado de los planos arquitectónicos originales del edificio de 6 niveles (COTCA S.A, 2002). . . . .	346
11.3	Detalle del forjado de vigueta metálica y bovedilla cerámica tomado de los planos arquitectónicos originales del edificio de 6 niveles (COTCA S.A, 2002). . . . .	346

11.4 Fachada del edificio de 6 niveles de mampostería no reforzada, que ha sido modelado. . . . .	348
11.5 Vista interior de la planta baja del edificio de 6 niveles de mampostería no reforzada, que ha sido modelado. . . . .	349
11.6 Copia del plano original de la planta y la fachada del edificio de 6 niveles de mampostería no reforzada (COTCA S.A, 2002). . . . .	350
11.7 Esquema del modelo cinemático del macro elemento (Brencich y Lagomarsino, 1998). Ver explicación y nomenclatura en el texto. . . . .	351
11.8 Modelo tridimensional del edificio de 6 niveles (M.3) del Eixample. . .	354
11.9 Modelo de macro elemento - Muros 1 y 2 del edificio de 6 niveles. . .	355
11.10 Los tres primeros modos de vibración del modelo M.3 ( 6 niveles ). . .	358
11.11 Sistema de fuerzas horizontales aplicado al modelo de 6 niveles para el análisis pushover. . . . .	359
11.12 Espectros de capacidad: medio ( $\bar{x}$ ), medio + 1 desviación estándar ( $\bar{x} + 1\sigma$ ) y medio - 1 desviación estándar ( $\bar{x} - 1\sigma$ ) - Modelo M.3. . . .	360
11.13 Espectros de capacidad medios para los modelos M.1, M.2 y M.3. . .	360
12.1 Punto de desempeño sísmico del Modelo M.1 (4 niveles) - Caso NCSE-02. . . . .	365
12.2 Punto de desempeño sísmico del Modelo M.2 (5 niveles) - Caso NCSE-02. . . . .	366
12.3 Punto de desempeño sísmico del Modelo M.3 (6 niveles) - Caso NCSE-02. . . . .	366
12.4 Punto de desempeño sísmico del Modelo M.1 (4 niveles) - Caso ICC determinista. . . . .	367
12.5 Punto de desempeño sísmico del Modelo M.2 (5 niveles) - Caso ICC determinista. . . . .	368
12.6 Punto de desempeño sísmico del Modelo M.3 (6 niveles) - Caso ICC determinista. . . . .	368
12.7 Punto de desempeño sísmico del Modelo M.1 (4 niveles) - Caso ICC probabilista. . . . .	369
12.8 Punto de desempeño sísmico del Modelo M.2 (5 niveles) - Caso ICC probabilista. . . . .	370
12.9 Punto de desempeño sísmico del Modelo M.3 (6 niveles) - Caso ICC probabilista. . . . .	370
12.10 Relación entre los valores de desplazamiento espectral y las derivas máximas entre piso. . . . .	373
12.11 Umbrales de desplazamiento espectral para el modelo M.3. . . . .	374
12.12 Representación bilineal del espectro de capacidad. . . . .	378
12.13 Representación de los valores medios de desplazamiento espectral sobre el espectro de capacidad. . . . .	379
12.14 Función de distribución de probabilidad beta. . . . .	380

12.15	Ajuste de una fdp lognormal para el estado de daño moderado. Modelo M.3. . . . .	381
12.16	Curvas de fragilidad del edificio de 4 niveles (modelo M.1). . . . .	382
12.17	Curvas de fragilidad del edificio de 5 niveles (modelo M.2). . . . .	383
12.18	Curvas de fragilidad del edificio de 6 niveles (modelo M.3). . . . .	383
12.19	Probabilidades de ocurrencia de los estados de daño, obtenidas variando el período $T_C$ en el espectro del caso ICC -determinista. Modelo M.3 (6 niveles). . . . .	388
12.20	Probabilidades de ocurrencia de los estados de daño, obtenidas variando el parámetro $d$ de la zona de velocidad constante, en el espectro del caso ICC - determinista. Modelo M.3 (6 niveles). . . . .	388
12.21	Curvas de fragilidad para el modelo M.3 - Umbrales de daño propuestos por Calvi (1999). . . . .	389
12.22	Comparación de las probabilidades de los estados de daño obtenidas para los límites propuestos por Calvi y Lagomarsino - caso NCSE-02. . . . .	390
12.23	Comparación de las probabilidades de los estados de daño obtenidas para los límites propuestos por Calvi y Lagomarsino - Caso ICC determinista. . . . .	391
12.24	Comparación de las probabilidades de los estados de daño obtenidas para los límites propuestos por Calvi y Lagomarsino - Caso ICC probabilista. . . . .	391
12.25	Valores de la probabilidad de ocurrencia de los estados de daño para la demanda sísmica caso NCSE-02. . . . .	392
12.26	Valores de la probabilidad de ocurrencia de los estados de daño para el caso ICC determinista. . . . .	393
12.27	Valores de la probabilidad de ocurrencia de los estados de daño para el caso ICC probabilista. . . . .	393
12.28	Valores del daño medio para los tres tipos de demanda considerados. . . . .	395
12.29	Distribución de los edificios en la zona de "l'Eixample" en Barcelona de acuerdo al número de niveles. (Lantada, 2003). . . . .	396
12.30	Daño medio de los edificios de mampostería no reforzada de elevación media y alta de l'Eixample - Escenario NCSE-02 (Lantada, 2003). . . . .	398
12.31	Daño medio de los edificios de mampostería no reforzada de elevación media y alta de l'Eixample - Escenario ICC - determinista (Lantada, 2003). . . . .	399
12.32	Daño medio de los edificios de mampostería no reforzada de elevación media y alta de l'Eixample - Escenario ICC - probabilista (Lantada, 2003). . . . .	400
12.33	Probabilidades del estado sin daño -Escenario NCSE-02 (Lantada, 2003). . . . .	402
12.34	Probabilidades del estado de daño leve - Escenario NCSE-02 (Lantada, 2003). . . . .	403

12.35	Probabilidades del estado de daño moderado - Escenario NCSE-02 (Lantada, 2003). . . . .	404
12.36	Probabilidades del estado de daño severo - Escenario NCSE-02 (Lantada, 2003). . . . .	405
12.37	Síntesis de resultados y representación gráfica. Ejemplo de una manzana de l'Eixample - Escenario NCSE-02. Los círculos corresponden a la distribución del daño en los edificios de elevación media (4-5 niveles) y alta (>6 niveles). Los números indican la cantidad de niveles (Lantada, 2003). . . . .	406
B.1	Ajuste de un polinomio de tercer grado. . . . .	463
B.2	Curva ajustada. Función de distribución de probabilidad acumulada vs deriva entre piso. . . . .	464
C.1	Densidad espectral de potencia de los modelos propuestos por Kanai-Tajimi y Clough-Penzien (unidades: $rad/s$ ; $cm^2/s^3$ ). . . . .	465



## Lista de Tablas

2.1	Formato de la matriz de probabilidad de daño para una tipología dada	12
2.2	Ejemplos de componentes no estructurales y contenidos de estructuras.	21
2.3	Correlación entre el índice de daño total de Park y Ang y cinco estados discretos de daño	44
2.4	Correlación entre el índice de daño global de Park y Ang y cuatro estados discretos de daño	44
2.5	Correlación entre el índice de daño global de Bracci et al. (1989) y cuatro estados discretos de daño	44
3.1	Descripción de los estados de daño y niveles de desempeño (SEAOC Vision 2000 Committee, 1995)	52
3.2	Niveles de desempeño de las estructuras (ATC,1996)	55
3.3	Movimientos sísmicos de diseño (SEAOC Vision 2000 Committee, 1995)	57
3.4	Objetivos del desempeño sísmico recomendado para estructuras (SEAOC Vision 2000 Committee, 1995).	59
3.5	Objetivos de desempeño sísmico recomendados para estructuras básicas	59
3.6	Objetivos de seguridad básica para estructuras convencionales (ATC-40, 1996)	60
3.7	Valores para el factor modificador del amortiguamiento (ATC-40, 1996)	71
3.8	Valores mínimos requeridos para $SR_A$ y $SR_V$	71
3.9	Propiedades modales para el edificio de HA de 5 niveles.	77
3.10	Valores del factor modificador $C_0$	80

3.11	Valores del factor modificador $C_2$	81
3.12	Demanda de desplazamientos - MCD.	83
3.13	Valores límites de la deriva máxima entre piso para los niveles de desempeño (ATC-40)	94
3.14	Valores límites de la deriva máxima entre piso para los niveles de desempeño (SEAOC Vision 2000 Committee, 1995)	94
3.15	Demanda de desplazamiento para el edificio de HA de 5 niveles	95
3.16	Valores límites de los niveles de desempeño para el edificio de HA de 5 niveles.	96
4.1	Estados discretos de daño e intervalos de variación del factor de daño (ATC-13, 1985)	105
4.2	Estadísticos de la distribución lognormal para los estados de daño del edificio de HA de 5 niveles	124
4.3	Ejemplo de matriz de probabilidad de daño de el caso del edificio de HA de 5 niveles	125
4.4	Valor medio y desviación estándar de los desplazamientos espectrales para los estados discretos de daño	128
6.1	Resistencia a la compresión de diferentes unidades de mampostería	191
6.2	Clasificación de los tipos de mortero de acuerdo a su resistencia (ASTM C270).	195
6.3	Factores que afectan la resistencia a la compresión	198
6.4	Expresiones empíricas para el módulo de elasticidad de la mampostería	201
7.1	Principales sismos de la zona del Eje Cafetero (CIMOC y CEDERI, 2002)	238
7.2	Clasificación de las zonas de amenaza sísmica (AIS, 1998)	242
7.3	Registros sísmicos en Manizales (Hurtado, 1999)	244
7.4	Valores de los parámetros del modelo estocástico (Hurtado, 1999)	247
7.5	Valores del coeficiente de importancia, $I$ (CCCSR-84)	258

7.6	Valores del coeficiente de suelo, $S$ (CCCSR-84)	259
8.1	Clases de estructuras de HA existentes según el número de niveles	267
8.2	Factores de participación para cada tipo de edificio	267
8.3	Participación de acuerdo al número de niveles. Participación en sub-períodos	272
8.4	Participación de cada tipo de edificio - Período 1926-1983	272
8.5	Tipos de edificios considerados para cada grupo	274
8.6	Propiedades geométricas básicas de los modelos A.1, B.3 y C.2 (SDSR y CDSR. En negrita se destacan los modelos finalmente analizados)	274
8.7	Parámetros de análisis y diseño para los modelos estructurales de la ciudad de Manizales.	276
8.8	Parámetros del sistema de 1 GDL equivalente	277
8.9	Parámetros de la representación bilineal del espectro de capacidad	277
9.1	Coordenadas del punto de desempeño para la demanda sísmica del CCCSR-84 y la NSR-98.	286
9.2	Criterios para la identificación de los niveles de desempeño de los edificios de HA de la ciudad de Manizales.	295
9.3	Valores límite de la deriva máxima entre piso para los estados discretos de daño. Modelos A.1, B.3 y C.2 (SDSR y CDSR)	295
9.4	Valores límite del desplazamiento espectral para los estados de daño discretos. Modelos A.1, B.3 y C.2 (SDSR y CDSR)	295
9.5	Estados de daño y niveles de desempeño para la demanda sísmica del CCCSR-84	296
9.6	Estados de daño y niveles de desempeño para la demanda sísmica de la NSR-98	297
9.7	Descripción de las variables aleatorias de los parámetros estructurales.	299
9.8	Descripción de las variables aleatorias de la acción sísmica: $\omega_g$ , $v_g$ y $\varepsilon$	300
9.9	Probabilidades de no excedencia de la deriva máxima entre piso para una $PGA = 0.25g$	307

9.10	Valor medio de la aceleración máxima del terreno $\overline{PGA}$ para cada estado de daño	308
9.11	Valor medio de la aceleración máxima del terreno $\overline{PGA}$ para cada estado de daño.	308
9.12	Matriz de probabilidad de daño - Edificio de 5 niveles (A.1)	312
9.13	Matriz de probabilidad de daño - Edificio de 9 niveles (B.3)	312
9.14	Matriz de probabilidad de daño - Edificio de 13 niveles (C.2)	312
9.15	Comparación de los estados discretos de daño para los modelos estructurales analizados (ver explicación en el texto)	314
10.1	Principales sismos ocurridos en Cataluña (ICC, 2003)	327
10.2	Valores del coeficiente del terreno C	337
10.3	Parámetros para el espectro probabilista y determinista propuesto por el ICC para la ciudad de Barcelona (Irizarry et al., 2003)	340
11.1	Variables aleatorias de los parámetros estructurales	357
11.2	Períodos y factores de participación del análisis modal - Modelo M.3.	357
11.3	Parámetros del sistema de 1 GDL equivalente para los edificios de mampostería de la zona de l'Eixample en Barcelona	359
11.4	Parámetros de la representación bilineal del espectro de capacidad de los modelos M.1, M.2 y M.3	361
12.1	Puntos de desempeño para los tres modelos de mampostería. Caso NCSE-02.	365
12.2	Puntos de desempeño para los tres modelos de mampostería. Caso ICC determinista.	367
12.3	Puntos de desempeño para los tres modelos de mampostería. Caso ICC probabilista.	369
12.4	Intervalos de variación del desplazamiento espectral para los estados discretos de daño (Lagomarsino et al., 2002)	371
12.5	Umbrales de desplazamiento espectral para el modelo M.1	371
12.6	Umbrales de desplazamiento espectral para el modelo M.2.	371

12.7	Umbrales de desplazamiento espectral para el modelo M.3.	372
12.8	Límites de los estados de daño para estructuras de mampostería no reforzada (Calvi,1999).	372
12.9	Umbrales de desplazamiento espectral para el modelo M.3, obtenidos a partir de la propuesta de Calvi (1999)	373
12.10	Estados de daño y niveles de desempeño para el modelo M.1	375
12.11	Estados de daño y niveles de desempeño para el modelo M.2	375
12.12	Estados de daño y niveles de desempeño para el modelo M.3.	375
12.13	Estados de daño y niveles de desempeño para el modelo M.3. Umbrales de daño de Calvi.	376
12.14	Distribución discreta de las probabilidades de que cada estado de daño sea excedido cuando $P_{\beta} = 0.5$ para $x = 1, 2, 3$ y $4$	380
12.15	Parámetros de la función de distribución lognormal - Modelo M.1.	381
12.16	Parámetros de la función de distribución lognormal - Modelo M.2	381
12.17	Parámetros de la función de distribución lognormal - Modelo M.3	382
12.18	Matriz de probabilidad de daño - Modelo M.1	384
12.19	Matriz de probabilidad de daño - Modelo M.2	384
12.20	Matriz de probabilidad de daño - Modelo M.3	384
12.21	Demanda de desplazamiento y aceleración espectral para el caso ICC probabilista - Espectros de capacidad del modelo M.3.	386
12.22	Umbrales de los estados de daño para los espectros $(\bar{x} + 1\sigma)$ y $(\bar{x} - 1\sigma)$ del modelo M.3	386
12.23	Estados de daño y niveles de desempeño para los espectros de capacidad del modelo M.3	386
12.24	Probabilidad de daño para el espectro de la NCSE-02 y los casos ICC determinista y probabilista. Modelo M.3	389
12.25	Intervalos de variación del valor de daño medio $d_m$ para cada estado de daño	394
12.26	Clasificación de los edificios de mampostería no reforzada de acuerdo al número de niveles.	395

