

ACADEMIA DE CIENCIAS FÍSICAS MATEMÁTICAS Y NATURALES

Diseño Sismorresistente

ESPECIFICACIONES Y CRITERIOS EMPLEADOS EN VENEZUELA

Edición Conmemorativa del terremoto del 29 de julio de 1967

José Grases G. (Coordinador)

Una contribución al Decenio de
las Naciones Unidas para la Reducción de
las Catástrofes Naturales (1990 - 2000)

Caracas, Julio 1997

NOTA DEL COORDINADOR

Salvo los inevitables cambios para uniformar la presentación y enumeración de Secciones, las contribuciones que conforman las dos Primeras Partes de este libro se reproducen respetando el texto original de sus autores. Se ha hecho lo posible, para que los documentos que constituyen la Tercera Parte sean una reproducción fiel del original.

Agradecimiento

La Academia de Ciencias Físicas, Matemáticas y Naturales desea expresar su agradecimiento a los autores y coautores que tan generosamente han contribuido con su valioso aporte, así como a CORPOVEN S.A. Filial de Petróleos de Venezuela, S.A., cuyo apoyo y asistencia ha facilitado grandemente la presente edición.

Han contribuido al coauspicio las siguientes empresas y corporaciones: ASOCIACIÓN VENEZOLANA DE PRODUCTORES DE CEMENTO, CORPOVEN S.A., FONDONORMA-COVENIN, ORGANIZACIÓN PANAMERICANA DE LA SALUD (OPS/OMS), PREMEX S.A., SIDETUR, SOCVIS y UNESCO.

Autores y Coautores

ARNAL, HENRIQUE

Ingeniero Civil (UCV), Profesor Titular de la Universidad Simón Bolívar, Caracas.

AUDEMARD, FRANCK

Ingeniero Geólogo (UCV), Dr C (Univ Montp), Investigador de FUNVISIS, Caracas.

CAVADA, JOSÉ

Ingeniero Geofísico (UCV), Profesor Agregado de la Universidad Central de Venezuela, Caracas.

CASTILLA, ENRIQUE

Ingeniero Civil (Univ Los Andes, Bogotá), M Sc (UCV), Profesor Asociado de la Universidad Central de Venezuela, Caracas.

CELIS, EDUARDO

Ingeniero Civil (UCAB), M Sc (Universiät Hannover), INTEVEP S A., Los Teques.

DE SANTIS, FELICIANO

Ingeniero Geólogo (UCV), Profesor de la Universidad Central de Venezuela, Caracas.

ECHEZURÍA, HERIBERTO

Ingeniero Civil, M Sc (Stanford), Engineer (Post-M Sc, Stanford), Profesor Agregado de la Universidad Simón Bolívar, Caracas.

ESTEVA, LUIS

Ingeniero Civil (UNAM), M Sc (MIT), Dr Ing (UNAM), Investigador del Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México.

GRASES, JOSÉ

Ingeniero Civil (UCV), Dr C (UCV), Profesor Titular de la Universidad Central de Venezuela, Caracas.

GUTIERREZ, ARNALDO

Ingeniero Civil (USM), Profesor de la Universidad Católica Andrés Bello, Caracas

HERNÁNDEZ, JULIO J.

Ingeniero Civil (UCV), M Sc (Cand), Profesor de la Universidad Central de Venezuela, Caracas.

LOBO QUINTERO, WILLIAM

Ingeniero Civil (ULA), M Ing (UNAM), Profesor Titular de la Universidad de Los Andes, Mérida.

LÓPEZ, OSCAR A.

Ingeniero Civil (UCV), M Sc (Berkeley), Ph D (Berkeley), Profesor Titular de la Universidad Central de Venezuela, Caracas.

LUSTGARTEN, PAUL

Ingeniero Civil (RPI), Profesor de la Universidad Central, Presidente de la Academia de Ciencias Físicas, Matemáticas y Naturales (1993-1997).

MALAVAR, ALFONSO

Ingeniero Civil (USM), M Sc (Stanford), Profesor Agregado de la Universidad Católica Andrés Bello, Caracas.

NERI DE TORO, ELINOR

Ingeniero Civil, Universidad Católica Andrés Bello.

OLIVARES, ALBERTO E.

Ingeniero Civil, equivalente a Doctorado en Ciencias Físicas y Matemáticas (UCV), Miembro de Número de la Academia de Ciencias, Físicas, Matemáticas y Naturales

PAGÁ, MANUEL

Ingeniero Civil (ULA), M Sc (UCV), Profesor Agregado de la Universidad del Zulia, Maracaibo.

RENDÓN, HERBERT

Licenciado en Física (UCV), Ph D (UCLA), Investigador de FUNVISIS, Caracas.

RIVERO DE UZCÁTEGUI, IRIA

Ingeniero Civil (ULA), M Sc (Berkeley), Profesor Titular de la Universidad de Los Andes, Mérida.

SINGER, ANDRÉ

Geomorfólogo (Univ Strasb.), Investigador de FUNVISIS, Profesor de la Universidad Central de Venezuela, Caracas.

VELÁSQUEZ, JOSÉ M.

Ingeniero Civil (UCV), Profesor de la Universidad Católica Andrés Bello, Caracas.

Contenido	pág
PRÓLOGO (Paul Lustgarten)	1
NOTA INTRODUCTORIA: LA INGENIERÍA SÍSMICA A FINALES DEL SIGLO XX: EXPERIENCIAS RECIENTES Y RETOS INMEDIATOS (Luis Esteva)	3
PARTE I: TECTÓNICA, PELIGROSIDAD SÍSMICA Y EFECTOS DE SITIO	15
Tema 1. DATOS HISTÓRICOS SOBRE LAS OBSERVACIONES SISMOLÓGICAS Y NORMAS SÍSMICAS EN VENEZUELA HASTA 1967 (Alberto E. Olivares)	17
Tema 2. APORTES DE FUNVISIS AL DESARROLLO DE LA GEOLOGÍA DE FALLAS ACTIVAS Y DE LA PALEOSISMOLOGÍA PARA LOS ESTUDIOS DE AMENAZA Y RIESGO SÍSMICO (André Singer y Franck Audemard)	25
Tema 3. PROSPECCIÓN GEOFÍSICA APLICADA AL RIESGO SÍSMICO (José Cavada)	39
Tema 4. RED SÍSMICA DE VENEZUELA (Herbert Rendón)	51
Tema 5. RED NACIONAL DE ACELERÓGRAFOS (Alfonso Malaver)	59
Tema 6. ACCIONES SÍSMICAS, ESPECTROS DE RESPUESTA, PELIGROSIDAD Y ZONIFICACIÓN (José Grases)	71
Tema 7. EFECTOS DE SITIO (Herberto Echezuría)	91
PARTE II: ANÁLISIS, DISEÑO Y MITIGACIÓN	111
Tema 8. MODELADO ESTRUCTURAL Y MÉTODOS DE ANÁLISIS (Oscar A. López)	113
Tema 9. DESEMPEÑO ESTRUCTURAL Y ESPECTROS DE DISEÑO (Julio J. Hernández)	133
Tema 10. DISEÑO Y DETALLADO DE MIEMBROS Y CONEXIONES EN EDIFICACIONES (Arnaldo Gutiérrez)	163
Tema 11. PUENTES Y TRAMOS ELEVADOS ZONAS CRÍTICAS Y MEDIDAS PREVENTIVAS (William Lobo Quintero)	179
Tema 12. LAS ESTRUCTURAS DE FUNDACIÓN (José M. Velásquez)	197
Tema 13. ASPECTOS GEOTÉCNICOS SOBRE EL DISEÑO SISMORRESISTENTE DE FUNDACIONES, MUROS Y TALUDES (Heriberto Echezuría, Manuel Pagá, Eduardo Celis y Feliciano de Santis)	215
Tema 14. EVALUACIÓN PRE-SÍSMICA DE EDIFICACIONES BAJAS DE CONCRETO ARMADO (Iria Rivera de Uzcátegui)	229
Tema 15. REFORZAMIENTO Y ADECUACIÓN DE EDIFICIOS EXISTENTES (Henrique Arnal y Elinor Neri de Toro)	251
Tema 16. NORMATIVA: ESTADO ACTUAL Y NECESIDADES (Arnaldo Gutiérrez)	271
PARTE III: NORMAS, ESPECIFICACIONES Y RECOMENDACIONES (Anexo Documental)	281
PRESENTACIÓN (José Grases)	283

GLOSARIO	284
NOTACIÓN GENERAL	285
DOCUMENTO A. BARRAS Y ROLLOS DE ACERO CON RESALTES PARA USO COMO REFUERZO ESTRUCTURAL (NORMA COVENIN 316)	291
DOCUMENTO B. CAPÍTULO 18. PRESCRIPCIONES ESPECIALES PARA EL DISEÑO DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES DE EDIFICACIONES ANTISÍSMICAS (NORMA COVENIN-MINDUR, 1753-85)	311
DOCUMENTO C. RECOMENDACIONES PARA EL DISEÑO SISMORRESISTENTE DE EDIFICACIONES DE MAMPOSTERÍA ESTRUCTURAL	333
DOCUMENTO D. ESPECIFICACIONES ANTISÍSMICAS (NORMA COVENIN-MINDUR-FUNVISIS, 1756-82)	347
DOCUMENTO E. NORMA VENEZOLANA PARA EL DISEÑO SISMORRESISTENTE DE PUENTES (PROPUESTA)	393
DOCUMENTO F. GUIA GENERAL PARA LA VERIFICACIÓN SISMICA DE TUBERÍAS	451
DOCUMENTO G. NORMAS DE PROYECTO. ACCIONES DEBIDAS AL SISMO (C.A. METRO DE CARACAS, MINISTERIO DE TRANSPORTE Y COMUNICACIONES)	463
DOCUMENTO H. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS GENERALES DE SUBESTACIONES. CONSIDERACIONES ANTISÍSMICAS (EDELCA)	471
DOCUMENTO I. ESPECIFICACIÓN TÉCNICA SOBRE REQUERIMIENTOS ANTISÍSMICOS (CADAFE)	489
DOCUMENTO J. DISEÑO SISMORRESISTENTE PARA EL SISTEMA ELÉCTRICO (C.A. LA ELECTRICIDAD DE CARACAS)	509
DOCUMENTO K. MÉTODOS y CRITERIOS PARA LA EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE EQUIPOS E INSTALACIONES BAJO SISMO (C.A. LA ELECTRICIDAD DE CARACAS)	535
DOCUMENTO L. DISEÑO ANTISÍSMICO DE INSTALACIONES INDUSTRIALES (NORMA PDVSA JA-221)	569
DOCUMENTO M. DISEÑO ANTISÍSMICO PARA RECIPIENTES VERTICALES, CHIMENEAS Y TORRE (PDVSA JA-222-PR)	587
DOCUMENTO N. DISEÑO ANTISÍSMICO PARA RECIPIENTES, TAMBORES E INTERCAMBIADORES DE CALOR HORIZONTALES (PDVSA JA-223-PR)	597
DOCUMENTO O. DISEÑO SISMORRESISTENTE DE ESTRUCTURAS EN AGUAS LACUSTRES SOMERAS (PDVSA JA-224)	607
DOCUMENTO P. DISEÑO SÍSMICO DE TANQUES METÁLICOS (PDVSA FJ-251)	631
ÍNDICE ANALÍTICO	653

PRÓLOGO

PAUL LUSTGARTEN

Entre las fuerzas destructivas de la naturaleza que más temor producen en el ser humano están, sin lugar a dudas, los sismos. Desde la más remota antigüedad, estos cataclismos han creado pánico y superstición en la gente. El temor a lo desconocido, el no saber lo que va a ocurrir, el estado de impotencia en que nos encontramos durante los temblores, crean psicosis colectivas que necesitan tiempo para ser borradas. El sismo del 29 de Julio de 1967 cuyos 30 años de ocurrido se cumplen ahora, es un ejemplo de lo que acabamos de decir.

La experiencia adquirida con los terremotos sirve para mejorar los conocimientos a usarse en proyectos futuros. El ocurrido hace 30 años fue una lección para la Ingeniería Sísmica nacional y el comienzo de estudios serios en esa disciplina por un grupo de ingenieros jóvenes que hoy ya maduros presentan su experiencia y conocimientos en un libro que patrocina la Academia de Ciencias Físicas, Matemáticas y Naturales en el marco de los Ochenta años de su fundación que coinciden con los Treinta de la ocurrencia del sismo de 1967.

La preparación de un libro es una tarea muy laboriosa y difícil y más en una disciplina que evoluciona rápidamente como es la Ingeniería Sísmica en la cual todo libro tiene tendencia a nacer obsoleto; sin embargo si es escrito por un equipo, con uno o más autores por capítulo, como es nuestro caso, tiende ser menos obsoleto y puede ser producido en un tiempo más corto. La presente edición fue hecha de este modo con colegas que se han mantenido activos en esta disciplina en nuestro país.

Este libro ha sido preparado pensando principalmente en los Ingenieros Estructurales del presente y del futuro. Se intenta llenar un vacío: en un extremo hay libros que cubren excelentemente las áreas teóricas, experimentales y descriptivas de los sismos, y en el otro están los códigos y especificaciones de diseño que especifican criterios a satisfacer, los cuales no resuelven el problema de diseño aún cuando son una buena guía.

Las contribuciones que recoge este libro persiguen facilitar la comprensión de esta última e incluso colocar al profesional en situación de saber cuando ignorar las recomendaciones y por qué. La temática y selección de autores fue decidida por un Comité ad-hoc del seno de la Academia.

Las tendencias recientes en el diseño sismorresistente reflejan un mejor entendimiento sobre las acciones sísmicas esperadas y, como consecuencia de la creciente disponibilidad de computadoras y programas de cálculo automatizado, el uso de análisis más refinados es más frecuente. Por ejemplo, la consideración del comportamiento inelástico, los medios continuos combinados con técnicas de elementos finitos, así como la consideración simultánea de varias componentes del movimiento del terreno hacen que nos aproximemos más a la verdad.

No se pretende que esto sirva para resolver cualquier tipo de estructura, servirá más bien para clarificar el ámbito de aplicación de las Normas y Especificaciones vigentes en el país.

Es ese sentido recoge la experiencia que se ha logrado en el país con posterioridad al terremoto del 29 de Julio de 1967, señalando que se ha hecho un esfuerzo por adecuar la Ingeniería Venezolana a las necesarias acciones preventivas y de mitigación que ofrece esta especialidad.

Este libro aparecen medio siglo después de la primera edición del libro del Doctor Centeno Graü, obra pionera sobre sismología en nuestro país, el cual sigue siendo de consulta obligada para aquellos de deseen analizar con más detalle la historia de los efectos de los terremotos en nuestro territorio.

Con esta edición la Academia pone al servicio de los Ingenieros Venezolanos y a los de habla hispana en general, un compendio de Normas, Especificaciones y Recomendaciones para el diseño y la verificación sísmica de obras de Ingeniería. Esta es una contribución más en la celebración de los 80 años de su fundación.

La consulta del índice analítico, facilita el manejo de la información contenida y ha sido preparado con el mayor nivel de detalle para lograr ese fin.

La Academia desea agradecer la contribución financiera de las diferentes Instituciones, Organismos y Empresas Privadas, lo cual ha hecho posible llevar a feliz término esta iniciativa.

Igualmente, desea dejar constancia de su agradecimiento por la contribución desinteresada de los autores que han dedicado parte de su tiempo en asentar su mejor experiencia en la preparación de los Capítulos que anteceden la compilación normativa.

Merece especial reconocimiento el Prof. Luis Esteva de la Universidad Nacional Autónoma de México, quien ha tenido a su cargo la Nota Introductoria en la cual vierte una vasta experiencia que se inicia desde antes del famoso terremoto de Ciudad de México del 28 de Julio de 1957, exactamente 10 años antes del de Caracas.

Nota Introductoria

LA INGENIERÍA SÍSMICA A FINALES DEL SIGLO XX: EXPERIENCIAS RECIENTES Y RETOS INMEDIATOS

LUIS ESTEVA

Visité Caracas por primera vez en ocasión del evento que cubrió las XII Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural y el III Simposio Panamericano de Estructuras, unos cuantos días antes del terremoto del 29 de julio de 1967. Me impresionaron entonces la abundancia de edificios altos, que destacaban por lo atractivo de su arquitectura y lo audaz de su arreglo estructural. Regresé diez días después del terremoto, con objeto de estudiar sus efectos y obtener enseñanzas útiles en mis responsabilidades de formar ingenieros, realizar investigación y participar en la elaboración de normas y recomendaciones para diseño estructural sismorresistente. Tuve la ocasión de interactuar con mis colegas venezolanos, quienes compartían mis intereses, pero estaban sujetos a las presiones derivadas de sus responsabilidades inmediatas de recomendar medidas de emergencia, además de las de proponer modificaciones a las normas venezolanas de diseño sísmico.

En el curso de los años, he tenido la suerte de interactuar en muchas ocasiones con muchos de los que han orientado los avances de la ingeniería sismorresistente venezolana en los últimos tres decenios. Por ello, cuando fui invitado a escribir esta nota me sentí a la vez halagado y abrumado. Lo primero, por el honor que representa compartir con mis colegas de aquellos primeros años, y con los que se formaron posteriormente, la presentación de este importante documento sobre la evolución de la ingeniería venezolana a partir del evento detonador de 1967; lo segundo, por el reto que implica ofrecer un marco de referencia a los muchos esfuerzos realizados, a los muchos avances logrados y, para ser realistas, a las no pocas lagunas por llenar y problemas por resolver. Concluí que debería tratar de relatar algunos de los eventos más significativos en la asimilación de experiencias derivadas de las observaciones sobre efectos de los temblores sobre las obras de ingeniería durante las últimas décadas, e incluir algunos comentarios sobre las contribuciones de tales experiencias a nuestra comprensión de los problemas de peligro sísmico, de las características del movimiento del terreno, de la respuesta y el comportamiento estructural, así como sobre sus consecuencias en las revisiones a la práctica de la ingeniería sismorresistente. De estas consideraciones resultó el relato que sigue, esquemático y selectivo, tanto por razones de brevedad como por la mayor familiaridad de quien escribe con algunos de los muchos retos de la disciplina que nos ocupa.

MARCO HISTÓRICO

Para varias ciudades latinoamericanas, la segunda mitad del Siglo XX registra los primeros eventos sísmicos que produjeron daños severos generalizados sobre conjuntos de construcciones de características estructurales y arquitectónicas similares a las que son típicas de las ciudades modernas actuales. En la mayor parte de los casos, las normas vigentes eran anticuadas en relación con los conocimientos y las tecnologías disponibles y aplicadas en los países que más atención habían puesto al desarrollo de la Ingeniería Sísmica. Sin embargo, algunos de nuestros ingenieros aplicaban a nuestras construcciones tales conocimientos y tecnologías, adaptados a nuestras condiciones a la luz (o, tal vez, en la penumbra) de la escasa información local disponible, tanto sobre las características probables de los movimientos futuros del terreno, como de los comportamientos de materiales y sistemas estructurales típicos de nuestra región. Los métodos que se aplicaban al análisis de la respuesta estructural variaban entre las sobre-simplificaciones extremas y los métodos más avanzados congruentes con la información y las herramientas de cálculo disponibles.

En este ambiente ocurre el temblor de Caracas del 29 de julio de 1967, con sus sorpresas y enseñanzas, que influyeron decisivamente en el desarrollo de la Ingeniería Sísmica en Venezuela, en Latinoamérica y en el mundo.

La época que quiero reseñar se inicia diez años y un día antes: el 28 de julio de 1957, en la Ciudad de México. Mi crónica será incompleta y sesgada, pues por razones de cercanía, familiaridad y brevedad, describirá principalmente experiencias derivadas de temblores mexicanos, y de nuestros esfuerzos por enfrentarnos a ellos. Creo, sin embargo, que al hablar de los retos inmediatos el panorama que se presenta es válido a escala mundial.

LAS FUENTES DEL RIESGO SÍSMICO

Una parte importante de las pérdidas de vidas y de los costos de daños causados por temblores suele achacarse a reglamentos de construcción obsoletos, descuido en el proyecto estructural, mano de obra deficiente o control de calidad poco estricto. Sería difícil disentir de esta convicción. Sin embargo, la experiencia de las últimas décadas, cuando menos, muestra que esta lista de limitaciones dista de ser exhaustiva. Cada nuevo temblor nos trae nuevas sorpresas o nos muestra nuevas fuentes de incremento a la amenaza, la vulnerabilidad y el riesgo; o simplemente llama nuestra atención sobre conceptos que han pasado inadvertidos, a pesar de su potencial para acrecentar los riesgos.

Los casos de desempeño inadecuado generalizado de grandes números de estructuras diseñadas y construidas respetando los requisitos de normas y reglamentos representativos de las fronteras del conocimiento y de la prácti-

ca son más frecuentes que lo que estamos dispuestos a aceptar. Pueden imputarse a las razones más diversas: o el temblor se originó en una falla hasta entonces desconocida; o su intensidad fue anormalmente elevada, dada la fuente y la trayectoria de las ondas; o el comportamiento de cimentaciones, miembros estructurales o conexiones hizo notoria la existencia de debilidades ocultas o los efectos degradantes de las cargas cíclicas alternantes; o las herramientas convencionales de la ingeniería resultaron inadecuadas para predecir la respuesta dinámica de sistemas irregulares de comportamiento no lineal.

En no pocos casos, las observaciones sobre el comportamiento satisfactorio de algunos sistemas durante temblores severos, pero no extremos, han estimulado el desarrollo de actitudes de confianza, que eventos posteriores han mostrado ser injustificadas.

EXPERIENCIAS RECIENTES: MÉXICO, CARACAS, NORTHRIDGE, KOBE

Consideremos, por ejemplo, la ciudad de México bajo la acción del temblor de Michoacán de septiembre de 1985. Las normas de diseño sísmico que regían entonces se basaban esencialmente en la experiencia adquirida al estudiar las consecuencias del temblor de 1957, en su momento el que mayor devastación había causado en la ciudad. Entre 1957 y 1985 las normas sufrieron dos revisiones (1966, 1976), además de la que se llevó a cabo inmediatamente después del evento de 1957. Durante el mismo lapso ocurrieron varios temblores de intensidad elevada, que produjeron pérdidas económicas moderadas y pocas pérdidas humanas. Se había obtenido un mapa de microzonificación y se había propuesto para cada zona un espectro para diseño sísmico que tomaba en cuenta, o así creíamos, las grandes amplificaciones del movimiento que se presentaban en la superficie de las formaciones arcillosas, excepcionalmente blandas, sobre las que está construida gran parte de la ciudad. Todo contribuía a hacernos creer que habíamos tenido éxito en nuestro intento de producir un reglamento de diseño que tomaba en cuenta los últimos avances en análisis y diseño estructural, y debería llevarnos muy cerca de un equilibrio óptimo entre costos iniciales y riesgos futuros!

El temblor de 1985 destruyó nuestro optimismo. Su magnitud fue la segunda más grande generada en la vecindad de la costa sur de México durante el presente siglo. En dirección de la ciudad de México fue irradiada una cantidad de energía anormalmente alta, aun dada la gran magnitud, en un intervalo de frecuencias que incluye la frecuencia natural de vibración del suelo local en la zona central de la ciudad. El resultado fue una amplificación local excesivamente grande de las ondas que llegaban a la frontera entre roca y suelo, y en consecuencia amplitudes del movimiento del terreno del orden de tres veces mayores a las que se habían estimado para el temblor de 1957; todo esto, a pesar de la gran distancia epicentral del evento de 1985: 360 km.

No sólo aprendimos sobre la posibilidad de experimentar intensidades muy superiores a nuestras estimaciones más pesimistas. Dejando a un lado los muchos casos en los que el daño o la falla podía ligarse directamente a la insuficiente resistencia o a la falta de cumplimiento con los estándares establecidos de diseño y construcción, aprendimos muchas lecciones sobre las discrepancias entre las predicciones de los modelos de ingeniería empleados en la práctica convencional, con criterios actualizados, del diseño sismo-resistente y las respuestas de los sistemas reales. Pudimos identificar, y tal vez comprender, por ejemplo, las influencias que sobre tales discrepancias ejercen ciertos tipos de irregularidades en las distribuciones espaciales de rigideces y resistencias de los miembros estructurales a lo largo de la altura de un edificio. Y aunque al principio nos sorprendía la incapacidad de los métodos más modernos de la práctica para responder a la pregunta de por qué muchas estructuras nominalmente débiles habían sobrevivido, a pesar de la elevada intensidad del movimiento del terreno, terminamos entendiendo que la resistencia y la capacidad de disipación de energía adicionales proporcionadas por muros de relleno y otros elementos no estructurales habían sido determinantes para impedir fallas catastróficas.

El 29 de julio de 1967 ocurrió el temblor de Caracas, con una magnitud de 6.5, a una distancia aproximada de 80 km. Como la ciudad de México en 1957, en 1967 Caracas no tenía antecedentes sísmicos durante la época en que empezó a contar con edificios altos, aunque las crónicas históricas hablan de diez mil muertos durante el temblor del jueves santo de 1812, el que se considera el más grave que ha afectado a Venezuela. Del temblor de 1967 resultaron también muchas lecciones, dada la abundancia de construcciones urbanas importantes que existían en la zona de mayores intensidades, y a la concepción excesivamente audaz de muchas de las estructuras, reflejo de una percepción extremadamente optimista del nivel de peligro sísmico en la región.

Como en la ciudad de México, los daños graves en Caracas se concentraron en una zona reducida. No se obtuvieron registros instrumentales del movimiento del terreno, pero la información geo-estratigráfica del valle de Caracas permitió estimar los periodos locales de vibración del terreno en diversos puntos en el valle, así como los posibles factores de amplificación del movimiento. No fue difícil explicar la concentración del daño en términos de dichos factores de amplificación, así como de la cercanía entre los periodos estimados del terreno en la zona de mayores daños y los de los edificios de diez a quince pisos que ahí predominaban.

La calidad de los materiales y de la ejecución era en general elevada, pero los criterios de diseño sísmico eran en extremo simplistas y liberales. La concepción estructural de los edificios se caracterizaba en general por flexibilidades horizontales excesivas, pronunciadas diferencias entre las capacidades laterales en dos direcciones ortogonales, elevadas relaciones entre altura y ancho mínimo de la base y empleo generalizado de muros de bloques huecos de barro, de comportamiento frágil.

La mayor parte de los daños se asociaban con las peculiaridades citadas: el colapso de cuatro edificios en el mismo barrio residencial, la falla de columnas en los pisos inferiores en tensión o compresión por momento de volteo, así como la profusión de agrietamiento severo y colapso de muros divisorios y de fachada.

En varios casos el comportamiento estructural observado hizo patente la necesidad de considerar explícitamente en el diseño la adopción de factores de seguridad mayores ante fallas frágiles que ante las dúctiles.

También el temblor de Northridge de 1994 fue rico en enseñanzas y nos hizo repasar muchas lecciones previas. Nos recordó, una vez más, los muchos conceptos que aún no entendemos o no podemos predecir. Considerado por algunos como el desastre natural más costoso de la historia de los Estados Unidos, se originó en una falla de compresión que no había sido identificada. Su magnitud fue moderada, pero dio lugar a valores de la aceleración del terreno cercanos al de la gravedad o superiores a él en muchos sitios sobre el área de ruptura de la falla. Como en el temblor de San Fernando de 1971, la intensidad del movimiento mostró una variabilidad espacial pronunciada, poco correlacionada con las distancias epicentrales. Aunque la influencia de las condiciones locales sobre esta variabilidad es fácil de percibir, la obtención de estimaciones cuantitativas de ella mediante modelos teóricos de ingeniería parece estar fuera de nuestro alcance; sin embargo, las estimaciones futuras de amenaza y riesgo sísmico podrán mejorar sustancialmente cuando se tome en cuenta esta variabilidad, así sea en forma empírica y gruesa. También se beneficiarán tales estimaciones al incorporar los conocimientos adquiridos sobre la influencia de la topografía local y sobre la componente vertical del movimiento del terreno.

Los registros obtenidos para distancias menores de 100 km a la ruptura sismogénica muestran aceleraciones sistemáticamente mayores que las típicas de sismos con mecanismos de fuente similares. Un comentario equivalente a este se presentó antes con respecto a la anormalmente alta energía en bajas frecuencias del temblor de Michoacán de 1985.

Muchas de las lecciones de Northridge sobre vulnerabilidad de estructuras fueron similares a las aprendidas o confirmadas en México en 1985. Otras fueron nuevas, sorprendentes y aun atemorizantes en algunos casos. Sobresale entre estas últimas el descubrimiento de un gran número de casos de daños severos en conexiones soldadas en estructuras de acero y, en consecuencia, de reducciones significativas en su capacidad para soportar temblores futuros.

Como en la ciudad de México, la mayoría de las estructuras dañadas parecieron comportarse de acuerdo con lo que era de esperarse, teniendo en cuenta sus propiedades y la intensidad del temblor, y se presentaron algunos casos en que el daño experimentado superó significativamente al previsible, mientras, por otra parte, pareció sorprendente que no hubiera ocurrido un mayor número de fallas catastróficas.

cia a la fuente; los patrones de directividad en la propagación de las ondas sísmicas no han recibido mucha atención, y los métodos convencionales de la sismología orientada a la ingeniería no pueden predecir la influencia de condiciones locales del suelo o de la topografía en las características espectrales y las duraciones efectivas de registros sísmicos. Enfrentarse a estos problemas es el objetivo de diversos programas de investigación vigentes, y lo seguirá siendo durante algunos años. Los logros alcanzados hasta ahora favorecen una visión optimista: el gran número de registros sismológicos y de movimientos fuertes obtenidos en diversas regiones del mundo durante los últimos años ha permitido avances significativos en nuestro conocimiento, si no en nuestra comprensión, sobre las fuentes sísmicas potenciales, las funciones de atenuación de intensidades y las de la variabilidad espacial del movimiento del terreno, y el desarrollo de herramientas de computadora para simular la generación y propagación de ondas sísmicas ha de calificarse como espectacular y prometedora.

Los párrafos que siguen sobre los avances y retos en la estimación de la amenaza sísmica están sesgados hacia la experiencia mexicana posterior a 1985. Esto es consecuencia únicamente de la mayor familiaridad con ella del autor de esta nota, y no debe entenderse como señal de menosprecio de la importancia de problemas peculiares a otras partes del mundo ni de los esfuerzos que se han dedicado a resolverlos.

Además de lo aprendido a partir de los estudios específicos al temblor de Michoacán de 1985, se ha avanzado considerablemente en el conocimiento de la morfología de la superficie de contacto entre la placa continental en la vecindad de la costa sur de México y los segmentos de la placa del Pacífico que se desplazan por abajo de ella; hemos sido capaces de observar diferencias sistemáticas entre las características de los procesos de ruptura de grandes temblores generados en distintos segmentos de la zona mexicana de subducción; hemos actualizado nuestras estimaciones sobre la extensión y el potencial sísmico de la brecha de Guerrero; y hemos obtenido funciones de atenuación de las amplitudes de los espectros de Fourier de acelerogramas de temblores generados en la zona de subducción citada. Tenemos información sobre aceleraciones máximas en las zonas epicentrales de temblores de gran magnitud. Hemos descubierto amplificaciones importantes de las ondas sísmicas, en un amplio intervalo de frecuencias, en sitios considerados como terreno firme localizados en la zona del cinturón neo-volcánico que cruza México de Este a Oeste en latitudes cercanas a los 19° N. Estas amplificaciones preceden a las asociadas con las formaciones de arcilla blanda típicas del valle de México, y son adicionales a ellas. Así es más fácil entender por qué un temblor de magnitud 8.1 puede producir a 360 km de distancia una intensidad como la experimentada en la ciudad de México en 1985.

Muchos de los retos - y controversias - afrontados por los expertos en Ingeniería Sísmica en el mundo tienen que ver con su habilidad para estimar los efectos de sitio, en particular la influencia de terreno blando. En el valle de

México se instaló un arreglo denso de acelerógrafos (cerca de doscientos, colocados en el terreno, tanto en la superficie como bajo ella, y en edificios) después del temblor de Michoacán, y ha producido varios miles de registros. Simultáneamente, se han desarrollado varios modelos matemáticos bi- y tri-dimensionales que poseen algunos de los rasgos gruesos característicos del valle que pueden afectar significativamente las amplitudes, frecuencias y duración del movimiento del terreno. El proceso de interpretar las observaciones a la luz de los modelos matemáticos ha sido largo y arduo, y aunque sus logros han sido muchos, hubo momentos en que parecía no haber esperanzas.

Se han propuesto, revisado y rechazado muchas hipótesis sobre las fuentes y mecanismos del fenómeno de modificación de las ondas sísmicas, antes de llegar a algunas conclusiones que representan explicaciones razonables de las concordancias y discrepancias entre los modelos y las observaciones. Estas conclusiones distan de ser unánimes, y no son necesariamente aplicables a otros sitios: los espectros de respuesta lineal en la mayoría de los sitios de terreno blando en el valle pueden predecirse empleando el modelo convencional unidimensional de la viga de cortante (esta afirmación probablemente no es aplicable al Valle de San Fernando, en California), pero este modelo no conduce a la larga duración de la fase de alta intensidad, que determina la respuesta máxima de sistemas de ingeniería no lineales típicos. La generación de ondas de cortante a partir de las heterogeneidades laterales de la estratigrafía explica sólo parcialmente las duraciones observadas, y no fue sino en 1993 que, con base en los primeros registros de instrumentos de banda ancha obtenidos en el valle de México y en su vecindad, se concluyó que la prolongada duración del movimiento en sitios de terreno blando se debe probablemente, cuando menos en parte, a un proceso continuo de llegada de ondas al valle; pero tal proceso no había sido identificado en eventos previos por medio de instrumentos convencionales de registro de movimientos fuertes. Esta conclusión explica la larga duración de las codas de los registros, pero su aplicación en conjunto con un modelo unidimensional de la propagación de las ondas sísmicas a través de los mantos blandos conduce a amplificaciones menores que las observadas.

Lo anterior no es más que un vistazo a los logros y a los retos relacionados con la estimación de la amenaza sísmica. En los párrafos que siguen se presenta un vistazo aún más rápido a los problemas relacionados con nuestra capacidad para predecir el desempeño de sistemas de ingeniería cuando se conoce la intensidad de la excitación.

Vulnerabilidad y riesgo

Además de las que se derivan de nuestras grandes incertidumbres con respecto a las características del movimiento del terreno, una parte importante de nuestras dificultades para estimar los índices esperados de desempeño de sistemas de ingeniería ante temblores proviene tanto de nuestro conoci-

miento imperfecto de las leyes que rigen el comportamiento mecánico de materiales y miembros estructurales como de las simplificaciones implícitas en los modelos matemáticos adoptados para predecir la respuesta estructural. Por razones prácticas, hasta ahora el diseño sismorresistente se ha basado en el control indirecto de las variables que determinan el desempeño sísmico: en vez de expresar las decisiones de diseño relacionadas con la seguridad sísmica en términos de las demandas de ductilidad global y local, calculadas mediante análisis de respuesta no lineal que tomen en cuenta las degradaciones de rigideces y resistencias, los criterios de aceptación se expresan en términos de las resistencias requeridas que resultan de un análisis de respuesta lineal, acompañado por un conjunto de especificaciones de distintos tipos, cuya finalidad es asegurar que el sistema de interés cuenta con capacidades adecuadas de deformación dúctil y de disipación de energía. Aunque este criterio ha demostrado ser práctico y razonablemente confiable para el diseño de muchos sistemas regulares - es decir, que poseen propiedades mecánicas (masas, rigideces, factores de seguridad) uniformes o lentamente variables - su aplicación ciega a condiciones más generales ha contribuido a elevar significativamente la vulnerabilidad y el riesgo. Lo mismo es cierto de los criterios de diseño que no aseguran que los modos de falla dúctiles precedan a los frágiles e impidan su ocurrencia.

Abundan en la literatura reseñas de casos que achacan el mal desempeño de algunos sistemas a su irregularidad o al predominio de modos frágiles de falla, pero la importancia del problema no es suficientemente clara para muchos de los proyectistas, y los documentos normativos no siempre incluyen suficientes medidas para evitarlo. La tendencia presente hacia la formulación de las reglas de diseño en criterios de desempeño contribuirá indudablemente a reducir la brecha entre las variables significativas y las que se emplean para controlarlas; pero debe tenerse cuidado para asegurarse de que las estimaciones de las respuestas no-lineales globales y locales tomen adecuadamente en cuenta la influencia de distribuciones irregulares de propiedades mecánicas.

Las extrapolaciones ciegas basadas en el desempeño observado razonable de estructuras diseñadas para coeficientes dados de cortante en la base pueden ser, cuando menos, desorientadoras y, con frecuencia, inseguras. El desempeño satisfactorio de un gran número de construcciones aparentemente demasiado débiles para resistir un temblor de intensidad elevada se explica a veces por la contribución de muros divisorios ligeros y otros elementos no estructurales a la resistencia lateral y a la capacidad de disipación de energía del sistema. La ausencia de estos elementos ha sido determinante del colapso de algunos sistemas de pórticos continuos. Estos casos son relativamente poco numerosos, pero no pueden ignorarse al tratar de calibrar criterios de diseño sísmico con comportamiento observado.

El espectro de posibles modos de falla y daño probablemente no ha sido cubierto exhaustivamente por las observaciones. Las propiedades típicas de

los sistemas estructurales evolucionan con el tiempo, y muchos elementos y conexiones críticas pueden ser propensos a poseer debilidades inherentes que no han sido ni previstas ni descubiertas. Muchas experiencias recientes son testimonio de esto. Controlar esta fuente de riesgo implica por un lado examinar críticamente las soluciones y detalles estructurales que no han sido sujetas a condiciones extremas en temblores previos, a fin de tratar de identificar fuentes potenciales de vulnerabilidad, y por otra parte llevar a cabo los estudios teóricos y experimentales necesarios para evaluar su importancia. De la misma forma, las técnicas no probadas de reparación y rehabilitación deben ser objeto de un estricto escrutinio.

Las consideraciones sobre resistencia sísmica no siempre se encuentran presentes en la selección de equipos o en el diseño de sus anclajes al terreno o a los sistemas estructurales. Tomarlas en cuenta es con frecuencia simple y poco costoso, y sin embargo los costos de los daños - directos e indirectos - que resultan de ignorarlas son en muchas ocasiones muy superiores a los costos de daños a la estructura. El problema no es carencia de tecnología, sino falta de conciencia.

UN VISTAZO AL FUTURO

A lo largo de este escrito, el que escribe ha enfatizado incertidumbres y limitaciones, ha dejado poco espacio a reconocer los avances. Pero las muchas estructuras que han respondido satisfactoriamente a temblores severos atestiguan los logros de la Ingeniería Sísmica en la elevación de la seguridad y el control de los daños. Sin embargo, seguimos diseñando para un temblor único, y aceptamos daños significativos a cambio de reducciones en los costos iniciales y de mantenimiento. El consenso es que debemos y podemos hacerlo mejor.

Los criterios de diseño sísmico basados en índices de desempeño pronto reemplazarán a los basados en requisitos de rigidez y resistencia. Los métodos rutinarios de diseño en la práctica considerarán explícitamente el control de daños en elementos estructurales y no-estructurales, la protección de contenidos y la reducción de pérdidas económicas directas e indirectas. En vez de verificar el cumplimiento de los requisitos de seguridad y desempeño para un temblor único, tomaremos las decisiones de diseño basadas en un análisis de optimización que tome en cuenta la inversión inicial, así como los costos de mantenimiento y los montos de los riesgos durante el ciclo esperado de vida de cada sistema. Estos criterios proporcionarán un marco de referencia para el desarrollo, evaluación y aplicación de soluciones innovadoras, tales como aisladores de base, disipadores de energía y otros dispositivos de control activo y pasivo de la respuesta dinámica.

Los nuevos criterios de diseño nos obligarán a obtener estimaciones razonablemente precisas de demandas de ductilidades, energía disipada y daño

acumulado, tanto a escala global como local, lo mismo en los elementos estructurales como en los no-estructurales. A fin de controlar el daño en equipo y diversos tipos de contenidos, habrá que prestar atención detallada a las aceleraciones locales que los puedan afectar, así como a sus anclajes a la estructura que los aloje. Para lograr esto será necesario mejorar nuestro conocimiento sobre las funciones de respuestas de los elementos en riesgo, y desarrollar herramientas de cómputo eficientes y prácticas.

Los retos que enfrentaremos serán tan demandantes y tan estimulantes como los que continuamente hemos estado afrontando y superando. Como siempre, nuestros esfuerzos deberán ser guiados por nuestra responsabilidad de ayudar a la sociedad a tomar las mejores opciones posibles.

PARTE I

TECTÓNICA, PELIGROSIDAD SÍSMICA Y EFECTOS DE SITIO
