

MONOGRAFÍA

35

M

**PROYECTO DE
ESTRUCTURAS DE
HORMIGÓN EN ZONA SÍSMICA**

Grupo de Trabajo G.T. I/3
Proyecto de estructuras de
hormigón armado en zona sísmica
Comisión 1 “Proyecto”

Aunque la Asociación Española de Ingeniería Estructural (ACHE) ha hecho un gran esfuerzo por asegurar que toda la información contenida en este documento es correcta y precisa, ACHE, sus miembros y sus trabajadores no aceptan responsabilidad alguna por daños y/o perjuicios de cualquier clase que pudiera originar el uso y aplicación del contenido de esta publicación. Las publicaciones de ACHE están redactadas para ser utilizadas por técnicos con capacidad para evaluar su contenido y por tanto cada lector asume la responsabilidad del uso de la información incluida en el presente documento. Todos los derechos reservados. Ninguna parte de esta publicación puede reproducirse o distribuirse de ninguna forma, ni por ningún medio sin la previa autorización por escrito de ACHE.

Edita: ACHE (Asociación Española de Ingeniería Estructural)

I.S.B.N. 978-84-89670-89-1

Trabajos editoriales: CINTER Divulgación Técnica

Prólogo

Por iniciativa de la Comisión I de ACHE presidida por Juan Carlos Arroyo se propuso la creación del grupo de trabajo GT I/3 “Proyecto de Estructuras de hormigón en zona sísmica”. Este grupo de trabajo inició su trabajo en 2003 bajo la coordinación de José Romo, con el objetivo de recoger en un documento una información actualizada que facilitara el proyecto de estructuras situadas en zonas sísmicas. Tras la redacción de un primer borrador, la aparición de nuevas normas de sismo tanto nacionales como internacionales hizo que el trabajo del grupo se dilatase, perdiendo el impulso inicial. En 2015, la Comisión I de ACHE consideró que disponer de un documento actualizado sobre el proyecto de estructuras en zona sísmica seguía siendo del máximo interés para los proyectistas y contratistas y encargó a Guillermo Ayuso la reactivación del grupo de trabajo para completar el borrador existente. El resultado es esta monografía en la que el lector encontrará una visión amplia, pero a la vez práctica y aplicada, de los conceptos, métodos de cálculo, normativa de aplicación y recomendaciones para el proyecto de Estructuras de Hormigón en Zona Sísmica. Prueba de ello es que el documento dedica una parte importante de su extensión a exponer ejemplos de casos prácticos de edificios, puentes, tanques y elementos no estructurales, que pueden ser de gran utilidad para los proyectistas. Para la elaboración de esta monografía se ha contado con la colaboración de un colectivo de expertos que generosamente ha dedicado tiempo y esfuerzo para plasmar de forma ordenada su conocimiento y experiencias prácticas de proyecto en un documento. A todos ellos quiero expresar mi agradecimiento, especialmente a su coordinador, Guillermo Ayuso, por su incansable impulso para llevar adelante esta tarea. Por último, también quiero agradecer a los miembros de la Comisión I de ACHE la labor de revisión de este documento y a Calter Ingeniería las gestiones realizadas para la cesión de licencias del programa SOFiSTiK que ha sido utilizado para la elaboración en gran parte de los ejemplos prácticos incluidos en el documento.

Pedro Miguel Sosa

Presidente de la Comisión I “Proyecto” de ACHE

Presentación

Esta monografía que se presenta “Proyecto de estructuras de hormigón en zona sísmica” quiere acercar el cálculo bajo la acción sísmica de los tipos de estructuras más comunes que nos podemos encontrar en el día a día, tales como edificios, puentes y tanques. El esquema de ésta se ha realizado con la intención de que los capítulos se puedan leer de forma independiente, al entender que es la manera más adecuada para su uso. No quiero dejar de reconocer la ayuda de Alejandro Pérez Caldentey a María Fernanda Defant por sus valiosas aportaciones al capítulo de puentes.

Quiero agradecer a José Romo todo el trabajo realizado en la primera etapa del grupo y sin el cual no habría sido posible este documento. También quiero agradecer a todos los miembros del grupo a los que “engañé” para continuar con el trabajo, finalizar este documento no habría sido posible sin la ayuda de ellos.

Como coordinador de este grupo de trabajo quiero dar las gracias a todos los miembros que han participado desde la constitución de éste. Muchos no pudieron continuar en el grupo por motivos profesionales pero ayudaron en la búsqueda de nuevas personas que pudiesen incorporarse al grupo. También quiero agradecer de forma especial a SOFiSTiK la cesión de forma gratuita de licencias completas de su software con el cual ha sido posible desarrollar muchos de los ejemplos mostrados en esta monografía. En la obtención de estas licencias quiero mencionar a Valentín Alejándrez (Calter Ingeniería) por todas las gestiones que realizó y su gran ayuda en este apartado.

Finalmente, como coordinador y representante del grupo de trabajo esperamos que esta monografía muestre la ilusión que todos los miembros hemos puesto en la redacción de la misma y que sea de gran utilidad.

Guillermo Ayuso Calle

Coordinador del grupo de trabajo GT I/3.

Proyecto de estructuras de hormigón en zona sísmica

Grupo de trabajo

La redacción de este documento ha sido coordinada por Guillermo Ayuso Calle (Carlos Fernández Casado S.L.) y los miembros que han participado activamente en la redacción del documento se listan a continuación:

- *María José Crespo (Principia)*
- *Andrés Sáez Pérez (Universidad de Sevilla)*
- *Antonio Tomás Espín (Universidad Politécnica de Cartagena)*
- *María Fernanda Defant Erimbaue (Parsons Corporation)*
- *Patricio García (ARUP)*
- *Juan Lostao*
- *Carlos Molina Hutt (University College London)*
- *Elizabeth Stocks (ARUP)*
- *Santiago Guzmán Gutiérrez (Técnicas Reunidas)*
- *Adrián Seoane Lista*
- *Antonio Romero Ballesteros (FHECOR)*
- *Javier Sáez del Cerro (FHECOR)*
- *Fernando Gómez Martínez (Universidad de Granada)*

Índice

1	Introducción al cálculo sísmico	11
1.1	Conceptos básicos	11
1.1.1	Caracterización de terremotos	11
1.1.2	Sismicidad	17
1.1.3	Peligrosidad sísmica	26
1.1.4	Probabilidad de excedencia y probabilidad de colapso	31
1.2	Definición en el dominio de la Frecuencia: Espectros	32
1.2.1	Medición del contenido de frecuencias de un terremoto	32
1.2.2	El espectro de respuesta para diseño	35
1.3	Definición en el dominio del Tiempo: Acelerogramas	40
1.3.1	Definición de acelerograma	40
1.3.2	Generación de acelerogramas	42
1.4	Bibliografía	42
2	Métodos de cálculo	45
2.1	Métodos de análisis en la normativa	45
2.2	Métodos de análisis en el eurocódigo 8	46
2.3	Método del espectro de respuesta	49
2.3.1	Introducción	49
2.3.2	Sistemas de un grado de libertad	49
2.3.3	Estructuras con varios grados de libertad	58
2.4	Análisis estático no lineal (empuje incremental)	70
2.4.1	Origen y evolución	70
2.4.2	Análisis estático no lineal en el Eurocódigo 8	72
2.5	Análisis dinámico no lineal	80
2.5.1	Ámbito de aplicación	80
2.5.2	Obtención de la respuesta sísmica mediante análisis dinámico no lineal	81
2.5.3	Algoritmos β -Newmark para la integración directa de las ecuaciones del movimiento	81
2.6	Conclusiones	83
2.7	Bibliografía	85
3	Puentes	89
3.1	Introducción	89
3.2	Los puentes como sistemas de un grado de libertad	90
3.3	Análisis de las configuraciones típicas de los puentes	91
3.4	Comportamiento sísmico del puente	95
3.4.1	Comportamiento esencialmente elástico	96
3.4.2	Comportamiento Dúctil	96
3.4.3	Rocking. Ductilidad geométrica (o libro de park paulay - falta referencia a la monografía del EC8)	96

3.4.4	Aislamiento sísmico	97
3.5	Detalles constructivos	97
3.6	Bibliografía	102
4	Edificios	103
4.1	Introducción y marco normativo	103
4.2	Acción sísmica en edificios	104
4.2.1	El fenómeno sísmico en edificios	104
4.2.2	Fuerzas Horizontales Equivalentes	105
4.2.3	Espectros	105
4.2.4	Acelerogramas	107
4.2.5	Sismos considerados y factor de importancia	108
4.2.6	Amortiguamiento	110
4.3	Desempeño sísmico y criterios de aceptación	111
4.3.1	Objetivos de desempeño sísmico	111
4.3.2	Límites de desplome local (drift)	114
4.3.3	Límites de rotaciones	115
4.3.4	Método del factor "m"	116
4.4	Disipación, Sobrerresistencia y Jerarquía de Fallo (diseño por capacidad)	116
4.4.1	Rótulas plásticas	117
4.4.2	Niveles de disipación y Categoría Sísmica	120
4.4.3	Elementos que mantienen un comportamiento elástico	121
4.5	Configuración del edificio	123
4.5.1	Simetría e Irregularidades	123
4.5.2	Tamaño de juntas	124
4.5.3	Otros problemas específicos	125
4.6	Método de Cálculo, Análisis y Dimensionamiento	126
4.6.1	Elección del Método de Cálculo	126
4.6.2	Análisis lineal mediante fuerzas equivalentes	127
4.6.3	Análisis lineal mediante espectros de respuesta	130
4.6.4	Empuje incremental (Pushover)	130
4.6.5	Análisis dinámico no lineal	131
4.6.6	Otros aspectos a considerar	131
4.6.7	Combinaciones de cargas	133
4.7	Requisitos y detallado para Pórticos	134
4.7.1	Disipación Baja (denominada ductilidad baja según NCSE-02)	138
4.7.2	Disipación Media (denominada ductilidad alta según NCSE-02)	139
4.7.3	Disipación Alta (denominada ductilidad muy alta según NCSE-02)	150
4.7.4	Tablas resumen	161
4.8	Requisitos y detallado para Muros de Cortante y vigas de acople	163
4.8.1	Disipación Baja	164
4.8.2	Disipación Media (denominada ductilidad alta según NCSE-02)	165
4.8.3	Disipación Alta (denominada ductilidad muy alta según NCSE-02)	169
4.9	Requisitos y detallado para sistemas duales	175
4.10	Elementos secundarios	175
4.11	Requisitos y detallado de diafragmas	176
4.11.1	Función de los Diafragmas	176
4.11.2	Modelización y Diseño	177
4.11.3	Requisitos de la NCSE-02 y Anejo 10 de la EHE-08	181

4.11.4	Requisitos de Eurocódigo	181
4.11.5	Requisitos Normativa Norteamericana	182
4.12	Cimentaciones	182
4.12.1	Tratamiento de la acción sísmica en cimentaciones	182
4.12.2	Tipologías	183
4.12.3	Vigas de atado	184
4.12.4	Licuefacción	184
4.12.5	Interacción suelo-estructura	185
4.13	Bibliografía	186
5	Aislamiento sísmico	189
5.1	Introducción	189
5.1.1	Aislamiento sísmico	189
5.1.2	Principales dispositivos de aislamiento y disipación	194
6	Elementos no estructurales	199
6.1	Elementos no estructurales en edificaciones	199
6.2	Introducción	199
6.3	Elementos no estructurales: daños y consecuencias	202
6.4	Normativa de diseño	206
6.4.1	Normativa europea	208
6.4.2	Normativa americana	209
6.5	Elementos significativos	213
6.6	Muros de fábrica no portantes	216
6.7	Ejemplos de cálculo	219
6.7.1	Diseño de un equipo de acuerdo a la ASCE 7	219
6.7.2	Diseño de un equipo de acuerdo al EC8	220
6.7.3	Diseño de un muro de fábrica	222
6.8	Bibliografía	224
7	Tanques	225
7.1	Introducción	225
7.2	Tanque circular de paredes rígidas	226
7.2.1	Presión impulsiva	227
7.2.2	Presión convectiva	229
7.2.3	Altura de ola	233
7.2.4	Efecto de la inercia en el tanque	234
7.2.5	Componente vertical	234
7.2.6	Combinación de acciones	235
7.3	Tanque circular de paredes flexibles	236
7.3.1	Período impulsivo	237
7.3.2	Período convectivo	237
7.3.3	Factores de amortiguamiento	238
7.3.4	Respuesta ante sismo horizontal	238
7.3.5	Efecto de la aceleración vertical	239
7.4	Interacción suelo-estructura	242
7.5	Otras tipologías	243
7.5.1	Tanque rectangular	243
7.5.2	Tanque elevado	244

7.5.3	Tanque aislado sísmicamente	245
7.6	Ejemplo de aplicación	246
7.6.1	Períodos naturales	246
7.6.2	Espectro de cálculo	250
7.6.3	Respuesta sísmica	252
7.6.4	Altura de ola en la superficie libre	254
7.6.5	Comprobación de estabilidad	254
7.6.6	Presiones hidrodinámicas y esfuerzos en pared	255
7.6.7	Interacción suelo-estructura	264
7.7	Bibliografía	266
7.8	Notación	267
7.9	Anexos	271
7.9.1	Anexo 1	271
7.9.2	Anexo 2	272
7.9.3	Anexo 3	275
8	Manual de puentes	277
8.1	Introducción	277
8.2	Caso práctico de estudio	277
8.2.1	Descripción de la estructura y definición de las variables iniciales	278
8.2.2	Propiedades mecánicas	279
8.2.3	Cargas consideradas	284
8.2.4	Coeficiente de comportamiento	295
8.3	Estimación de los esfuerzos en base de pilas debidos a la acción sísmica	298
8.3.1	¿Qué debemos comprobar?	298
8.3.2	Ejemplo de aplicación. Puente apoyado	299
8.3.3	Ejemplo de aplicación. Puente empotrado en pilas	301
8.4	Resultados obtenidos y comparación con los obtenidos de forma aproximada	304
8.4.1	Modos de vibración	304
8.4.2	Masa movilizada	312
8.4.3	Esfuerzos en ELA sismo	313
8.4.4	Comparación de esfuerzos en base de pila	325
8.5	Predimensionamiento y resolución de la ecuación diferencial con amortiguadores	328
8.5.1	Características de los amortiguadores	328
8.5.2	Planteamiento del problema	329
8.5.3	Métodos de resolución de la ecuación diferencial	330
8.5.4	Ejemplo de predimensionamiento	335
8.6	Cálculo de un puente con amortiguadores	346
8.6.1	Problemática	346
8.6.2	Procedimiento a emplear	346
8.6.3	Ejemplo	347
8.7	Bibliografía	371
9	Manual de edificios	373
9.1	Introducción y alcance	373
9.2	Descripción del edificio y acciones	373
9.2.1	Descripción del edificio	373

9.2.2	Acciones	375
9.2.3	Combinación de diseño en situación sísmica	377
9.3	Modelo estructural	378
9.3.1	General	378
9.3.2	Ancho efectivo de las vigas	379
9.3.3	Criterio de regularidad en planta	380
9.3.4	Criterio de regularidad en alzado	380
9.4	Esquema resistente frente a sismo y ductilidad	380
9.4.1	Factor de comportamiento según tablas	380
9.4.2	Cálculo manual de la ductilidad	381
9.5	Método simplificado de fuerza lateral equivalente	388
9.5.1	Periodo fundamental de vibración	388
9.5.2	Cortante en la base	389
9.5.3	Distribución de fuerzas horizontales en altura	389
9.6	Método modal espectral	390
9.6.1	Consideraciones	390
9.6.2	Periodos y masas efectivas	390
9.6.3	Efectos torsionales accidentales	392
9.6.4	Cortantes	392
9.6.5	Desplazamientos	394
9.6.6	Criterio de daño en servicio	394
9.7	Método de empuje incremental (pushover)	395
9.7.1	Introducción	395
9.7.2	Modelo de cálculo	397
9.7.3	Definición de materiales. Comportamiento no lineal	398
9.7.4	Rótulas plásticas	400
9.7.5	Acciones	405
9.7.6	Cálculo del desplazamiento objetivo sismo 475 años	405
9.7.7	Cálculo desplazamiento objetivo sismo 2475 años	412
9.7.8	Resultados del análisis pushover X. Sismo 475 años	414
9.7.9	Resultados del análisis pushover Y. Sismo 475 años	417
9.7.10	Resultados del análisis pushover X. Sismo 2475 años	420
9.7.11	Resultados del análisis pushover Y. Sismo 2475 años	421
9.7.12	Resumen de resultados	423
9.8	Método de diseño prestacional (performance based design)	423
9.8.1	Introducción	423
9.8.2	Acelerogramas. Escalado	424
9.8.3	Criterios de aceptación de la estructura (Life Safety y Collapse Prevention)	430
9.8.4	Resultados del análisis PBD en dirección X (sismo 475 años)	430
9.8.5	Resultados del análisis PBD en dirección Y (sismo 475 años)	435
9.8.6	Resultados del análisis PBD en dirección X (sismo 2475 años)	440
9.8.7	Resultados del análisis PBD en dirección Y (sismo 2475 años)	442
9.9	Bibliografía	444