

Análisis y diseño sísmico de edificios

Roberto Rochel Awad



Rochel Awad, Roberto

Análisis y diseño sísmico de edificios / Roberto Rochel Awad. --

Medellín: Fondo Editorial Universidad EAFIT, 2012.

388 p.; 22 cm. -- (Colección Académica)

Incluye referencias bibliográficas.

ISBN 978-958-720-117-8

1. Ingeniería sísmica. 2. Diseño sismo resistente 3. Diseño de Estructuras 4. Construcciones sismo resistentes - Diseño I. Tít. II. Serie.

693.85 cd 21 ed.

A1332098

CEP-Banco de la República-Biblioteca Luis Ángel Arango

Análisis y diseño sísmico de edificios

Segunda edición: abril de 2012

Sexta reimpresión: agosto de 2016

© Roberto Rochel Awad

© Fondo Editorial Universidad EAFIT

Carrera 49 # 7 Sur- 50, Tel. 261 95 23

www.eafit.edu.co/fondoeditorial

Correo electrónico: fonedit@eafit.edu.co

ISBN: 978-958-720-117-8

Diseño de colección: Miguel Suárez

Fotografía de carátula: Robinson Henao, Edificio de Ingenierías, Universidad EAFIT.

Editado en Medellín, Colombia

Tabla de contenido

Capítulo 1

Fundamentos del diseño sísmico de edificios

1.1 Aspectos generales del diseño sísmico.....	25
1.2 Filosofía del diseño sismo resistente.....	27
1.3 Solicitaciones sísmicas	28
1.4 Amenaza sísmica	31
1.4.1 Espectro de respuesta sísmica	34
1.4.2 Espectro elástico de diseño.....	41
1.4.3 Espectro inelástico de diseño	45
1.5 Configuración estructural de la edificación y coeficiente de capacidad de disipación de energía para ser empleado en el diseño, R.....	84
1.5.1 Asimetrías del sistema estructural de resistencia sísmica.....	84
1.5.2 Redundancia del sistema estructural de resistencia sísmica.....	91
1.5.3 Recomendaciones para una buena estructuración	92
1.6 Evaluación de la deriva máxima	96
1.6.1 Límites de la deriva máxima.....	96
1.6.2 Separación entre estructuras adyacentes por consideraciones sísmicas	97

Capítulo 2

Filosofía del diseño sísmico

2.1 Sistemas estructurales	101
2.1.1 Sistema de muros	102

2.1.2	Sistema de pórticos dúctiles a flexión	103
2.1.3	Sistema de pórticos	103
2.1.4	Sistema dual	104
2.1.5	Sistema combinado	105
2.2	Métodos de análisis	106
2.2.1	Método de la Fuerza Horizontal Equivalente	108
2.2.2	Método del análisis dinámico elástico	108
2.3	Aspectos generales del diseño sísmico.....	109
2.3.1	Comportamiento de las estructuras hiperestáticas.....	111
2.3.2	Ejemplo numérico	113
2.4	Filosofía del diseño sísmico según la NSR-10	116
2.5	Procedimiento para el diseño a flexión de vigas y columnas	119
2.5.1	Diseño a flexión de vigas.....	119
2.5.2	Diseño a flexo-compresión de columnas	119
2.6	Procedimiento para el diseño a cortante de vigas y columnas	121
2.6.1	Estructuras con Demanda Moderada de Ductilidad (DMO).....	121
2.6.2	Estructuras con Demanda Especial de Ductilidad (DES)	125

Capítulo 3

Análisis tridimensional

3.1	Introducción.....	129
3.2	Hipótesis del modelo matemático.....	130
3.3	Definiciones.....	132
3.4	Sistema global de coordenadas	133
3.5	Procedimiento de análisis, diagrama de flujo.....	134
3.6	Matriz de rigidez de la estructura.....	135

3.6.1	Fundamentos	135
3.6.2	Desplazamientos de los entrepisos.....	137
3.6.3	Matriz de rigidez de la estructura en coordenadas globales	138
3.7	Vector de cargas.....	140
3.7.1	Coordenadas del centro de cortante.....	140
3.7.2	Coordenadas del centro de torsión	141
3.7.3	Excentricidades estáticas y de diseño	143
3.7.4	Momentos torsores.....	146
3.8	Análisis de los pórticos planos	147
3.8.1	Desplazamientos de los entrepisos.....	147
3.8.2	Desplazamientos de los pórticos planos.....	148
3.8.3	Cortantes y fuerzas sísmicas en los pórticos.....	148
3.9	Control de derivas.....	149
3.10	Ejemplo.....	149
3.11	Análisis del período natural de vibración, T.....	185
3.11.1	Métodos empíricos	185
3.11.2	Método de análisis dinámico	186
3.11.3	Método de Rayleigh	188
3.11.4	Restricciones de la NSR-10	190
3.11.5	Revisión del período.....	191

Capítulo 4

Análisis y diseño de vigas

4.1	Introducción.....	193
4.2	Materiales.....	195
4.3	Requisitos de diseño	196
4.3.1	Requisitos geométricos	196
4.3.2	Requisitos generales para el refuerzo longitudinal	197
4.3.3	Detallado del refuerzo en flexión	200

4.4	Tuberías embebidas.....	217
4.5	Sistema de losas aligeradas o nervadas.....	218
4.6	Requisitos de diseño sismo resistente para vigas, NSR-10	223
4.7	Ejemplo de diseño	229
4.8	Comentarios sobre la NSR-10	255
4.8.1	Secciones críticas para el diseño del refuerzo negativo.....	255
4.8.2	Longitud de desarrollo para barras terminadas con gancho estándar, estructuras con demanda especial de ductilidad.....	255
4.8.3	Espesores mínimos de vigas y columnas en uniones interiores, estructuras con demanda moderada de ductilidad.....	256
4.8.4	Método para evaluar el cortante de diseño en vigas de estructuras con demanda moderada de ductilidad, DMO	257
4.8.5	Factor de seguridad a cortante para estructuras aporticadas con demanda moderada de ductilidad	258
4.8.6	Zonas de traslapes en vigas de estructuras con demanda moderada de ductilidad.....	259

Capítulo 5

Análisis y diseño de columnas

5.1	Definición.....	261
5.2	Requisitos geométricos.....	261
5.3	Requisitos para el refuerzo.....	262
5.3.1	Refuerzo longitudinal.....	262
5.3.2	Refuerzo transversal	265
5.4	Longitud de diseño, L_u	271
5.5	Cambios de sección	272

5.6	Requisitos de diseño	274
5.6.1	Requisitos generales.....	274
5.6.2	Requisitos de diseño a flexión	275
5.6.3	Requisitos de diseño a cortante.....	277
5.6.4	Empalmes o traslapo del refuerzo.....	279
5.7	Ejemplo de diseño	282
5.8	Especificaciones de diseño para columnas, NSR-10	295

Capítulo 6

Uniones viga-columna

6.1	Introducción.....	305
6.2	Criterios de diseño.....	307
6.3	Comportamiento esperado de las uniones	307
6.4	Clasificación de los nudos	309
6.4.1	Según su geometría y su confinamiento.....	309
6.4.2	Clasificación del ACI según su comportamiento	310
6.4.3	Clasificación de la NSR-10 según su comportamiento	312
6.5	Análisis de los nudos para estructuras con ductilidad especial	313
6.5.1	Nudos interiores.....	313
6.5.2	Nudos exteriores	317
6.5.3	Nudos de esquina.....	319
6.6	Diseño de las uniones viga-columna	320
6.6.1	Secciones críticas.....	320
6.6.2	Longitud de desarrollo	321
6.6.3	Fuerza cortante en los nudos interiores.....	323
6.6.4	Resistencia del hormigón a tensiones cortantes	326
6.6.5	Refuerzo transversal en los nudos.....	328
6.7	Las uniones en los planos de construcción	329

6.8	Especificaciones de diseño para los nudos.....	330
6.9	Ejemplo de diseño.....	334
6.10	Observaciones sobre la NSR-10	340

Anexo A

Teoría general de columnas

7.1	Columnas uniaxiales.....	341
7.1.1	Tipos de refuerzo	341
7.1.2	Tipos de columnas.....	341
7.1.3	Columnas rectangulares uniaxiales, simétricas, con refuerzo en dos caras	342
7.2	Columnas biaxiales	353
7.2.1	Método de la superficie de falla.....	355
7.3	Ejercicios	359

	Referencias bibliográficas.....	383
--	---------------------------------	-----

Índice de tablas

Tabla 1.1	Valores de A_a y A_v para algunas ciudades capitales de departamento, para otras ciudades véase el Apéndice A-4 de la NSR-10	34
Tabla 1.2	Valores del coeficiente de importancia	50
Tabla 1.3	Clasificación de los perfiles del suelo	52
Tabla 1.4	Criterios para clasificar suelos dentro de los perfiles de suelo tipo C, D o E	53
Tabla 1.5	Valores del coeficiente F_a , para zonas de períodos cortos del espectro.....	53
Tabla 1.6	Valores del coeficiente F_v , para zonas de períodos intermedio del espectro.....	54
Tabla 1.7	Valores del coeficiente C_s , y a para el cálculo del período aproximado T_a	55
Tabla 1.8	Valores del coeficiente básico debido a la redundancia, R_{op}	62
Tabla 1.9	Sistemas estructurales de muros de carga, NSR-10, Tabla A.3-1	67
Tabla 1.10	Sistema estructural combinado, NSR-10, Tabla A.3-2	70
Tabla 1.11	Sistemas estructurales de pórtico a momentos, NSR-10, Tabla A.3.3.....	75
Tabla 1.12	Sistemas estructurales dual, NSR-10, Tabla A.3-4.....	79
Tabla 1.13	Mezcla de sistemas estructurales en altura	88
Tabla 1.14	Derivas máximas como porcentaje de h_{pi}	97
Tabla 1.15	Separación sísmica mínima en la cubierta entre edificaciones colindantes que no hagan parte de la misma construcción	98
Tabla 2.1	Proporcionamiento de sobre resistencia	114
Tabla 2.2	Sobre-resistencia residual.....	115
Tabla 2.3	Especificaciones para diseño a flexión de columnas según la NSR-10.....	120

Tabla 2.4	Especificaciones para diseño a cortante de vigas según la NSR-10	126
Tabla 2.5	Especificaciones para diseño a cortante de columnas según la NSR-10	126
Tabla 4.1	Dimensiones de los ganchos estándar	202
Tabla 4.2	Ancho mínimo de las columnas y altura mínima de las vigas para satisfacer las condiciones de anclaje del refuerzo terminado con gancho estándar a 90°, DMI y DMO.....	204
Tabla 4.3	Ancho mínimo de las columnas y altura mínima de las vigas para satisfacer las condiciones de anclaje del refuerzo terminado con gancho estándar a 90°, DES	205
Tabla 4.4	Longitudes de desarrollo para barras rectas a tracción, refuerzo sin recubrimiento epóxico ($\psi_e = 1.0$), hormigón de peso normal ($l=1.0$), $f_y=4,200$ kgf/cm ² , $f'_c=210$ kgf/cm ² . Estructuras con demanda mínima, DMI y moderada DMO de ductilidad	206
Tabla 4.5	Longitudes de desarrollo para barras rectas a tracción, refuerzo sin recubrimiento epóxico ($\psi_e = 1.0$), hormigón de peso normal ($l=1.0$), $f_y=4,200$ kgf/cm ² , $f'_c=210$ kgf/cm ² . Estructuras con demanda especial de ductilidad, DES	207
Tabla 4.6	Requisitos geométricos para las vigas.....	223
Tabla 4.7	Refuerzo longitudinal en vigas	224
Tabla 4.8	Refuerzo transversal en vigas.....	226
Tabla 4.9	Tensiones cortantes en vigas	228
Tabla 5.1	Longitudes de traslape Clase B para barras rectas y corrugadas a tracción, estructuras con demanda mínima, DMI; y demanda moderada, DMO, de ductilidad, $\psi_t = 1.0$, $\psi_e = 1.0$	280
Tabla 5.2	Longitudes de traslape Clase B para barras rectas y corrugadas a tracción, estructuras con demanda especial, DES, de ductilidad, cálculo según literal (a)	282
Tabla 5.3	Requisitos geométricos.....	295
Tabla 5.4	Resistencia mínima a la flexión de las columnas	296
Tabla 5.5	Refuerzo longitudinal en las columnas	297
Tabla 5.6	Refuerzo transversal en las columnas.....	298
Tabla 5.7	Requisitos para refuerzo a cortante en columnas	303

Tabla 6.1	Altura mínima para vigas o columnas basadas en la adherencia de refuerzo longitudinal que pasa a través de un nudo interior.....	317
Tabla 6.2	Ancho mínimo de las columnas para satisfacer las condiciones de anclaje del refuerzo de las vigas terminadas con ancho estándar, DMI y DMO	322
Tabla 6.3	Ancho mínimo de las columnas para satisfacer las condiciones de anclaje del refuerzo de las vigas terminadas con ancho estándar, DES	323
Tabla 6.4	Valores de g para el cálculo de la resistencia a cortante de las uniones viga-columna	326
Tabla 6.5	Requisitos generales para el diseño de las uniones viga-columna	330
Tabla 6.6	Requisitos para el refuerzo transversal en las uniones viga-columna	331
Tabla 6.7	Requisitos para el diseño a cortante en las uniones viga-columna	332
Tabla 6.8	Requisitos para el desarrollo del refuerzo dentro de las uniones viga-columna	333
Tabla 7.1	Cálculo de los puntos que definen el diagrama de interacción .	351

Índice de figuras

Figura 1.1	Propagación de la energía sísmica desde el hipocentro o foco hasta la estructura	31
Figura 1.2	Mapa de amenaza sísmica en Colombia.....	33
Figura 1.3	Sistema de un grado de libertad con amortiguamiento.....	35
Figura 1.4	Espectro de respuesta de desplazamiento.....	38
Figura 1.5	Espectro de aceleraciones, sismo de El Centro, California, mayo 18 de 1940.....	39
Figura 1.6	Espectro de respuesta de aceleraciones.....	40
Figura 1.7	Espectro elástico promedio de aceleraciones.....	42
Figura 1.8	Espectro de diseño suavizado.....	43
Figura 1.9	Espectro elástico de diseño para Colombia, NSR-10, Sec. A.2.6.....	45
Figura 1.10	Procedimientos simplificados para obtener espectros inelásticos de diseño	46
Figura 1.11	Espectro de diseño inelástico para Colombia, NSR-10, Sec. A.2.6.....	46
Figura 1.12	Comportamiento de una estructura aporticada ante cargas monotónicas.....	47
Figura 1.13	Modificación de la respuesta debido a la ductilidad.....	57
Figura 1.14	Criterio de igualdad de desplazamientos.....	58
Figura 1.15	Criterio de igualdad de energía	59
Figura 1.16	Variación del factor R_{om} con la ductilidad y el período.....	60
Figura 1.17	Sistemas estructurales de pórticos y de muros de carga.....	64
Figura 1.18	Sistemas estructurales dual	65
Figura 1.19	Irregularidades en planta	89
Figura 1.20	Irregularidades en altura	90
Figura 1.21	Derivas de entrepiso	96

Figura 1.22	Medición de la separación sísmica (vista en elevación)	99
Figura 2.1	Viga hiperestática de dos luces continuas	112
Figura 2.2	Viga continua de dos luces con articulación plástica en el apoyo B	112
Figura 2.3	Viga continua de dos luces con articulación plástica en el apoyo B y la L_2	113
Figura 2.4	Demanda de resistencia a la flexión en t-m.....	113
Figura 2.5	Formación de la primera articulación plástica en el apoyo B...	115
Figura 2.6	Diferentes tipos de mecanismos de falla en estructuras aperticadas de hormigón reforzado.....	116
Figura 2.7	Equilibrio de momentos en un nudo, $SM_{col} = SM_{vig}$	119
Figura 2.8	Cortante de diseño en vigas y columnas	123
Figura 2.9	Cortante en las columnas $V_c = (M_{vi} + M_{vd}) / H$	127
Figura 3.1	Los efectos sísmicos se analizan independientemente en dos direcciones ortogonales.....	131
Figura 3.2	Sistema global de coordenadas	133
Figura 3.3	Diagrama de flujo	134
Figura 3.4	Efectos de las acciones sísmicas sobre las estructuras.....	135
Figura 3.5	Análisis de la torsión, momento torsor	136
Figura 3.6	Distancia del pórtico j al origen de coordenadas, r_j	136
Figura 3.7	Desplazamientos del entrepiso, nivel i-ésimo	137
Figura 3.8	Vista en planta del pórtico j en el nivel i-ésimo de una estructura cualquiera	137
Figura 3.9	Desplazamiento del pórtico j en el nivel i en función de los desplazamientos del nivel i.....	138
Figura 3.10	Fuerza aplicada al pórtico j para producir el desplazamiento d_{ji}	139
Figura 3.11	Análisis del sismo en X.....	142
Figura 3.12	Análisis del sismo en Y.....	143
Figura 3.13	Excentricidades de diseño según las diferentes normas	145
Figura 3.14	Análisis del sismo en X.....	146
Figura 3.15	Análisis del sismo en Y.....	147

Figura 3.16	Desplazamientos de los nudos.....	148
Figura 3.17	Cortantes y fuerzas horizontales	148
Figura 4.1	Requisitos geométricos para las vigas de pórticos dúctiles de hormigón reforzado	197
Figura 4.2	Envolvente de momentos para vigas de pórticos dúctiles de hormigón.....	197
Figura 4.3	Zonas confinadas y de traslapos en vigas de pórticos resistentes a momentos, DMO y DES.....	198
Figura 4.4	Distribución de estribos en vigas de pórticos con demanda especial de ductilidad, DES	199
Figura 4.5	Distribución de estribos en vigas de pórticos con demanda moderada de ductilidad	200
Figura 4.6	Recubrimiento y separación del refuerzo longitudinal en vigas	200
Figura 4.7	Secciones críticas para el desarrollo del refuerzo en los nudos exteriores	202
Figura 4.8	Dimensiones mínimas de vigas y columnas para anclaje en nudos exteriores	202
Figura 4.9	Desarrollo del refuerzo negativo en un apoyo interior.....	209
Figura 4.10	Diagrama de momentos flectores con inversión en el apoyo central.....	209
Figura 4.11	Dimensiones mínimas de vigas y columnas en uniones interiores, pórticos de hormigón con DES.....	210
Figura 4.12	Diagrama de momentos flectores sin inversión en el apoyo central.....	211
Figura 4.13	Estribos de confinamiento.....	212
Figura 4.14	Acciones en las vigas de pórticos dúctiles debidas al efecto simultáneo de cargas de gravedad y cargas sísmicas	213
Figura 4.15	Superposición de los efectos de cortante en una viga dúctil de hormigón reforzado	214
Figura 4.16	Dimensiones mínimas de losas aligeradas.....	218
Figura 5.1	Requisitos geométricos para las columnas	262
Figura 5.2	Localización de la zona de traslapos en columnas con DES	263

Figura	5.3	Separación y recubrimiento del refuerzo longitudinal en columnas.....	264
Figura	5.4	Estribos de confinamiento con ganchos sísmicos	265
Figura	5.5	Ejemplo de confinamiento empleando estribos	267
Figura	5.6	Ejemplo de confinamiento con el empleo simultáneo de estribos de confinamiento y ganchos suplementarios	267
Figura	5.7	Requisitos del refuerzo transversal para columnas rectangulares en pórticos dúctiles de hormigón con demanda mínima de ductilidad, DMI	268
Figura	5.8	Requisitos del refuerzo transversal para columnas rectangulares en pórticos dúctiles de hormigón con demanda moderada de ductilidad, DMO.....	270
Figura	5.9	Requisitos del refuerzo transversal para columnas rectangulares en pórticos dúctiles de hormigón con demanda especial de ductilidad, DES	270
Figura	5.10	Longitud de diseño de las columnas	271
Figura	5.11	Cambios de sección en las columnas.....	273
Figura	5.12	Unión viga-columna de un pórtico con demanda de ductilidad especial	276
Figura	5.13	Cortante de diseño para columnas con DES	277
Figura	5.14	Análisis de los cortantes en las columnas de ductilidad moderada a partir del método de Bowman, suponiendo la ubicación de los puntos de inflexión de columnas en su punto medio	278
Figura	6.1	Uniones típicas viga-columna.....	306
Figura	6.2	Fuerzas en una unión viga-columna.....	308
Figura	6.3	(a) Unión interior, (b) Unión exterior, (c) Unión de esquina.	309
Figura	6.4	Requisitos de confinamiento para un nudo interior	310
Figura	6.5	Requisitos de confinamiento para un nudo exterior.....	310
Figura	6.6	En los nudos tipo 1, diagrama de momentos dominado por las cargas gravitacionales, no se esperan deformaciones inelásticas de importancia.....	311
Figura	6.7	Nudos tipo 2, diagrama de momentos dominado por los efectos sísmicos, se esperan deformaciones inelásticas de gran importancia.....	311

Figura 6.8	Inversión de momentos en una estructura con demanda especial de ductilidad	313
Figura 6.9	Transferencia de cortante en un mecanismo de puntal en compresión diagonal.....	314
Figura 6.10	Mecanismo del puntal diagonal y confinamiento de un exterior.....	317
Figura 6.11	Secciones críticas para el desarrollo del refuerzo en los nudos	321
Figura 6.12	Fuerzas en los nudos (DMI y DMO)	324
Figura 6.13	Fuerzas en los nudos tipo 2 (DES).....	325
Figura 6.14	Determinación del ancho efectivo, b_f , del nudo	327
Figura 7.1	Tipos de columnas	342
Figura 7.2	Acciones en columnas uniaxiales y biaxiales	343
Figura 7.3	Acciones mecánicas en los elementos de hormigón reforzado	344
Figura 7.4	Diagrama de deformaciones para la condición de falla balanceada	345
Figura 7.5	Diagramas de deformación para condición de falla no balanceada	346
Figura 7.6	Diagrama de interacción	347
Figura 7.7	Diagrama de interacción dimensional para una cuantía de 0.015, considerando $f'_c = 210 \text{ kgf/cm}^2$, $f_y = 4,200 \text{ kgf/cm}^2$, $d = 34 \text{ cm}$, $d' = 6 \text{ cm}$	352
Figura 7.8	Familia de curvas de interacción de columnas para cuantías que varían entre 0.01, curva N.º 1, hasta 0.04, curva N.º 4.....	353
Figura 7.9	Flexión uniaxial sobre los ejes Y y X, respectivamente.....	354
Figura 7.10	Flexión biaxial, diagrama tridimensional de interacción	355
Figura 7.11	Método de la superficie de falla para el análisis biaxial de columnas.....	356
Figura 7.12	Diagrama de interacción de columnas biaxiales en la zona de cargas axiales de tracción	357
Figura 7.13	Plano del diagrama de interacción en el caso de columnas biaxiales	358

Índice de imágenes

Imagen 1.1	En el sismo de El Salvador, en 1986, muchos hospitales quedaron fuera de servicio.....	48
Imagen 1.2	En el sismo de Armenia, Colombia, en 1999, las instalaciones de los bomberos colapsaron	49
Imagen 1.3	Daños en una edificación debido a la flexibilidad del sistema estructural aporticado.Armenia, Colombia, 1999.....	66
Imagen 1.4	Sistema reticular celulado, no recomendado para zonas con amenaza sísmica debido a su alta flexibilidad y al mal comportamiento durante el sismo de México, en 1985.....	66
Imagen 1.5	Comportamiento deficiente de una estructura con asimetría en planta en forma de U, El Salvador, 1986	84
Imagen 1.6	Comportamiento deficiente de una estructura con asimetría en planta en forma de E, palacio presidencial, Haití, 2010.....	85
Imagen 1.7	Las pesadas divisiones tradicionales, ladrillos de arcilla, deben reemplazarse por divisiones modulares, en yeso, muy livianas	93
Imagen 1.8	La localización de las acometidas de agua, teléfono, luz, gas y televisión deben ubicarse adecuadamente para no obligar a la colocación de pesados materiales de nivelación de los pisos...	93
Imagen 1.9	Colapso en Armenia, Colombia, en 1999. Muros estructurales dispuestos en una sola dirección	94
Imagen 1.10	Daños en acabados por flexibilidad del primer piso, Pereira, Colombia, 1999	95
Imagen 1.11	Daños por separación insuficiente de construcciones vecinas, Armenia, Colombia, 1999.....	99
Imagen 1.12	Daños por separación insuficiente, edificio Facultad de Ingeniería Universidad de Concepción, Chile, febrero 27 de 2010	100
Imagen 2.1	La disposición asimétrica de muros en edificios de esquina puede inducir torsión en la estructura	101

Imagen 2.2	Sistema estructural con muros de cortante.....	102
Imagen 2.3	Sistema estructural con pórticos dúctiles de hormigón	103
Imagen 2.4	Sistema estructural con pórticos de acero arriostrados (izquierda). Disponibilidad de espacios en una estructura con pórticos dúctiles de hormigón (derecha)	104
Imagen 2.5	Limitaciones en la distribución de espacios en un sistema de muros	106
Imagen 2.6	Comportamiento dúctil de un edificio de hormigón reforzado	111
Imagen 2.7	Las grandes deformaciones de las estructuras dúctiles van asociadas a graves daños en acabados y en elementos estructurales	118
Imagen 2.8	Articulación plástica en vigas.....	124
Imagen 2.9	Fallas de columna corta, Armenia, Colombia, enero de 1999..	128
Imagen 3.1	Daños en la mampostería debido a la ductilidad de la estructura.....	182
Imagen 3.2	Falla en los pisos superiores por falta de separación en las estructuras adyacentes. México D.F. 1985.....	183
Imagen 3.3	Daños por separación insuficiente o inexistente entre construcciones adyacentes. Armenia, Colombia, 1999.....	185
Imagen 4.1	Falla por tensión diagonal, en una viga, debido a sobrecargas.....	216
Imagen 4.2	Colocación prohibida de tuberías atravesando los elementos de resistencia sísmica, DMO y DES	217
Imagen 4.3	Recubrimiento insuficiente del refuerzo de temperatura en una losa aligerada.....	219
Imagen 4.4	El recubrimiento insuficiente del refuerzo longitudinal se manifiesta en una fisura paralela al refuerzo y la posterior pérdida del recubrimiento	220
Imagen 4.5	Desprendimiento del refuerzo longitudinal en nervios por falta de recubrimiento y de estribos	221
Imagen 4.6	Apoyo extremo de nervios con refuerzo negativo en exceso, lo cual ocasionó torsión en la viga indicada en la Imagen 4.4.....	221
Imagen 4.7	Colapso estructural por torsión en la viga de borde. Obsérvese la verticalidad de la baranda respecto a la arista de la viga.....	222

Imagen 4.8	Falla en voladizos, Armenia, Colombia, 1999	222
Imagen 5.1	En una correcta colocación del gancho de un estribo no debe quedar espacio entre el estribo y el refuerzo longitudinal; el alambre de amarre debe doblarse hacia el núcleo de la columna.....	266
Imagen 5.2	Fallas en las columnas por falta de estribos o por excesiva separación de los mismos. Armenia, Colombia, 1999	268
Imagen 5.3	Inadecuado inicio de columna en la viga del segundo nivel. Armenia, Colombia, 1999.....	272
Imagen 5.4	Escandaloso doblez del refuerzo longitudinal en la estructura del Palacio Municipal de Armenia, Colombia, 1999	273
Imagen 5.5	Falla por cortante en una columna. Estribos insuficientes, pandeo del refuerzo longitudinal y hormigón de baja calidad. Armenia, Colombia, 1999.....	275
Imagen 6.1	Falla por cortante en un nudo de esquina. Armenia, Colombia, 1999	305
Imagen 6.2	Falla en un nudo de esquina por falta de confinamiento y mala calidad del hormigón. Armenia, Colombia, 1999.....	320

