

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_t , 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 traslapo 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 traslapo 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 aporticadas 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_j , 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

Capítulo 1

Fundamentos del diseño sísmico de edificios

1.1 Aspectos generales del diseño sísmico

Todo proyecto se inicia con la identificación de una necesidad que requiere algún tipo de construcción para ser satisfecha y con la realización del estudio socioeconómico que demuestre su factibilidad.

El lugar donde se construirá la nueva edificación no suele estar en discusión, aunque sea en una zona de alta sismicidad. Toda edificación debe diseñarse y construirse con especificaciones que ofrezcan garantías en cuanto a su seguridad, funcionalidad, estética, factibilidad y economía.

Tomada la decisión de construir, se elabora un anteproyecto arquitectónico del edificio que considere todos los aspectos económicos y funcionales que llevaron a esa decisión. A partir de esta etapa debe intervenir un equipo multidisciplinario que colabore con el arquitecto, quien debe tener muy en cuenta, desde que empieza a desarrollar sus ideas, las restricciones impuestas por las instalaciones y equipos que requiere la operación del edificio y, sobre todo, la necesidad de contar con una estructura, indispensable para dar forma a la construcción, crear los espacios que la constituyen y soportar, segura y económicamente, las cargas y acciones de otros tipos que actuarán sobre ella durante toda su vida útil.

La seguridad de una edificación es el factor más importante, y está relacionado con la capacidad de la estructura para resistir las cargas o solicitaciones máximas posibles que puedan ocurrir durante su vida útil, sin incurrir en daños excesivos o en colapso parcial o total de la edificación.

Hay varios tipos de funcionabilidad, las más importantes son la arquitectónica y la estructural. La funcionabilidad arquitectónica está ligada a su función misma como edificio y a sus aspectos estéticos, que suponen una configuración o distribución de espacios y formas agradables

con el fin de crear un ambiente positivo y productivo para la comunidad en la cual está localizado y para los usuarios que hacen uso directo de él.

La funcionabilidad estructural, por su parte, se relaciona con las limitaciones por las deformaciones, el fisuramiento y la vibración de los elementos estructurales, de ella depende que durante su servicio normal, la edificación no dé la impresión de haber perdido su valor, porque se considera insegura y poco comfortable.

Esta clase de funcionabilidad representa la respuesta de la edificación durante su vida útil, cuando es sometida a las cargas o sollicitaciones normales; mientras que la seguridad estructural se refiere al comportamiento de la edificación durante su vida total (incluyendo el tiempo de construcción, uso, reparaciones, etc.) cuando se somete a cargas excesivas, como son las cargas vivas altas, las laterales de sismos destructivos y las de vientos de alta velocidad.

La factibilidad y economía de una edificación no solamente depende de la disponibilidad de capitales, la localización, las condiciones de soporte y fundaciones, los recursos de materiales y las características arquitectónicas sino también de su importancia (socio económica-cultural) en la comunidad y de los niveles de seguridad y funcionabilidad requeridos.

Por otro lado, la configuración de una edificación, y sus detalles arquitectónicos y estructurales, son factores determinantes en su comportamiento e influyen en la manera como las fuerzas sísmicas se distribuyen en su altura, en la intensidad de esas fuerzas y en la interacción entre los miembros.

Una vez elegida una configuración deficiente, puede ser difícil obtener un edificio sano, aunque el diseño estructural sea correcto. No sólo el ingeniero estructural, sino también el arquitecto, deben estar familiarizados con los efectos que las características de los materiales, la configuración geométrica y la distribución de elementos de carga y de rigidez tienen sobre el comportamiento sísmico de los edificios. Y los dos deben estar conscientes de la responsabilidad que comparten.

Los arquitectos e ingenieros responsables de la creación de una edificación deben comunicarse e interactuar desde el anteproyecto, durante la construcción y hasta la aceptación de la obra para lograr un diseño sismo resistente efectivo y al mismo tiempo un sistema estructural adecuado que permita la funcionabilidad y estética arquitectónica de la edificación.

1.2 Filosofía del diseño sísmo resistente

En los países donde el riesgo sísmico es alto —como en los países del cinturón del Pacífico, del sur de Europa y de Asia— el diseño apropiado para resistir las cargas inducidas por terremotos es de vital importancia en cualquier edificación. Los investigadores y profesionales suelen estar de acuerdo en los siguientes criterios de diseño que permiten definir conceptualmente la acción sísmica:

- Las estructuras deben resistir, en el rango lineal elástico, todos aquellos sismos de intensidad reducida que ocurran durante su vida útil.
- Las estructuras deben resistir, sin daños significativos —aunque admitiendo que se podría comportar de manera no lineal—, todos aquellos sismos de intensidad moderada que ocurran durante su vida útil. Se permiten daños menores como algún fisuramiento a flexión en el hormigón y pequeñas incursiones de fluencia del acero de vigas y losas, o fallas en los elementos no estructurales cuya reparación económica sea rápida y factible.
- Las estructuras deben resistir, en el rango no lineal, un sismo severo que ocurra una sola vez durante su vida útil. Se admiten daños significativos en los elementos estructurales, aunque no el colapso de la estructura. El nivel permitido de daños depende de la importancia de la edificación: si una edificación es vital para la supervivencia de la comunidad, como lo son los hospitales, centros de salud, plantas de energía, agua, teléfonos, etc., el nivel permitido de daños debe ser mínimo, para así garantizar su funcionamiento después de la ocurrencia de sismos destructivos.

La norma colombiana NSR-10, en el párrafo del Artículo 1° expresa que:

Una edificación diseñada siguiendo los requisitos consagrados en las normas que regulen las construcciones Sismo Resistentes, debe ser capaz de resistir, además de las fuerzas que le impone su uso, temblores de poca intensidad sin daño, temblores moderados sin daño estructural, pero posiblemente con algún daño en elementos no estructurales y un temblor fuerte con daños a elementos estructurales y no estructurales pero sin colapso.

No existe, sin embargo, un claro consenso sobre qué se entiende por sismo de intensidad reducida, moderada o severa, pues existen varios factores que los determinan, como localización geográfica, calidad y tipo de las construcciones existentes, entre otros. Los anteriores criterios son particularmente difíciles de establecer para estructuras con un comportamiento no lineal, ya que la sollicitación que produce la respuesta más desfavorable es compleja y depende del tipo de estructura. Su objetivo, sin embargo, está cualitativamente especificado y es ampliamente aceptado en el diseño sismo resistente.

Las normas sísmicas actuales prescriben que una estructura sometida a sismos moderados puede experimentar daño estructural reparable, pero no definen claramente el concepto de daño, ni la metodología para su cuantificación.

Con frecuencia las edificaciones sometidas a sismos severos sufren daños significativos, que incluso pueden llegar al colapso total de las mismas. Para el ingeniero estructural es muy importante la predicción y estimación del daño estructural, aunque las normas sísmicas se refieren al daño estructural de manera ambigua y establecen indirectamente las prescripciones para reducirlo, pues sólo propone valores límites para las derivas laterales. Esto, en general, apunta en la dirección correcta, pero una mala distribución de rigideces y resistencias relativas entre vigas y columnas puede cumplir los límites de desplazamiento establecidos por ella sin reducir el nivel de daño esperado. En consecuencia, es más racional limitar el daño en forma cuantitativa.

Futuras ediciones de las normas sismo resistentes deben incluir definiciones precisas del daño estructural, así como recomendaciones sobre métodos idóneos para su cuantificación y, más aún, valores límites de daño como requerimiento de un buen diseño.

1.3 Sollicitaciones sísmicas

El objeto de una construcción urbana es crear espacios en los que se viva y trabaje en condiciones adecuadas de seguridad y confort. Para ello, la estructura debe tener:

- *Resistencia* suficiente para soportar la combinación de efectos producidos por cargas verticales, de viento o sismo.

- *Rigidez* adecuada para que sus deformaciones, bajo esos efectos, no sean excesivas, con lo cual se evita el pánico entre los ocupantes –al menos en temblores de baja intensidad–, se reducen los daños en elementos no estructurales y en instalaciones, y se regulan los efectos de segundo orden, provenientes de la interacción de cargas verticales y desplazamientos horizontales, que pueden influir de manera significativa en la resistencia de estructuras flexibles y propiciar inclusive fallas por inestabilidad.
- *Ductilidad* suficiente para que en caso de que las cargas del sismo llegasen a superar los valores estimados para el diseño, la estructura se deforme en el rango inelástico, con graves daños en los elementos tanto estructurales como no estructurales, pero sin colapsar.

Las cargas muertas y vivas se determinan, en general, con relativa precisión. En cambio, las incertidumbres relativas a las acciones producidas por viento y sismo son muy grandes, pues se trata de fenómenos naturales que el hombre no controla. Sin embargo, los vientos intensos son frecuentes y se conoce mucho sobre ellos, lo que permite determinar sus valores de diseño de manera confiable; mas no sucede lo mismo con los sismos, cuyas intensidades y características son impredecibles.

Buena parte de las incertidumbres del diseño en zonas sísmicas, que hace que difiera de todos los problemas restantes de diseño estructural, proviene del desconocimiento de las acciones máximas a que puede verse expuesta la construcción.

La base del diseño sísmico de los edificios no es el temblor más intenso que deberán resistir, que no se conoce, sino los sismos que han afectado en el pasado el lugar donde se construirán. Como la información cuantitativa que se posee es muy limitada –de unas cuantas décadas, a lo sumo, que son un instante en la vida de nuestro planeta– poco se sabe acerca del temblor de diseño.

La intensidad probable del temblor de diseño depende también del período de retorno que se considere, relacionado con la vida útil de la construcción; aquí se origina otra fuente de incertidumbre, pues los edificios no se demuelen cuando termina su vida útil de diseño sino que se conservan hasta que dejan de ser convenientes económicamente.

La ingeniería estructural en zonas sísmicas se enfrenta con un problema que, aparentemente, no tiene solución: seleccionar sistemas es-

tructurales y dimensionar los elementos que los componen, para que resistan solicitaciones desconocidas, por medio de mecanismos de respuesta que tampoco se comprenden por completo.

La amplitud y el contenido de las frecuencias de las ondas que produce un sismo en un sitio dado dependen de las características de la ruptura de la zona de falla, de la magnitud del sismo, de la distancia entre ese sitio y la zona donde se generó, de las propiedades mecánicas del medio que atraviesan para llegar al sitio, y de las características del suelo en éste. Puede haber amplificaciones y atenuaciones de ondas de determinadas frecuencias cuando pasan por estratos de suelos con ciertas propiedades, con lo que aumenta o disminuye la amplitud de los movimientos, y su frecuencia varía.

Como las ondas que originan el movimiento del suelo en que se desplanta una construcción provienen de la zona de ruptura de una falla, llegan al edificio con una dirección determinada, pero las características de esas ondas, su interacción y los efectos locales, geológicos y topográficos, hacen que el movimiento real del suelo resulte aleatorio, predominantemente horizontal, con algún énfasis direccional, y con un componente vertical, en las zonas cercanas al epicentro, que puede ser importante. En lo que se refiere a un edificio determinado, los efectos de un temblor se ven afectados por las características de las construcciones vecinas, su geometría, masa y tipo de cimentación.

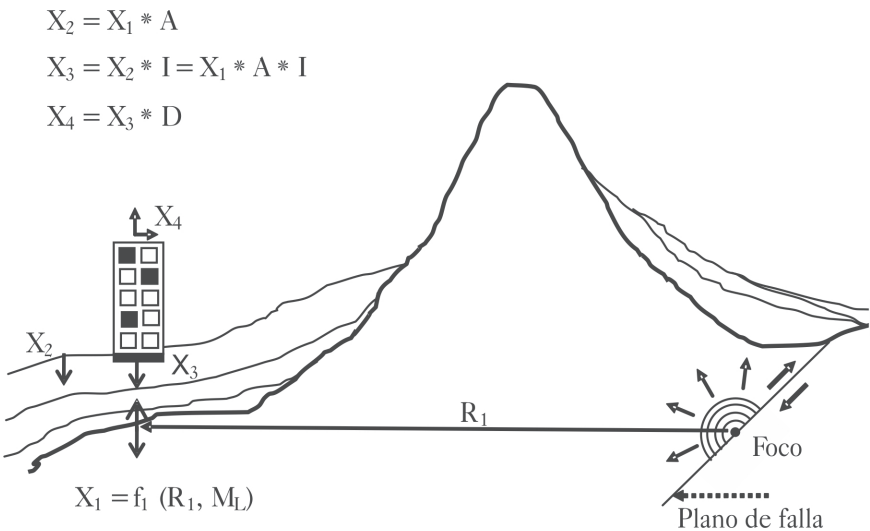
Por su parte, el estudio de los mecanismos que originan los terremotos, y de cómo se transmiten sus efectos al terreno que rodea a la zona de ruptura, no les corresponde a los ingenieros estructurales, sino a los geofísicos, geólogos y sismólogos. En diversas instituciones de investigación, profesionales y oficiales, existen organismos que realizan los estudios de sismología, sismicidad y riesgo sísmico, necesarios para determinar las acciones de diseño que se mencionan anteriormente; estos estudios se ponen en conocimiento de los ingenieros que proyectarán las estructuras por medio de un reglamento de construcciones, de carácter legal y obligatorio. Toda la información obtenida mediante estudios laboriosos y complicados, realizados a lo largo de años de mediciones de temblores reales, de interpretación de la información obtenida y de desarrollo y aplicación de complejos y elegantes modelos matemáticos, se reduce a dos datos principales, en los que se basa el diseño estructural: el coeficiente sísmico y el espectro de diseño.

El coeficiente sísmico, C_s , es un índice de la acción de diseño; es la base de los espectros de diseño y se usa directamente para evaluar, con métodos estáticos, las acciones horizontales que habrán de ser resistidas por la estructura.

1.4 Amenaza sísmica

Por amenaza sísmica de una zona se entiende cualquier descripción de los efectos provocados por los terremotos en el suelo de dicha zona (Udías y Mezcuá, 1986; Bertero, 1992). Estos efectos pueden ser representados mediante la aceleración, la velocidad o el desplazamiento sísmico del terreno. Para evaluar la amenaza es necesario analizar los fenómenos que ocurren desde la emisión de las ondas sísmicas en el foco, hasta que dichas ondas alcancen la zona en estudio.

Figura 1.1 Propagación de la energía sísmica desde el hipocentro o foco hasta la estructura*



*Todas las figuras, imágenes y tablas fueron elaboradas por el autor; con excepción de la Figura 1.8

En la Figura 1.1 se observa el mecanismo de propagación de la energía de un sismo desde el epicentro hasta la base de una estructura. Cuando se produce un terremoto con determinadas características (pro-