

Análisis de Riesgo en el Diseño de Hospitales en Zonas Sísmicas

Table of Contents

<u>Análisis de Riesgo en el Diseño de Hospitales en Zonas Sísmicas</u>	1
<u>Introducción</u>	1
<u>Principios de ingeniería estructural en zonas sísmicas</u>	3
<u>Problemas de diseño arquitectónico de hospitales en zonas sísmicas</u>	19
<u>Normas de diseño sismorresistente en América latina: limitaciones</u>	35
<u>Concreto armado en zonas sísmicas</u>	53
<u>Reducción de riesgos en componentes no estructurales de los hospitales para casos de terremoto</u>	69
<u>Criterios de diseño de líneas vitales de hospitales en zonas sísmicas</u>	84
<u>Consideraciones sobre seguridad en el diseño sísmico de hospitales</u>	94
<u>Prevención de los incendios en hospitales</u>	106
<u>Métodos de análisis para determinar la resistencia sísmica</u>	121

Análisis de Riesgo en el Diseño de Hospitales en Zonas Sísmicas

La publicación de este módulo educativo ha sido posible gracias al apoyo financiero de la Agencia Canadiense para el Desarrollo Internacional (**CIDA**) y la Oficina de Asistencia al Exterior en Casos de Desastre de la Agencia de los Estados Unidos de América para el Desarrollo Internacional (**OFDA/AID**).

El material presentado en este módulo representa trabajos originales de los autores. Expresan sus opiniones que no reflejan necesariamente los criterios ni la política de la **OPS** ni de los Gobiernos Miembros.

Introducción

La experiencia demuestra que las instalaciones hospitalarias pueden ser afectadas por las acciones sísmicas. En el continente americano algo más de 100 edificaciones hospitalarias han sido afectadas como consecuencia de 11 sismos sucedidos entre 1971 y 1988; de ellos aproximadamente un 20% colapsaron o sufrieron daños irreparables. El mal funcionamiento de estas instalaciones durante sismos intensos ha contribuido a agravar considerablemente las labores de recuperación y atención de heridos post-terremoto.

Para asegurar que las instalaciones hospitalarias mantengan su operatividad en situaciones donde su funcionamiento es vital —durante y con posterioridad a terremotos— es preciso reducir su vulnerabilidad a estas acciones de la naturaleza. Para ello es necesario identificar los problemas que requieren atención, y establecer los correctivos pertinentes.

Tomando en consideración lo anterior, la Organización Panamericana de la Salud ha preparado la presente publicación la cual reúne las contribuciones de especialistas conocedores de los aspectos fundamentales del problema general del desempeño de instalaciones hospitalarias en zonas sísmicas, encaminadas al establecimiento de acciones preventivas. Aun cuando tales contribuciones se han presentado en forma esquematizada y en su mayoría se han ilustrado con casos reales, los temas tratados presentan algunas complejidades inevitables que se reflejan en el texto.

Este Módulo visual intenta cumplir una función importante en los países de la región, al hacer accesible en forma ordenada un conjunto de conocimientos relevantes en una estrategia destinada a mitigar los posibles efectos catastróficos de los terremotos. Pueden así las personas involucradas en la toma de decisiones preventivas, incorporar en sus programas las recomendaciones aquí contenidas. La implementación progresiva en futuros programas pilotos de aplicación, permitirá calibrar la importancia de algunos aspectos no incorporados en el presente Módulo.

La **OPS** desea agradecer la valiosa contribución de todos los autores cuyo trabajo original aparece en esta publicación por haber compartido con nosotros sus ponencias. Merece reconocimiento especial el *Ing. José Grases* quien sirvió de asesor técnico para la **OPS** en la presente edición. El diseño de esta publicación y la composición electrónica por computadora estuvo a cargo de la *Srita. Rosario Muñoz*.

Organización Panamericana de la Salud Agosto 1989

El CISMID nació de la necesidad de hacer frente de manera planificada, a los desastres provocados por fenómenos naturales que afectan al Perú, para tratar de reducir las severas pérdidas causadas por dichos fenómenos, optimizando los escasos recursos humanos y financieros existentes en el país, reforzándolos adecuadamente con ayuda exterior.

Los recientes desastres naturales ocurridos en 1985 en Chile (marzo), México (septiembre) y Colombia (noviembre), las lluvias torrenciales de 1983 y las inundaciones de 1986, dan una idea de la importancia de este Centro de Investigaciones para el Perú y la región.

Creado con el apoyo de la Agencia de Cooperación Internacional del Japón, **CISMID** es un centro académico y de investigación. Difunde los resultados y las técnicas desarrolladas tanto en el Perú como en otros países, con la finalidad de mitigar los efectos de los desastres naturales.

Dr. Rafael Torres
Director, **CISMID**

El proyecto del Centro Peruano–Japonés de Investigaciones Sísmicas y de Mitigación de Desastres se está desarrollando bajo iniciativa del Departamento de Cooperación para el Desarrollo Social de la Agencia de Cooperación Internacional del Japón (**JICA**). Los objetivos de la cooperación técnica son asistir y aconsejar a las contrapartes peruanas en el desarrollo de las actividades que tienen por objeto estudiar, desarrollar y mejorar sistemáticamente tecnologías y técnicas de mitigación de desastres sísmicos en el Perú por medio del envío de expertos japoneses, entrenamiento de las contrapartes peruanas en el Japón, y provisión de equipos para las investigaciones.

Dr. Yuji Ishiyama
Jefe de la Misión Japonesa, **CISMID**

Acerca de los Autores

El Arq. Humberto del Busto es de nacionalidad guatemalteca. Recibió su título de arquitecto en la Facultad de Arquitectura de la Universidad Rafael Landívar de Guatemala, de la cual ha sido catedrático por 14 años. Actualmente ocupa el cargo de Comandante Segundo Jefe del Cuerpo de Bomberos Voluntarios de Guatemala. Además es Gerente General de su propia compañía de consultoría, diseño y construcción. El Arquitecto de Busto está altamente involucrado en el área de preparativos para desastres, especialmente en aspectos de diseño y seguridad de edificaciones. Ha trabajado como asesor de la Organización Panamericana de la Salud, además de hacer asesorías en distintos países de Latinoamérica. También ha participado en seminarios internacionales representando a Guatemala.

El Ing. José Grases, Dr. Sc., de nacionalidad venezolana, recibió su título de Ingeniero en la Universidad Central de Venezuela, en la cual ha sido profesor desde 1960. Durante su ejercicio profesional se ha especializado en la ingeniería sismorresistente, área en la cual cuenta con diversas publicaciones. El Ingeniero Grases fue coordinador de la *Norma para Edificaciones Antisísmicas* vigente en Venezuela y ha contribuido en la elaboración de otras normativas en su condición de miembro de la Comisión de Normas de Estructuras. Actualmente es Presidente de la Sociedad Venezolana de Ingeniería Sísmica y de la recién fundada Red Latinoamericana y del Caribe de Centros de Ingeniería Sísmica (**RELACIS**).

El Ing. Jesús Iglesias, de nacionalidad mexicana, tiene maestría en ingeniería civil de la Universidad Nacional Autónoma de México. En el sector público ha colaborado en diversos proyectos de ingeniería en México como especialista en ingeniería estructural. A nivel académico, se ha desempeñado como profesor en el área de ingeniería estructural en varias universidades e institutos. El Ingeniero Iglesias ha escrito diversos trabajos en revistas y congresos. Actualmente es profesor titular y jefe del Área de Estructuras de Departamento de Materiales en la Universidad Autónoma Metropolitana.

El Dr. Yuji Ishiyama es oriundo del Japón y tiene estudios a nivel de doctorado en ingeniería de la Universidad de Hokkaido, Japón. El Dr. Ishiyama fue becario del Consejo Nacional de Investigaciones de Canadá y es el autor de varias publicaciones. Actualmente, el Dr. Ishiyama es el jefe de la misión japonesa en el Centro Peruano–Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres en Lima, Perú.

El Arquitecto Jorge Quiroz es consultor externa del **CISMID**.

El Prof. Hugo Scaletti, Ph.D. se graduó de la Universidad Nacional de Ingeniería con título de ingeniero civil y donde actualmente es profesor principal e investigador. Recibió Master en Ciencias y Doctor en Filosofía del Instituto Tecnológico de Massachusetts. El Dr. Scaletti es el Director del Proyecto subregional de Promoción Industrial de la Madera para Construcción.

El Dr. David Stewart, de nacionalidad norteamericana, es el Director del Centro para los Estudios Sísmicos de la Universidad del Sureste de Missouri, Estados Unidos. Recibió su doctorado en la especialización de geofísica en la Universidad de Missouri. El Dr. Stewart también ejerce como consultor en sismología para la Agencia de Administración de Emergencias del Estado de Missouri y es expositor en muchos cursos en la Agencia Federal de la Administración de Emergencias (**FEMA**) de los Estados Unidos. Es autor de más de 100 publicaciones sobre diversos temas entre los cuales destacan los terremotos, geología y matemáticas.

El Dr. Rafael Torres obtuvo el título de ingeniero civil en la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería en Lima. Realizó estudios de posgrado en ingeniería civil en Purdue University, Estados Unidos y recibió su Ph.D. en 1977. Actualmente, el Dr. Torres es el Director de **CISMID**. Ha

participado en seminarios y congresos tanto en el Perú como en el extranjero y ha realizado varios trabajos de investigación en el campo de resistencia sísmica. Es autor de varias publicaciones.

Por razones técnicas no ha sido posible reproducir en esta edición la totalidad de las figuras presentadas como ilustración en algunos de los textos. Estos se han reproducido íntegramente y se presentan con el deseo de estimular el intercambio entre profesionales de diferentes especialidades. La OPS desea de esta manera contribuir a alcanzar soluciones en las cuales se reconozca la naturaleza multidisciplinaria del problema del análisis de riesgo en el diseño de hospitales en zonas sísmicas.

Arq. Humberto del Busto
10a. Calle 2-35
Zona 9
Guatemala, Guatemala

Ing. José Grases
Coral 83
1a Ave. Los Palos Grandes
Edificio Coral, No. 83 Caracas, Venezuela

Ing. Jesús Iglesias
Dept. de Materiales
Universidad Autónoma Metropolitana
Unidad Azcapotzalco
Av. San Pablo 180
02000 México, D.F., México

Dr. Yuji Ishiyama
CISMID
Facultad de Ingeniería Civil
UNI – Apartado 1301
Lima 100, Perú

Arq. Jorge Quiroz
CISMID
Facultad de Ingeniería Civil
UNI – Apartado 1301
Lima 100, Perú

Prof. Hugo Scaletti
CISMID
Facultad de Ingeniería Civil
UNI – Apartado 1301
Lima 100, Perú

Dr. David Stewart
Southeast Missouri University
Center for Earthquake Studies
One University Plaza
Cape Girardeau, MO 63701 EE.UU.

Dr. Rafael Torres
CISMID
Facultad de Ingeniería Civil
UNI – Apartado 1301
Lima 100, Perú

Principios de ingeniería estructural en zonas sísmicas

Ing. José Grases

Antecedentes

Durante tiempos históricos se tiene conocimiento de terremotos que han ocasionado destrucción en ciudades y poblados de todos los continentes de la tierra. Un elevado porcentaje de los centenares de miles de víctimas cobradas por los sismos, se debe al derrumbe de construcciones hechas por el hombre; el fenómeno sismo se ha ido transformando así en una amenaza de importancia creciente en la medida en que las áreas urbanas han crecido y se han hecho más densas. Las soluciones constructivas más duraderas han sido aquellas capaces de resistir las acciones externas y del uso; entre las acciones externas, en vastas extensiones de nuestro planeta, deben incluirse las acciones sísmicas.

Hasta hace poco, las soluciones adoptadas para resistir las acciones sísmicas se desarrollaron esencialmente analizando los efectos de los terremotos en las construcciones, sin el apoyo teórico de causas y características de los sismos, ni de información cuantitativa sobre la naturaleza de los movimientos del terreno. Un ejemplo de adaptación progresiva a las sacudidas telúricas, lo constituye las edificaciones de la segunda capital de Guatemala, hoy mejor conocida como Antigua. Algunas de sus edificaciones, monumentos en la actualidad, han resistido con daños moderados las acciones de los sismos en una de las zonas más activas de Centro América, durante varios siglos; las soluciones constructivas, con muros de 4 y 5 m de grosor, bóvedas de 60 cm de espesor, contrafuertes, columnas de esbeltez reducida, etc., fue el resultado de un proceso de prueba y error durante los siglos XVI, XVII y parte del XVIII. (Diapositiva 1)

La incorporación y desarrollo de la Resistencia de Materiales en el proyecto de las edificaciones facilitó la predicción cuantitativa del estado de tensiones en las construcciones. De igual modo la aplicación de procedimientos de análisis y la incorporación del acero en la construcción, incrementaron sensiblemente la seguridad en las edificaciones. mediados del presente siglo, los problemas específicos de la Ingeniería Sísmica progresivamente dejan de ser resueltos en base a observaciones y comienza a desarrollarse una disciplina fundamentada sobre bases científicas, con un cuerpo organizado de conocimientos, programas de investigación para entender ciertos problemas no resueltos y una fértil interacción entre ciencias básicas de un lado (geofísica, sismología), y la experiencia de ingenieros proyectistas y constructores por el otro.

Capacidad de predicción

La idea prevalente sobre el vocablo predicción es el de un pronunciamiento determinístico sobre un evento futuro de naturaleza no determinística tal como la magnitud, sitio, día y hora de un futuro sismo. Una revisión sobre este aspecto y sus implicaciones de prevención, permite afirmar lo siguiente:

a) No se poseen aún teorías generales en base a las cuales se puedan hacer predicciones confiables sobre futuros sismos. De una manera general, la predicción debe verse como una probabilidad condicional a ser revisada a medida que se produce nueva información.¹ Para ello se requiere como mínimo:

- (i) identificar las áreas en las cuales se considere más probable la ocurrencia de un sismo importante, en un plazo corto de tiempo;
- (ii) seleccionar los parámetros o indicadores que resulten más confiables;
- (iii) contar con los medios adecuados para medirlos u observarlos sistemáticamente durante lapsos de tiempo que suelen ser de varios años.

¹ Lo dicho también es aplicable a algunos aspectos de la Ingeniería Sismorresistente. La mayoría de los Códigos de diseño y mapas de zonificación sísmica, que en su momento representaron la mejor predicción sobre las acciones de diseño antisísmico se han ido ajustando en el transcurso del tiempo y es previsible que ano sufran modificaciones. Con frecuencia estos cambios están motivados, justificados y/o aceptados, como consecuencia de los efectos constatados de un determinado terremoto.

b) La capacidad de hacer una predicción confiable, en el sentido de poder efectuar un anuncio público de un próximo sismo, no permite intervenir con el fin de reducir sustancialmente las pérdidas materiales directas en zonas densamente pobladas. Salvo en casos aislados, ² la estrategia más eficiente para limitar las pérdidas materiales, es la de

proyectar y construir utilizando racionalmente los conocimientos de la Ingeniería Sismorresistente.

² Es el caso por ejemplo, del apuntalamiento de edificaciones afectadas por un sismo, con la finalidad de salvar su contenido ante la amenaza de un futuro movimiento, réplica del anterior.

c) La experiencia demuestra que una vez admitida una predicción, es posible tomar medidas de defensa civil que reduzcan sustancialmente el riesgo de pérdidas de vidas así como de cierto tipo de pérdidas indirectas.

A los fines de la Ingeniería Estructural interesa centrar nuestra atención en la capacidad de pronosticar la respuesta y el desempeño de edificaciones existentes bajo la acción de sismos. Es decir, dada una edificación ubicada en cierto escenario sísmico, evaluar las consecuencias de esa exposición.

El esquema operativo de los algoritmos diseñados para tal evaluación es el que se da en el cuadro 1.

Cuadro 1.

Caracterización del escenario sísmico	Caracterización de la edificación expuesta
Respuesta	
Vulnerabilidad a sismos	
Consecuencias de la exposición	

La secuencia anterior es válida, tanto para e edificaciones como para conjuntos dispuestos en una o más localidades.

No obstante, las incertidumbres en los fenómenos asociados a los movimientos sísmicos requieren extrema cautela. Por ejemplo, ésta edificación Portuaria sufrió daños irreparables como consecuencia del movimiento de sus bases debido a inestabilidad del suelo de fundación, bajo la acción de movimientos sísmicos intensos. (Diapositiva 2)

Desempeño inadecuado

En el proyecto de edificaciones que puedan quedar sometidas a acciones sísmicas, es fundamental entender su comportamiento probable: cómo se va a deformar, cuales son sus regiones críticas y, sobre todo, evitar fallas prematuras que limiten la reserva resistente de la estructura.

En aquellos casos donde sea previsible que la estructura entre en el rango inelástico, debe garantizarse una conducta dúctil.

Construcciones de adobe o tierra, debidamente reforzadas, pueden resistir sacudidas de cierta intensidad con daños menores. Cuando estos refuerzos han sido ignorados o la madera esta podrida y carcomida, el desempeño es inadecuado. (Diapositivas 3 y 4)

El golpeteo entre edificaciones adyacentes ha sido la causa de daños importantes y fallas prematuras de edificaciones de varias plantas, en especial cuando estas se encuentran a diferente nivel. Algunas normas toleran el adosamiento, siempre y cuando se compruebe que los daños son limitados; en estas situaciones son de esperar daños localizados, reparables, como los que se ilustran en estos dos cuerpos de un edificio ubicado en San Salvador, afectado por el temblor del 10 de Octubre de 1986. (Diapositivas 5 y 6)

Los grandes paños de pared de mampostería no reforzada deben evitarse, pues se ha demostrado en múltiples ocasiones que resultan inestables durante sacudidas sísmicas intensas. Por ejemplo, los muros de mampostería de fachada de la unidad de reuniones del Centro Médico de México, sin refuerzos y uniones, perdieron estabilidad con el terremoto del 19 de Septiembre de 1985. (Diapositiva 7)

Estrategia de las normas vigentes

A diferencia de otras sobrecargas, los sismos generan acciones dinámicas de signo alternante; es decir, las oscilaciones de la edificación durante su respuesta, superponen a las solicitaciones debidas a la gravedad terrestre otras de signo alternante (pueden ser momentos flectores, fuerzas axiales o fuerzas cortantes).

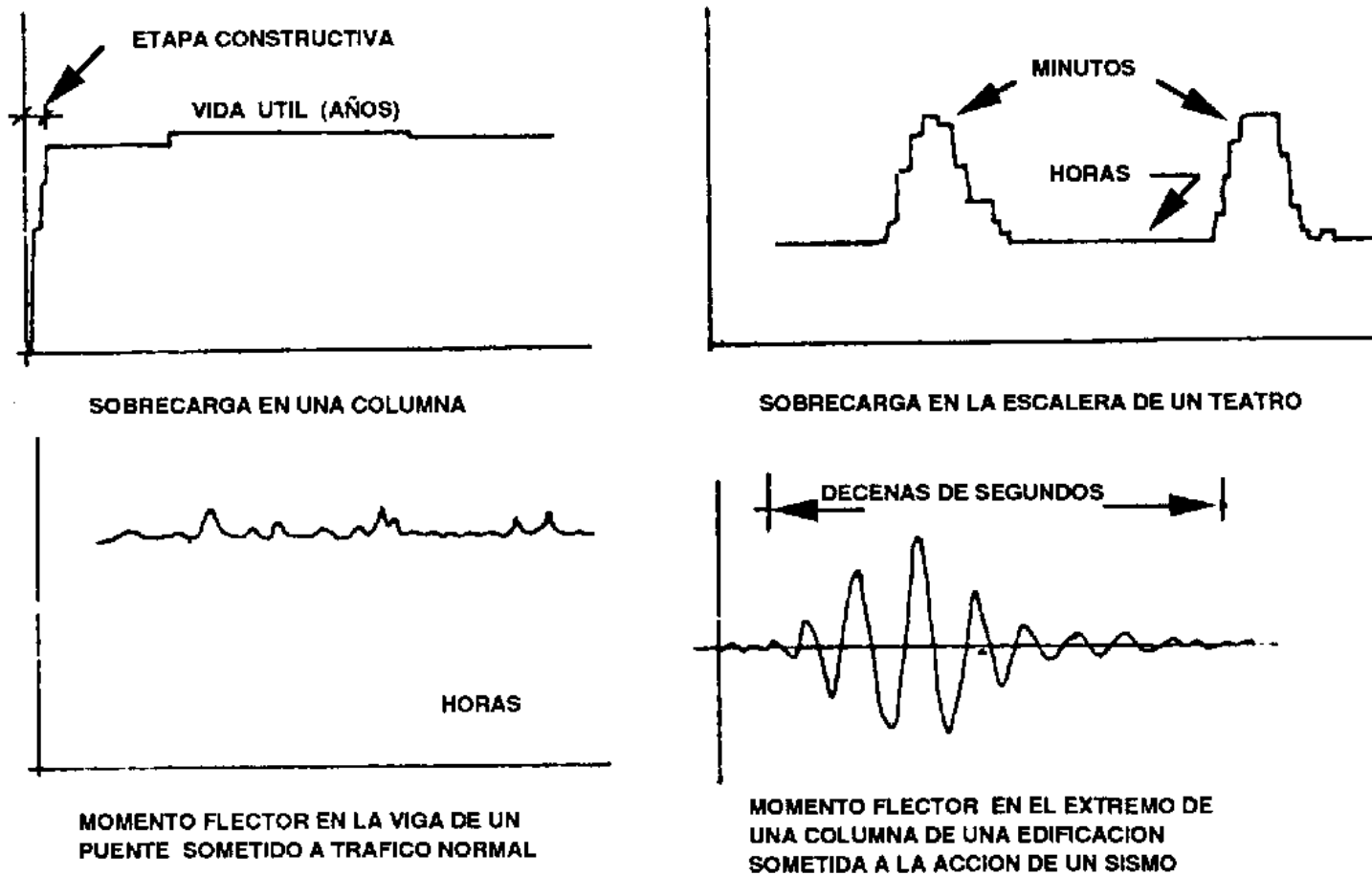


Figura 1. Sobrecargas: variaciones temporales

Es importante tener presente la filosofía adoptada en el diseño sismorresistente de la gran mayoría de las edificaciones y obras de ingeniería existentes en áreas urbanas. Esta puede resumirse en la forma que se anota a continuación, la cual es una transcripción literal de los comentarios al capítulo 1° de la norma Venezolana vigente:

"... se espera que las edificaciones diseñadas de acuerdo a. las presentes Normas cumplan las siguientes pautas:

- a) no sufran daños bajo la acción de sismos menores;
- b) resistan sismos moderados, con algunos daños económicamente reparables en elementos no estructurales;
- c) resistan sismos intensos sin colapsar, aunque con daños estructurales importantes".

Esta declaración, explícita en la norma venezolana, es común en buena parte de las normas; en otros cuerpos normativos, o en normas anteriores a las vigentes, va implícita en los criterios de diseño establecidos.

Obsérvese que bajo la acción de sismos fuertes, de la intensidad prevista en las normas, se admiten daños estructurales importantes. Estos pueden incluso llegar a ser tan importantes que, sin alcanzar el estado de ruina o inestabilidad, requieran la demolición de la edificación.

En la Figura 2 se compara la respuesta de un sistema que responde en el rango elástico, con la de un sistema que durante su respuesta incursiona en el dominio de las deformaciones inelásticas (post-elásticas). Esta incursión es tanto más importante mientras más ductilidad se pueda garantizar, entendiéndose por factor de ductilidad la relación entre los desplazamientos máximos reales y los desplazamientos calculados suponiendo un comportamiento elástico lineal de la estructura. En la figura 7 se dan valores típicos de D.

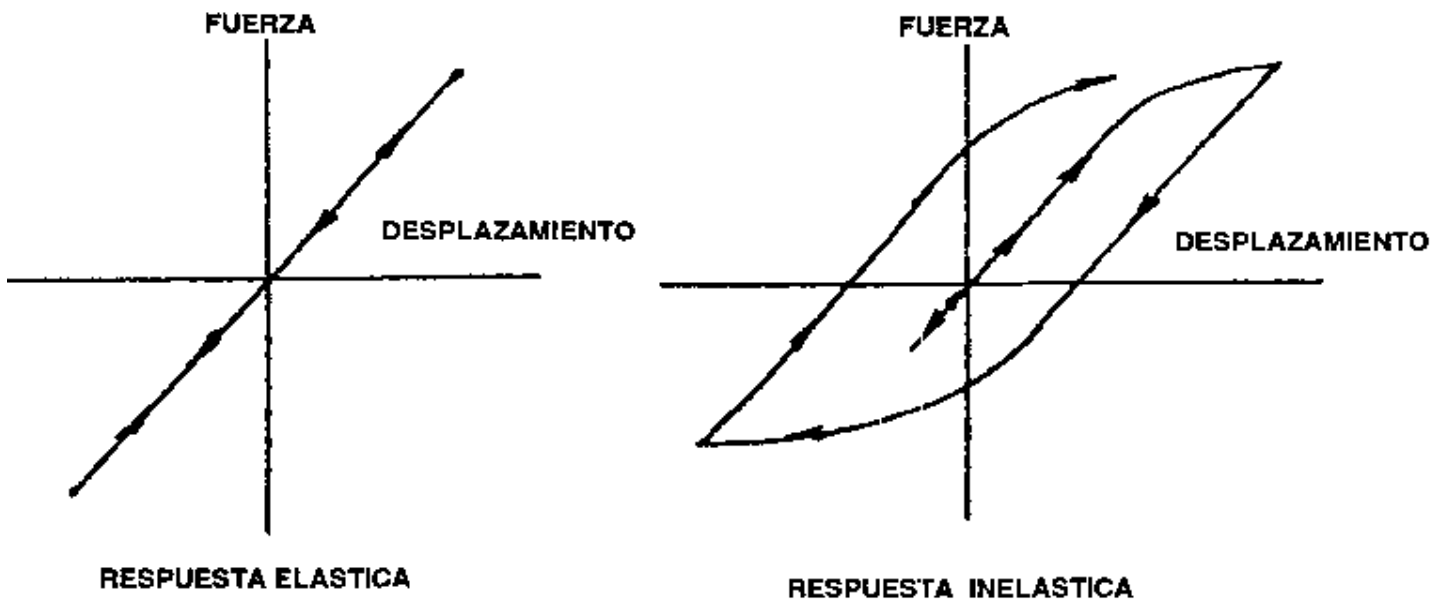


Figura 2. Respuesta de sistemas elásticos e inelásticos

Selección del sitio

Los bordes de mesetas —excepcionales por su vista panorámica— presentan mayor azarosidad cuando se encuentran en áreas amenazadas por sismos, especialmente son evidentes los fenómenos de inestabilidad de sus taludes por otras acciones naturales. Algo similar puede decirse de las zonas al pie del talud.

En algunas normas se exige la evaluación de la estabilidad del talud cuando la edificación se encuentra en sus cercanías.

Fenómenos de licuefacción en suelos sueltos saturados son frecuentes en las riberas de ríos. Las pilas de este puente rotaron bajo la acción de un sismo y el tablero simplemente apoyado del lado derecho se hundió en el río.

En áreas de topografía abrupta se han constatado y medido fenómenos de amplificación del movimiento del terreno. Tal es el caso de área del Canal Beagle, en Viña del Mar, donde un conjunto de edificaciones nominalmente iguales ubicadas en el tope de un cerro, sufrieron daños importantes como consecuencia del terremoto de Marzo de 1985, a diferencia de otras iguales ubicadas al pie del cerro, que no se dañaron.

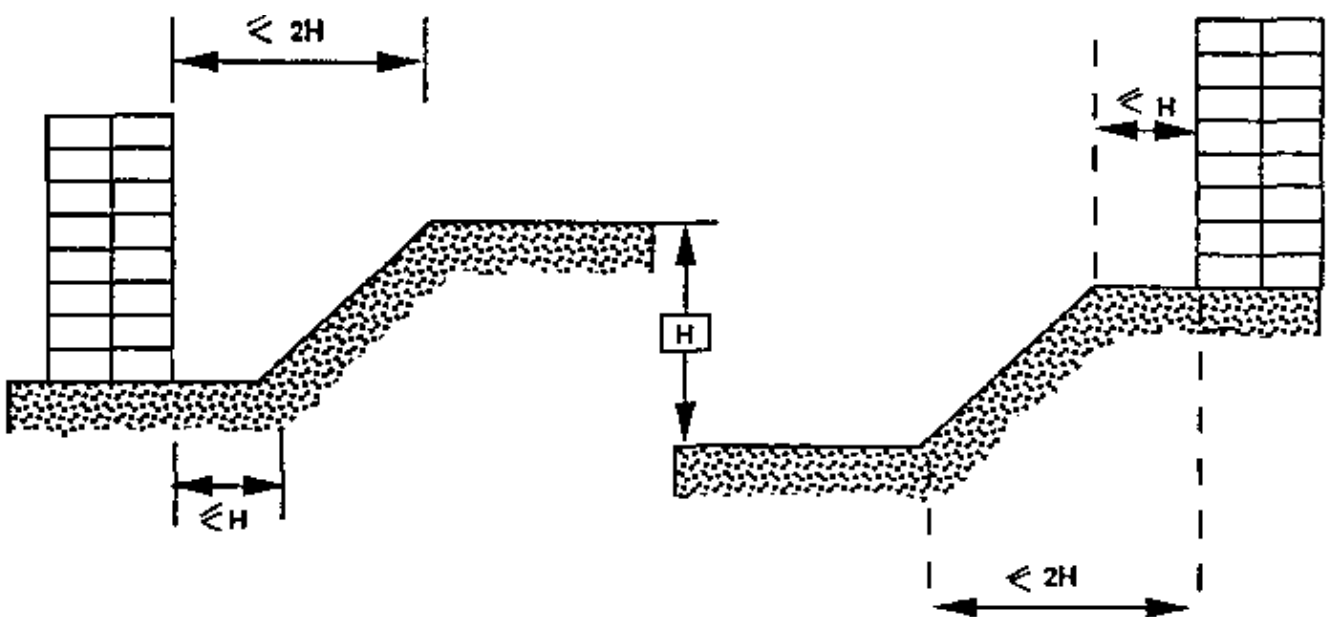


Figura 3. Condiciones que requieren la evaluación de taludes

Acciones de diseño

Aceleración máxima del terreno

Las acciones sísmicas establecidas en las normas se caracterizan por la aceleración máxima de la componente horizontal y son seleccionadas a partir de un estudio generalizado de la amenaza sísmica. En término medio y según el país, se encuentran asociadas a probabilidades de excedencia que oscilan entre 10% y 40% en 50 años, lo cual representa períodos de retorno de 475 a 100 años.

De una manera general, en obras civiles muy importantes y en todas aquellas donde el mal funcionamiento puede tener consecuencias catastróficas, es necesario alcanzar un nivel consistente de protección contra las acciones sísmicas tanto en las edificaciones como en las instalaciones, sistemas y componentes. Estos, además de soportar las acciones gravitacionales previstas, deben quedar diseñados de modo tal que puedan resistir los efectos de aquellas combinaciones de **acciones cuya probabilidad de ocurrencia simultánea no se considere remota**. Es usual incluir en estas combinaciones, aquellas acciones cuya probabilidad de excedencia P durante la vida útil de la instalación en cuestión (t años), no supere valores prefijados (del orden de 1% al 5%). Esto se traduce en acciones cuyo período medio de retorno T en años se puede expresar como:

$$T \cong \frac{1}{1 - (1 - p)^{\frac{t}{T}}}$$

Criterios generales para la selección de la aceleración máxima de la componente horizontal de los sismos de diseño, se sintetizan en la Tabla 1.

En las normas para edificaciones antisísmicas, las edificaciones hospitalarias y centros de salud son clasificadas como de importancia vital en caso de terremoto. Por esta razón el coeficiente de importancia ?, igual a 1,0 para edificaciones destinadas a vivienda, oficinas o comercio, es mayor que la unidad; este varía entre 1,20 y 1,50 en diferentes normas americanas. Su influencia en la probabilidad de excedencia de los valores de diseño, y por tanto en el período medio de retorno, depende de la peligrosidad de la localidad.

Tabla 1. Criterios para la selección de los sismos de diseño (aceleración máxima de la componente horizontal).

Objetivo de Diseño	Periodo Medio de Retorno	Criterio de Diseño
Minimizar daños menores, o la interrupción de operación en plantas industriales	1 a 2 veces la vida de la edificación	Respuesta elástica
Control de daños en componentes críticos. Estabilidad estructural	4 a 6 veces la útil	Respuesta elástica. Cedencia incipiente en las zonas más solicitadas
Estabilidad de embalsas. Interrupción de funcionamiento de plantas nucleares. Estabilidad de equipos en subestaciones eléctricas de alto voltaje	De mil a 3 mil años	Agotamiento resistente

En la Tabla 2 se comparan valores representativos de la norma venezolana vigente; obsérvese que con ? = 1,5 para la zona de peligro sísmico elevado, se alcanzan valores de la aceleración máxima del terreno (A'o = 0,45 g) cercanos a los especificados para equipos eléctricos de alto voltaje en zonas de elevado peligro sísmico (A'o = 0,50 g).

Tabla 2. Coeficiente de importancia y períodos medios de retorno.

Ubicación de la localidad	Ao (2)	Coeficiente de Importancia ?	A'o = ? Ao	Probabilidad de que A'o sea excedido (2) en un tiempo de:			Periodo Medio de Retorno (3) (años)
				1 año	50 años	100 años	
Zona de peligro sísmico elevado(1)		1,0	0,30g	0,0021	0,100	0,190	473
	0,30g	1,2	0,36g	0,0012	0,059	0,115	818

		1,5	0,45g	0,0006	0,031	0,061	1597
Zona de peligro sísmico moderado (1)		1,0	0,15g	0,0021	0,101	0,192	496
	0,15g	1,2	0,18g	0,0010	0,050	0,098	973
		1,5	0,225g	0,0004	0,021	0,041	2374

Notas:

- (1) El peligro sísmico es caracterizado por una función de distribución acumulada de máximos, Gumbel Tipo II.
- (2) Valor de la aceleración máxima del terreno, componente horizontal.
- (3) El redondeo del último decimal puede dar lugar a diferencias con el periodo de retorno acumulado.

Acción simultánea de varias componentes

De una manera general, el movimiento del terreno debido a sismos puede descomponerse en seis componentes: tres traslaciones y tres rotaciones. Dado que la mayoría de las edificaciones responden esencialmente a las componentes traslacionales horizontales (X e Y), es común que las componentes rotacionales sean ignoradas totalmente y que el efecto de la componente vertical (Z) sea despreciada; cuando esta componente o su efecto, sea importante, es preciso incorporarlo y considerar el efecto combinado S según la expresión:

$$S = \sqrt{S_x^2 + S_y^2 + S_z^2}$$

donde S representa el efecto debido a la componente traslacional del movimiento del terreno indicada en el subíndice. Como aproximación, se puede adoptar el criterio que para la determinación del efecto combinado S se añada al 100% del efecto debido a sismos en una dirección, el 30% de los efectos debidos a sismos en las otras dos direcciones. Para usar este criterio correctamente se debe tomar el 100 % de los efectos correspondientes a cada una de las direcciones de la acción sísmica, combinados con el 30% de los efectos debidos a sismo en las otras dos direcciones; las sumas deben ser hechas para los valores absolutos de las respuestas.

Caracterización de las acciones de diseño

Espectros de respuesta elástica

Los espectros describen la máxima respuesta de estructuras idealizadas como un grado de libertad, sometidas a la acción de un movimiento sísmico (acelerograma) conocido. El procedimiento a seguir para la determinación rigurosa de los espectros se ilustra en la Figura 4. Los espectros para el diseño (Figura 4d) se determinan a partir de estudios estadísticos de familias de movimientos sísmicos, para osciladores con el mismo porcentaje de amortiguamiento referido al crítico. En la Tabla 3 se dan valores para diferentes tipos de materiales y niveles de tensiones.

Tabla 3. Valores de amortiguamiento.

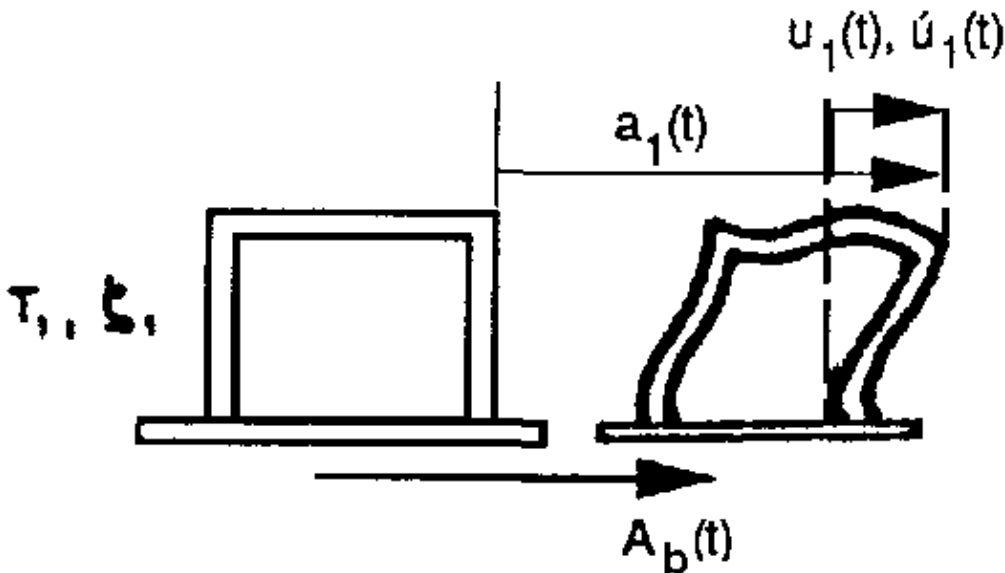
Nivel de tensiones	Tipo y Condición de la Estructura	Porcentaje de Amortiguamiento Crítico (%)
Tensiones de servicio que no excedan un 50% de las cadentes	a) tuberías vitales;	1 a 2
	b) miembros de acero, soldados: concreto pretensado; concreto muy reforzado, con pequeños agrietamientos;	2 a 3
	c) concreto armado con fisuración pronunciada	3 a 5
	d) miembros de acero apernados; estructuras de madera.	5 a 7

Tensiones a nivel cedente o cercanos a la cadencia	a) tuberías vitales	2 a 3
	b) miembros de acero, soldados; concreto pretensado sin pérdida completa de la pretensión;	5 a 7
	c) concreto pretensado con pérdida la pretensión	a 10
	d) concreto armado;	7 a 10
	e) miembros de acero apernados: estructuras de madera	10 a 15

El valor de la aceleración máxima del terreno, representado por A_0 en las Figuras 4b y 4d, se obtiene en los términos explicados en la sección anterior. De una manera general, las condiciones del subsuelo influyen en los contenidos frecuenciales del movimiento y por tanto en la forma de los espectros. En la Figura 5 se describe en forma cualitativa cambios esperados en la aceleración máxima del terreno y en las formas espectrales, para tres registros: un sitio cercano ubicado en suelo firme ó roca (1), superficie de depósito aluvional (2) y un sitio alejado en el suelo firme (3).

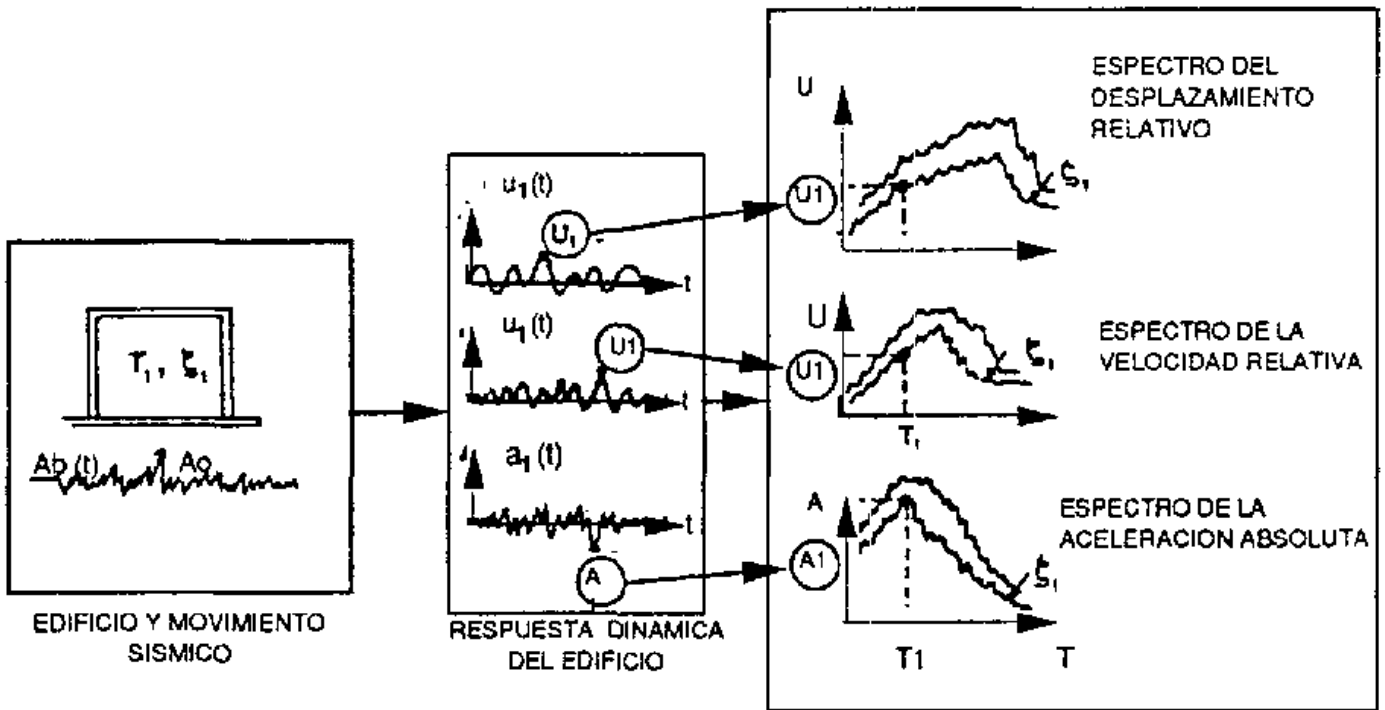
La amplificación promedio de los valores espectrales es función del amortiguamiento ? Figuras similares a la 4b, obtenidas para determinadas condiciones de subsuelo y valores de amortiguamiento, normalizados por A_0 , se indican en la Figura 6; se anota allí la regresión obtenido para diferentes valores de ? así como formas típicas de los espectros de respuesta elástica promedio para tres condiciones de subsuelo.

Figura 4. Espectros de respuesta.

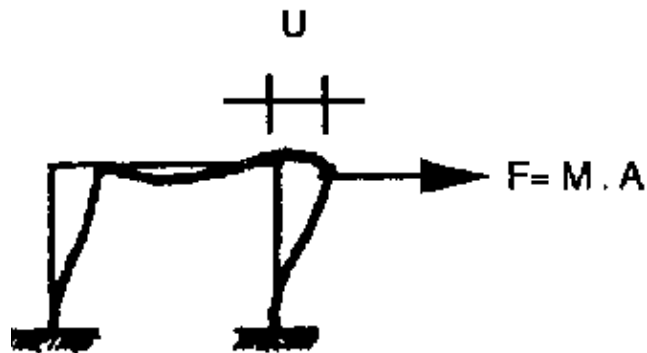


- $A_b(t)$ = Aceleración de la base
- $u_1(t)$ = Desplazamiento del edificio relativo a su base
- $\dot{u}_1(t)$ = Velocidad del edificio relativo a su base
- $a_1(t)$ = Aceleración absoluta del edificio, dada por la suma de la aceleración relativa y la aceleración de la base

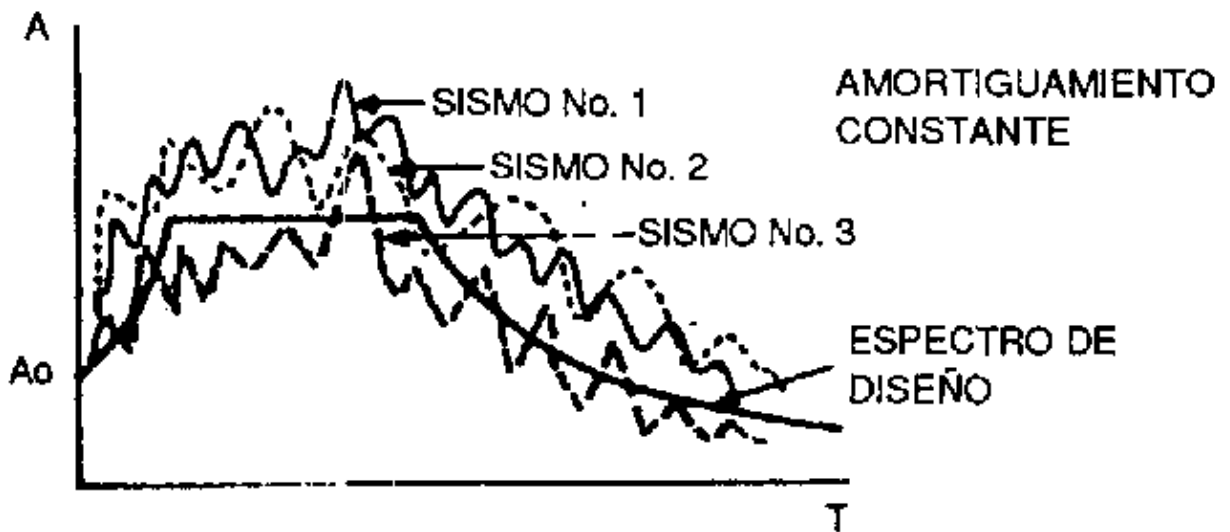
a) EDIFICIO DE UN PISO IDEALIZADO COMO UN SISTEMA DE UN GRADO DE LIBERTAD DE PERIODO T_1 Y AMORTIGUAMIENTO RELATIVO



b) DETERMINACION DE LOS ESPECTROS DE RESPUESTAS



c) FUERZA LATERAL DE DISEÑO y



d) ESPECTRO MEDIO PARA EL DISEÑO

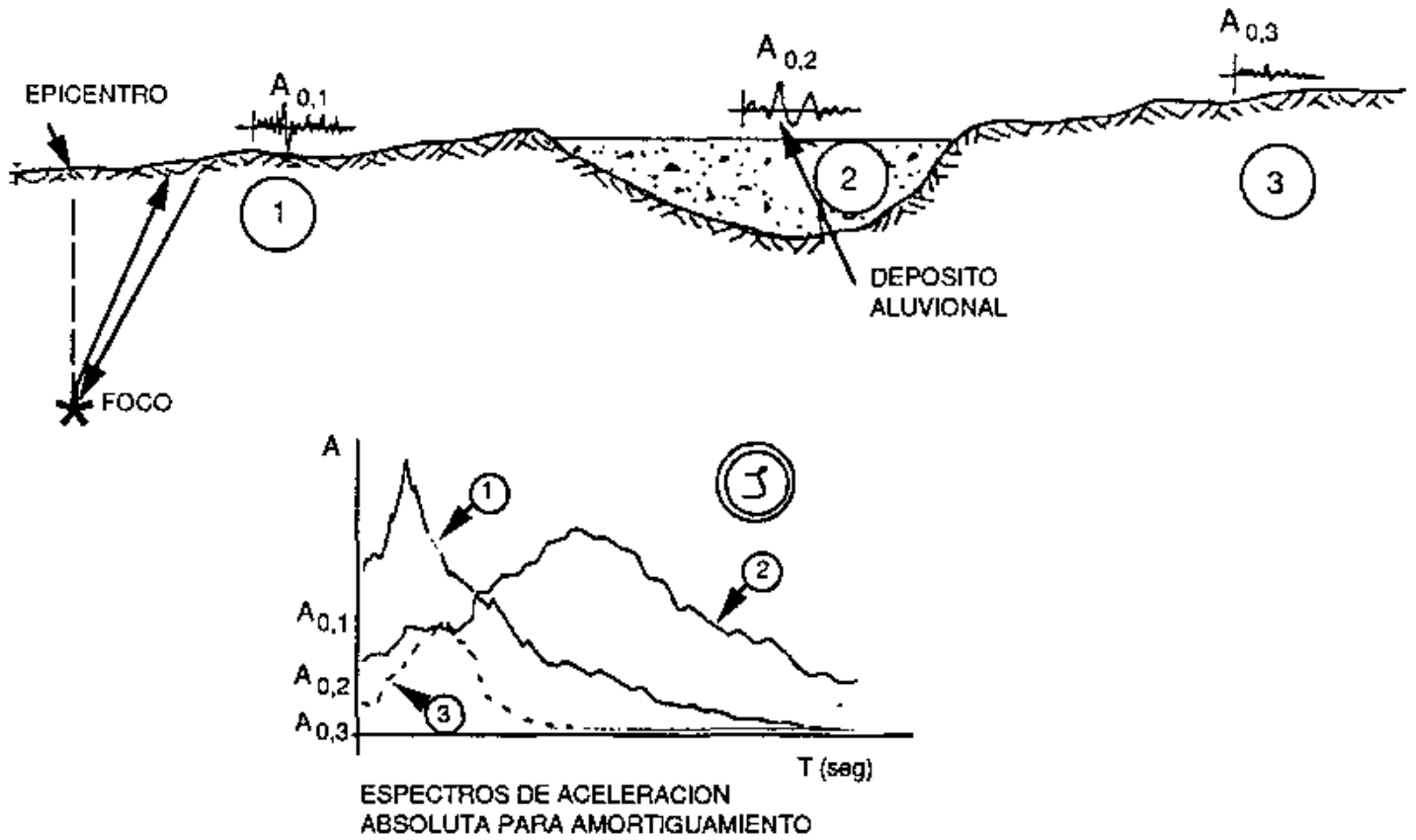


Figura 5. Cambios en los movimientos del terreno, como consecuencia de un evento sísmico de foco superficial.

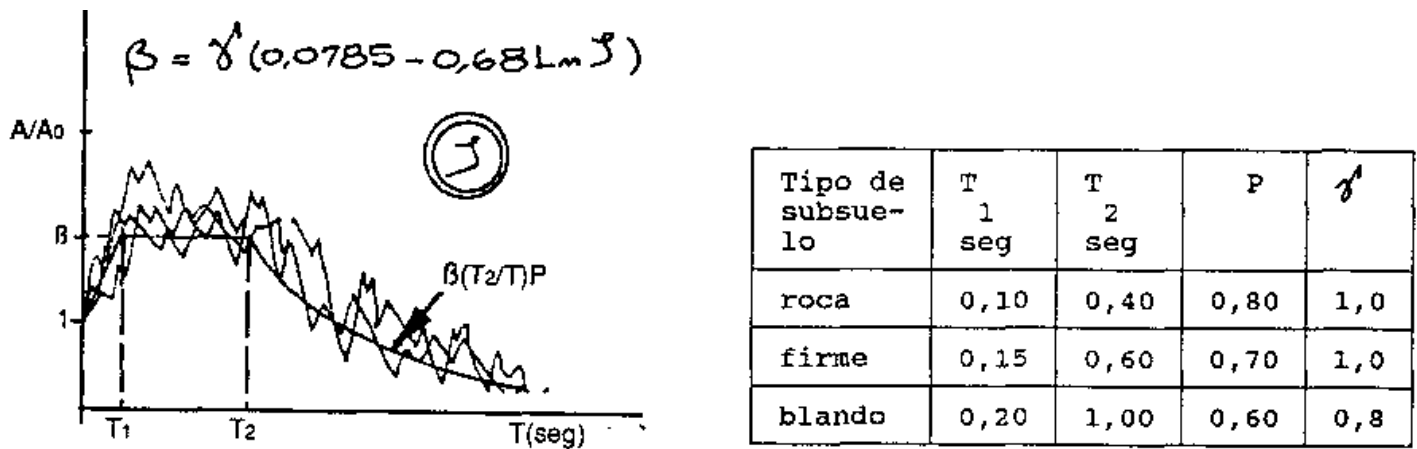
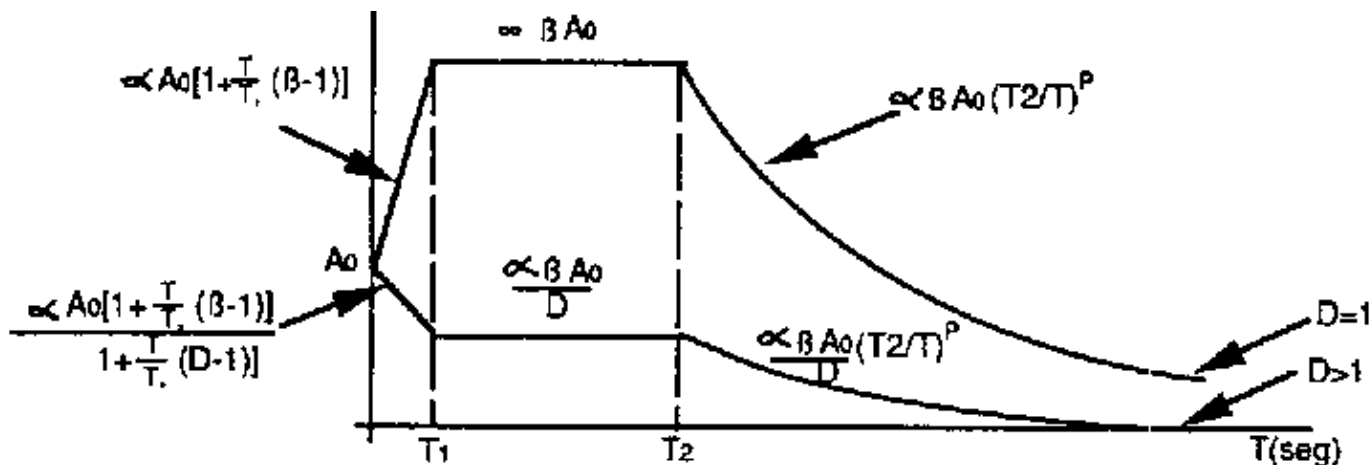


Figura 6. Espectros normalizados típicos, para diferentes condiciones del subsuelo y amortiguamiento.

Espectros de diseño

Tal como se indicó en la sección de estrategias de normas vigentes, es común admitir que la edificación pueda hacer incursiones importantes en el rango inelástico (post-elástico). Por esta razón en el diseño se utilizan espectros de respuesta elástica a partir de un factor de reducción que depende del factor de ductilidad D garantizando por el sistema resistente a sismos. En la figura 7 se ilustra lo anterior, con indicación de rangos típicos del valor D en la figura 8.



- α : coeficiente de importancia (Tabla 2)
- A_0 : aceleración máxima del terreno (Tabla 2)
- $T_1; T_2; p; \beta$: véase Figura 6
- D : factor de ductilidad (Figura 7)

Figura 7 Espectros de diseño y valores típicos de D.

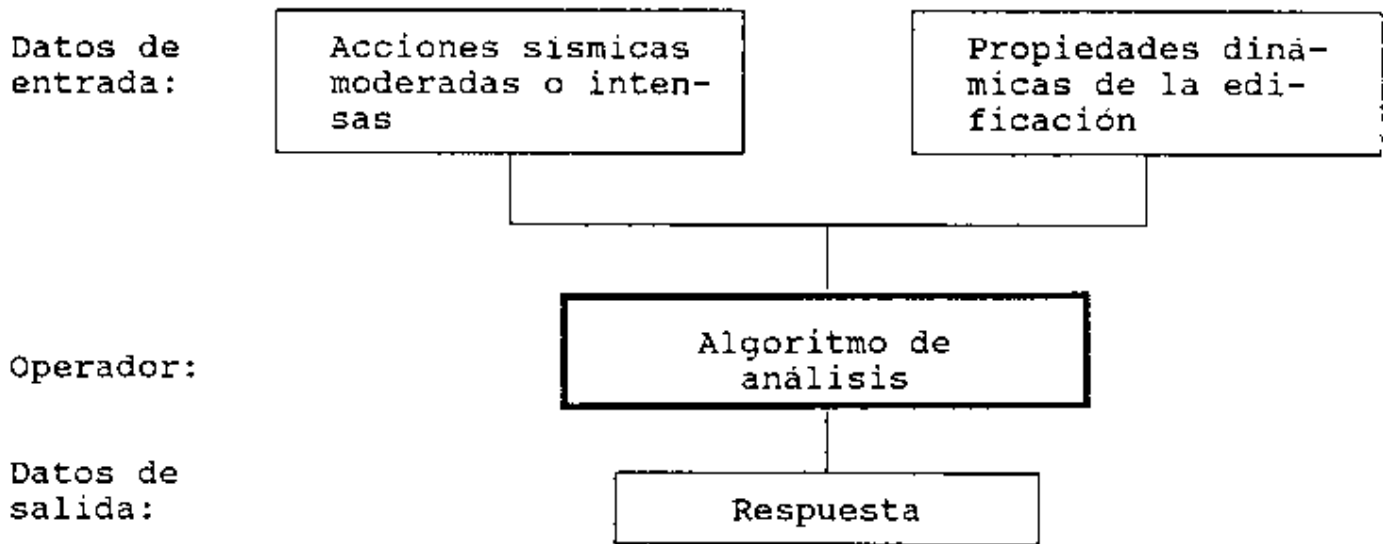
Figura 8. Espectros de diseño y valores típicos de D.

VALORES TIPICOS DE D

Sistema Resistente a sismos	Rango de valores de D		
	Acero bien detallado	Concreto armado	
		Bien detallado	Detallado insuficiente
Pórticos; elementos sometidos a la flexión	5 - 7	4 - 6	2,5 - 3,5
Pórticos y muros; dual		3 - 5	2 - 3
Pórticos diagonalizados	3 - 4	2,5 - 3,5	1,5 - 2
Muros estructurales		3 - 4	1,5 - 2

Respuesta a sismos

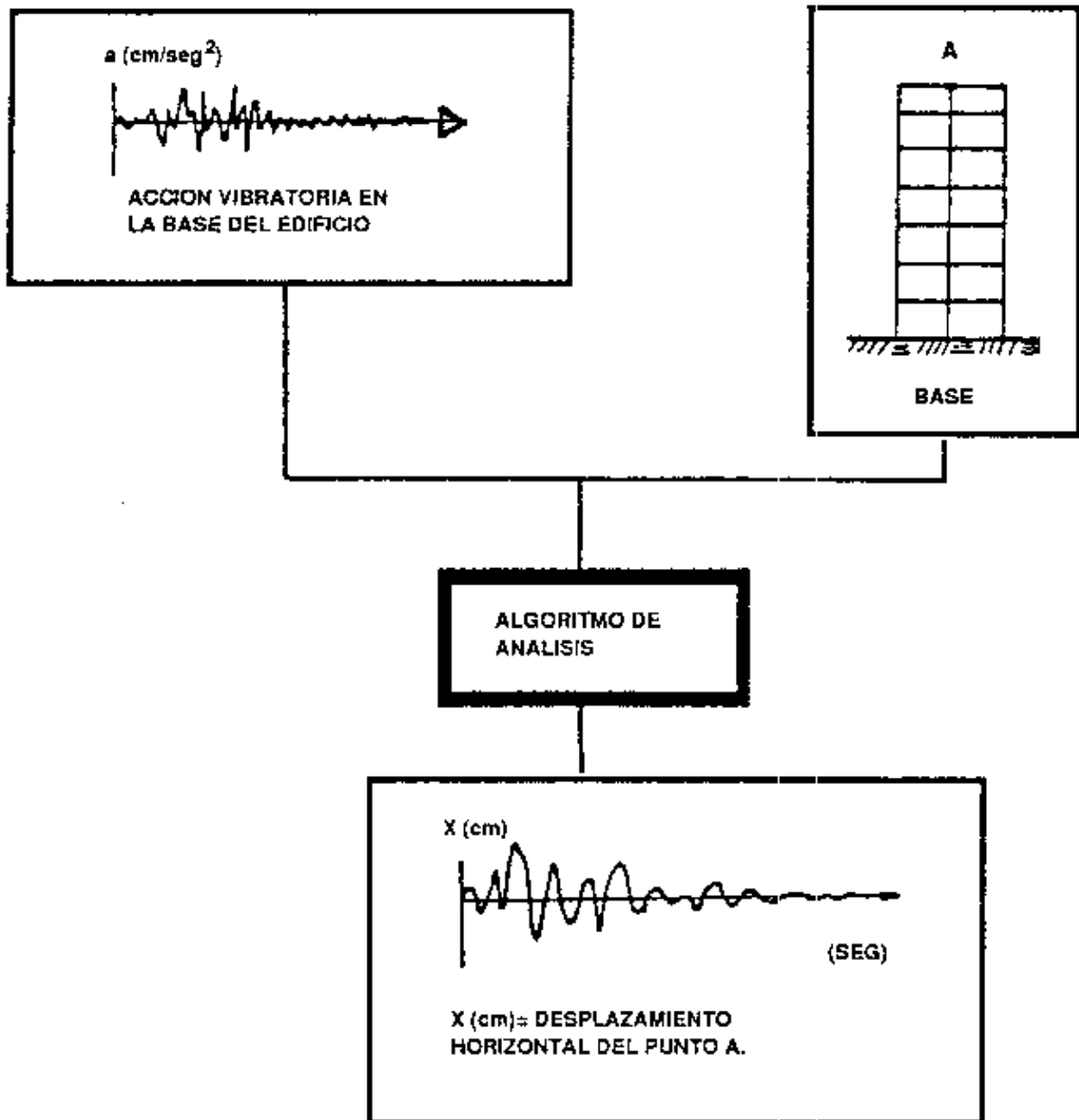
La cualificación de la respuesta de una edificación a movimientos sísmicos requiere definir: tanto las acciones más probables en el sitio, como las propiedades dinámicas de la edificación. La secuencia en la resolución de este problema se puede representar de acuerdo al esquema del cuadro 2.



Cuadro 2.

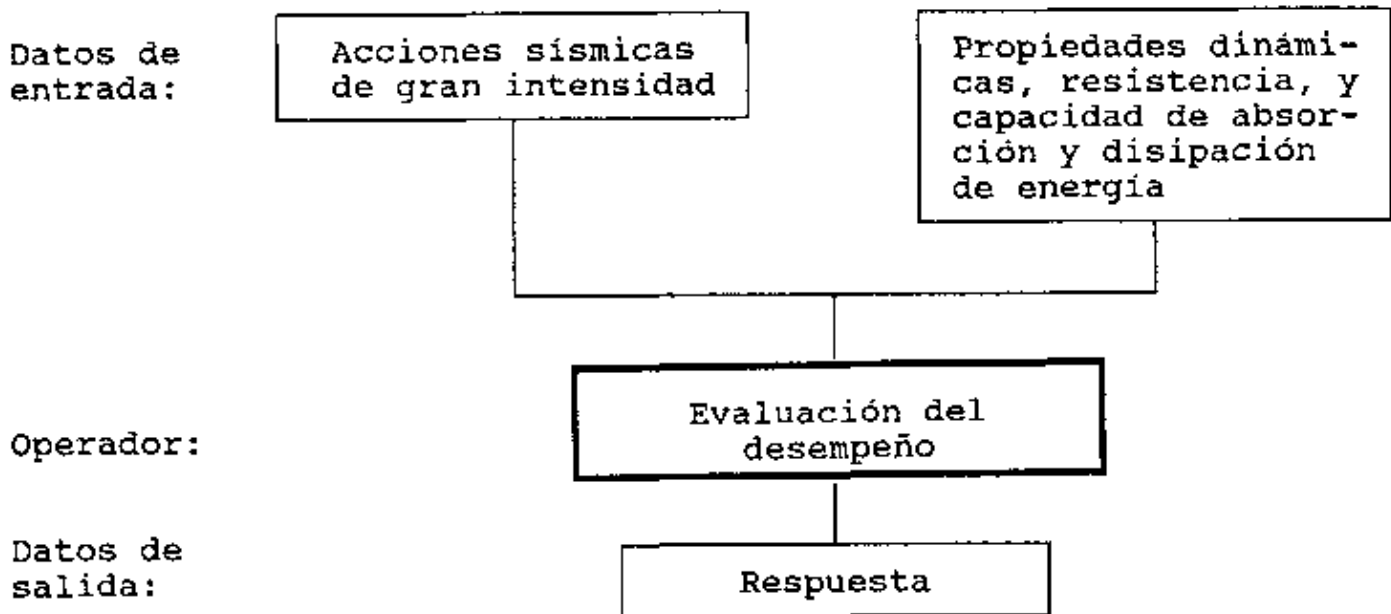
La respuesta, constituida por un conjunto de datos de salida, puede ser medida de formas muy diferentes. En el cuadro 3 la respuesta sísmica de un edificio de siete niveles a la acción vibratoria en su base, viene dada por los desplazamientos en el tope del edificio (punto A); esta ha podido ser igualmente ejemplificada por los esfuerzos en secciones críticas de una columna del primer piso, por los desplazamientos entre dos niveles adyacentes ó por otros parámetros de interés.

En los últimos años se ha logrado un alto nivel de confianza en la predicción de la respuesta. Este hecho, gracias al empleo de procedimientos de cálculo automatizado por computadora, ha podido ser validado tanto en el laboratorio (mesas vibrantes), como en mediciones de campo durante terremotos reales, siempre que la respuesta se mantenga dentro del rango elástico. El edificio prefabricado a base de grandes paneles de concreto, sobrevivió exitosamente sin daños, aceleraciones máximas del terreno del orden de 0,3g debidas al terremoto de Chile de 1985; probablemente su respuesta se mantuvo dentro del rango elástico. (Diapositiva 12)



Cuadro 3.

No obstante, debe tenerse presente que la estrategia de diseño explícita en la normativa sismorresistente, en caso de que ocurran las acciones más severas prescritas, tolera grandes deformaciones y agrietamientos en la estructura portante. Como consecuencia de estas acciones extremas, posibles aunque poco probables durante la vida útil de la edificación, esta sufrirá daños, tanto en los elementos portantes de la estructura como en los elementos no portantes; de este modo, las propiedades dinámicas de la edificación sufren modificaciones, en una forma que: solo es susceptible de ser predicha de manera aproximada, razón por la cual bajo estas acciones sísmicas de gran intensidad, los algoritmos de análisis de respuesta comúnmente empleados conducen a resultados aproximados. El desempeño de la edificación es confiado ahora a otras cualidades que debe poseer, generalmente denominadas **capacidad de absorción y disipación de energía**. El cuadro 4 resume en forma esquemática la evaluación de la respuesta para el caso de estas acciones sísmicas de gran intensidad



Cuadro 4.

Las normas aceptan, implícita ó explícitamente, que bajo esas acciones intensas las edificaciones comunes incurrieren en el rango de deformaciones inelásticas; es decir, daños estructurales, que pueden incluso ser de naturaleza irreparable.

De una manera general, se puede considerar que estos son los estados previos a la condición límite de ruina o desplome; de hecho, parte importante de las pérdidas materiales está representada por el riesgo de ruina o desplome de la edificación. Es evidente de lo anterior, que la capacidad de predecir dicho estado límite está asociada a una incertidumbre mayor y requiere consideración especial.

Configuración y Estructuración

La experiencia ha demostrado que la configuración de la edificación y su estructuración juegan un papel muy importante en el diseño a solicitaciones sísmicas intensas. Los estudios analíticos confirman las observaciones de campo según las cuales, edificaciones irregulares dan lugar a elevadas demandas localizadas de resistencia y/o ductilidad; esto conduce a una respuesta inadecuada, a menudo de consecuencias catastróficas, ya que la estructura portante no alcanza a desarrollar íntegramente su capacidad portante.

Irregularidades en planta

Plantas de configuración irregular han tenido un mal desempeño a sismos intensos. Por ejemplo plantas triangulares, generalmente ubicadas en parcelas de la misma forma, conducen a distribuciones de rigidez asociadas a fuertes torsiones. (Diapositiva 13)

Los extremos de plantas con entrantes pronunciados, con formas en U, C ó H, tienden a responder de modo independiente al resto de la edificación creando esfuerzos adicionales no previstos. Su corrección a posteriori es posible, tal como se ilustra en este caso de Caracas afectado por el terremoto de 1967. (Diapositiva 14)

Irregularidades en elevación

Cambios bruscos en la distribución vertical de masas, resistencia o rigidez conducen a situaciones altamente vulnerables a sismos, como la que se ilustra. No es conveniente disponer grandes masas aisladas en las partes superiores de edificaciones elevadas pues durante la respuesta dinámica de la edificación son de esperar amplificaciones importantes del movimiento. El tanque de almacenamiento de agua en el último nivel del Centro de Oncología (PB + 7 niveles), probablemente fue el causante de fallas en columnas; nótese que la entrada de ambulancias se encuentra obstruida. (Diapositivas 15 y 16)

Otras irregularidades en elevación pueden ser creadas por elementos no estructurales, cuya interacción con la estructura portante suele ser ignorada en el modelo matemático, tal como se constata en el edificio de 10

plantas de la figura. (Diapositiva 17)

Estructuración

El sistema estructural debe definir claramente alineamientos resistentes a las sollicitaciones sísmicas, cuya contribución a la capacidad portante se pueda cuantificar de modo inequívoco. El sistema reticulado celular ilustrado, eficiente para sobrecargas gravitacionales, da lugar a estructuras excesivamente flexibles y débiles, tal como se evidenció en el pasado terremoto de México en 1985. (Diapositivas 18 y 19)

La construcción de este edificio de 25 pisos, ubicado en una zona de elevado peligro sísmico, fue detenida por ser inadecuada su estructuración en su dimensión más larga. (Diapositiva 20)

Estados límites

El desempeño de una estructura o parte de ella está referido a un conjunto de estados límites, más allá de los cuales la estructura queda inútil para su uso previsto. Estos se suelen agrupar en estados límites de servicio y en estados límites últimos, los cuales a su vez pueden diferenciarse en estados límites de agotamiento y estados límites de tenacidad. Tomando en consideración la Estrategia de diseño establecida en las normas, resulta conveniente agruparlos en la forma siguiente:

i) Estados Límites a Nivel de Servicio

Son aquellos que pueden afectar el correcto funcionamiento para el cual fue proyectada la edificación, sin perjudicar su capacidad resistente. Típicamente y para cargas gravitacionales, en adición a la capacidad portante, en las normas se establecen límites para: flechas, fisuración visible, deformaciones incluidos los efectos a largo plazo, vibraciones excesivas. En el caso de acciones sísmicas, si bien no se suele indicar en forma explícita, tal estado límite se asocia a daños menores en elementos no estructurales: fisuras, rotura de vidrios, etc. Obsérvese que la rotura de vidrios en el edificio de 12 plantas (San Salvador, Octubre 1986) fue generalizado. Se tiene poca experiencia en edificios de gran altura como el de la figura (55 niveles) (Diapositivas 21, 22, y 23)

ii) Estados Límites a Nivel de Daños Reparables

Son aquellos en los cuales los efectos en la acción sísmica están limitados a ciertos niveles de "daños económicamente reparables"; esto es, daños en elementos portantes del sistema resistente a sismos, lo cual puede equipararse al inicio de la cadencia en algunos de sus elementos.

iii) Estados Límites a Nivel de Daños Irreparables

Son aquellos asociados a daños en el sistema resistente a sismos, generalmente irreparables, pero que no comprometen la estabilidad de la edificación. Se pueden asimilar a la respuesta en el rango inelástico, con demandas de ductilidad similares a las máximas disponibles. En las normas se estipulan límites en los desplazamientos máximos entre niveles adyacentes, así como separaciones mínimas entre edificaciones contiguas; estas se calculan con los desplazamientos máximos, incluidos los efectos inelásticos y, en algunas normas como la de México, las rotaciones en la fundación.

iv) Estado Límite a Nivel de Inestabilidad

Es aquel asociado a una elevada probabilidad de ruina (ó inestabilidad) de la edificación ó de una parte importante de ella, como consecuencia de pérdida excesiva de resistencia, agotamiento resistente, ó demandas excesivas de ductilidad que conducen a daños irreversibles con reducciones significativas de la resistencia. También es denominado colapso o desplome, el cual se ilustra aquí con el Hospital Juárez de México D.F. (8 pisos). (Diapositiva 24)

En forma explícita o implícita, los tres primeros estados límites son los que controlan el diseño. Cada estado límite específico requiere un modelo de cálculo que incorpore las variables apropiadas y sus incertidumbres, la respuesta de la estructura, así como la conducta de los elementos y materiales de la estructura.

Verificación de la seguridad

Como resultado de estudios de investigaciones hechas hasta el presente, es evidente que ha aumentado el nivel de confianza en la predicción tanto de las acciones esperadas como de la respuesta probable. Tales estudios revelan que el necesario balance entre seguridad y economía puede lograrse a costo de un cierto riesgo, expresado como probabilidad de excedencia de ciertos estados límites. Este aspecto plantea la necesidad de revisar la responsabilidad por cierto tipo de daños como consecuencia de acciones sísmicas futuras, y así se establece en las normas modernas.

En todo caso, toda edificación y cada una de sus partes debe tener la resistencia, la rigidez y la estabilidad necesaria para comportarse satisfactoriamente y con seguridad de alcanzar los estados límites que puedan presentarse durante su vida útil (véase Estados Límites). De una manera formal, en la verificación de la seguridad se pueden distinguir cuatro tipos de acciones: permanentes, variables, accidentales y extraordinarias. Estas conducen a las siguientes situaciones de diseño:

- i) *situaciones permanentes ó persistentes*, cuya duración es del mismo orden de la vida útil de la estructura;
- ii) *situaciones variables ó transitorias*, que, aún cuando son de duración menor, tienen una elevada probabilidad de ocurrir a lo largo de la vida útil de la edificación. Es el caso de las combinaciones de peso propio y sobrecargas de servicio extremas;
- iii) *situaciones accidentales*, caracterizadas por su corta duración y pequeña probabilidad de ocurrencia (sismos intensos, vientos, cambios extremos de temperatura);
- iv) *situaciones extraordinarias*, que pueden presentarse en casos excepcionales y dar lugar a catástrofes (explosiones, incendios, impactos, etc.).

El efecto combinado de aquellas acciones cuya probabilidad de ocurrencia simultánea no sea despreciable, no debe exceder los estados límites que controlan el diseño. Para situaciones donde solo intervienen acciones permanentes y variables, todas las partes de la estructura y la estructura en conjunto deben ser diseñadas para satisfacer todos los estados límites; tal condición se cumple si la resistencia de diseño es por lo menos igual a combinaciones del tipo:

$$1.4 \text{ CM} + 1.7 \text{ CV}$$

donde CM y CV representan los efectos de las acciones permanentes y variables (sobrecargas de servicio) respectivamente.

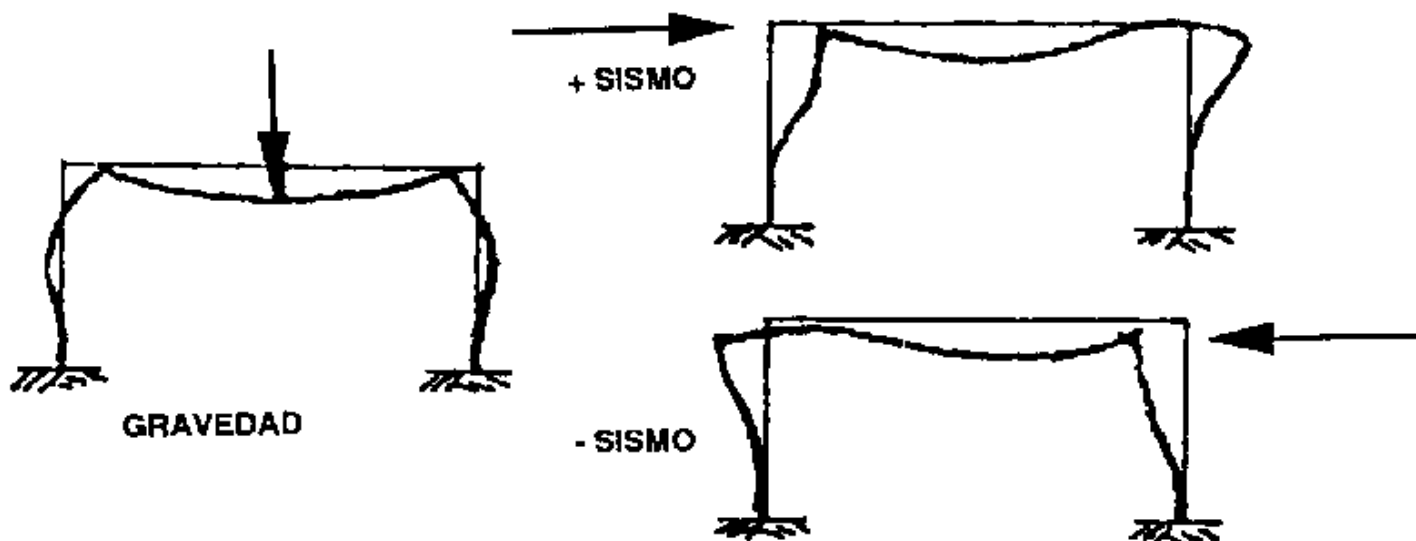


Figura 9. Superposición de efectos: gravedad + sismo

En la verificación de la seguridad para **situaciones accidentales**, de un modo general se exige que la estructura esté diseñada para satisfacer ciertos estados límites últimos. En el caso de las acciones sísmicas,

en muchas normas vigentes se establece que no se debe exceder el estado límite a nivel de daños irreparables; tal condición se cumple si la resistencia de diseño es por lo menos igual a la mayor de las siguientes combinaciones de acciones:

$$\begin{aligned} &CM + 1.2 CV \pm S \\ &0.9 CM \pm S \end{aligned}$$

donde S representa los efectos de las acciones sísmicas.

En aquellos casos donde no se satisfacen las condiciones recién anotadas, aumenta la probabilidad de una conducta catastrófica; ejemplos de tal conducta en edificaciones se han ilustrado al comienzo. Fallas en las obras de contención como los muros de la figura son poco frecuentes; en la verificación de su seguridad deben tomarse en cuenta los empujes dinámicos y eventuales efectos del nivel freático. (Diapositiva 25)

Problemas de diseño arquitectónico de hospitales en zonas sísmicas

Arq. Jorge Quiroz

Introducción

El problema de construcción de edificios en zonas sísmicas es complejo y se evidencia en la edificación de hospitales, no sólo por sus difíciles requerimientos técnicos, también por las condicionantes en casos de desastres. Es el hospital la infraestructura que más debe resistir en una situación de emergencia, para poder dar asistencia a las gentes afectadas o a los heridos como consecuencia de la catástrofe. Es por lo tanto en estos centros de salud, ubicados en los países en zonas sísmicas, donde los requerimientos técnicos deben normarse. Dichos requerimientos no solamente deben estar referidos a las condicionantes del cálculo estructural, sino que han de comprender a las diferentes profesiones, desde la programación arquitectónica, el anteproyecto de arquitectura y de las demás especialidades, llámense médicas, de ingeniería eléctrica o mecánica y sanitaria, programación de obras y construcciones. Es por estas razones que he aceptado presentar esta ponencia, con el objeto de contribuir a tan importante tema que es sustantivo en nuestros países afectados por los movimientos telúricos.

El Planeamiento, el urbanismo y la arquitectura

Antes de adentrarnos en la materia del diseño arquitectónico de los hospitales en las zonas sísmicas, creo oportuno exponer aquí, ligeramente, algunas opiniones con las que la arquitectura conforma un conjunto complementario esencial o sustancial.

A través de la historia, con el desarrollo social de los pueblos, el proceso de industrialización y el conocimiento que sobre esto aportan la sociología, la economía y la tecnología, las poblaciones o asentamientos humanos se han venido ampliando, tomando nuevos rumbos y por lo tanto han nacido nuevos conceptos tales como la planificación y el planeamiento. Desde 1911 aproximadamente, se habló del City Planning y de otros términos relacionados. Con respecto al planeamiento debemos entender que es el conjunto de directrices de la organización urbanística. Más aún, el planeamiento y el urbanismo no se excluyen ni se contraponen, más bien constituyen una unidad de pensamiento y acción. Entre ambos, planeamiento y urbanismo hay una diferencia tal como el cuerpo y el alma. El planeamiento es una concepción de ideas que lleva a un fin, integra previsiones polivalentes, jerarquizadas, de acuerdo a los objetivos y, consecuentemente, no es pertinente exclusivamente a ciertas profesiones. Así el planeamiento debe encajar dentro de las políticas determinadas en la planificación nacional para las diversas áreas. Por consiguiente el plan precede al plano, así como el programa al proyecto arquitectónico. Por lo que plan y plano son una unidad. El urbanismo es una técnica en la que interviene la concepción de un todo y la creatividad para la búsqueda de las posibles soluciones, arribando al plano, es decir a la representación gráfica de las zonas y vías que el plan ha previsto, constituyendo una síntesis. El urbanismo conforma el casco dentro del espacio y con ello se organizan las poblaciones, sean éstas urbanas o rurales. Se dice por ello que el urbanismo se proyecta para la existencia en sociedad y la arquitectura para el hombre.

En esta configuración urbanística se encuentran los hospitales, los que se deben ubicar en la composición social de acuerdo a los fines que han de servir dentro del contexto de las necesidades y posibilidades económicas de los hombres y del país.

La arquitectura es el arte de la construcción o el arte de disponer toda clase de construcciones, según su objeto y las condiciones o necesidades que de él se derivan. Para ello, y de acuerdo a su finalidad inmediata, es una composición esencialmente bella. La arquitectura debe satisfacer las necesidades físicas y morales de los pueblos, proyectando viviendas sanas, cómodas y económicas; edificios para esparcimiento, para la salud y para los diversos servicios que las personas, instituciones o los estados requieran. Allí están las edificaciones para la educación, para el cumplimiento de los deberes religiosos, el embellecimiento de las poblaciones, su salubridad, la conservación de sus monumentos históricos del pasado para transmitirlos a las futuras generaciones, etc. La arquitectura es el conjunto de los conocimientos científicos y artísticos que constituyen la parte especulativa de este arte. La arquitectura está ligada a la ingeniería de forma directa, tan directa que son inseparables, complementarias y unitarias.

Los orígenes de la arquitectura como los de las demás artes no son conocidos. Claro está que las cuevas artificiales y las estrechas chozas con ramajes y troncos de los árboles fueron los primeros albergues ejecutados por la mano del hombre. La arquitectura ha pasado por una serie de etapas hasta nuestros días, lo que conforma la cultura de los pueblos. Se encuentran épocas como las neolíticas, la ciclópea, la sorprendente civilización egipcia con sus pirámides de Menfis, 4,000 años antes de Cristo. Así en el transcurso de la civilización, de las culturas, llegamos a las nuevas formas arquitectónicas que han alcanzado niveles sorprendentes con el desarrollo de la ciencia y su aplicación en la tecnología para las nuevas soluciones. Pero también esta nueva arquitectura tiene nuevos retos, mayores problemas que resolver para el alcanzar el auténtico bienestar del hombre y para preservar su salud. Uno de ellos es el de los movimientos telúricos, que hoy constituyen parte esencial de un proyecto en las zonas sísmicas.

Los componentes de la arquitectura

El arquitecto debe afrontar situaciones bastante complejas, debe solucionar una cantidad de problemas tales como por ejemplo, el fin que debe cumplir el edificio, el lugar o ubicación en que debe levantarse, incluidos los problemas dinámicos creados por los movimientos telúricos, los materiales y las técnicas a emplearse, las imposiciones económicas que hay que satisfacer y el logro de un conjunto unitario y orgánico. Aún más, el arquitecto entiende claramente, que su obra tiene valor y aporte cuando posee arte, gusto, y es un manifiesto de su personalidad.

La arquitectura debe conservar integración y síntesis de sinnúmero de conocimientos que la caracteriza y que la hace diferente a una profesión simplemente técnica. Tratando de resumir lo dicho, la arquitectura tiene tres grandes componentes: el Medio Ambiente, el Humano y la Composición. Dentro del primero se pueden considerar la geología, los movimientos sísmicos y los posibles desastres, la topografía, la humedad, las precipitaciones pluviales, los vientos o ventilación, la iluminación y el asoleamiento constituyentes del clima y la vegetación. El factor humano comprende las características políticas, sociales, económicas, religiosas y tecnológicas. La composición incluye las necesidades de uso, la personalidad de la obra, las formas, plasticidad, equilibrio, el ritmo, el aporte artístico, etc. Desde este punto de vista, la arquitectura no puede ser examinada como lo hermoso o desde sus impresionantes composiciones, es una manifestación técnica, artística y cultural que satisface las condicionantes de la ingeniería, que impone estabilidad en la edificación y previsiones contra cualquier tipo de emergencia.

Los hospitales

Desde el punto de vista de la arquitectura son las construcciones más distinguibles las que sirven para velar por la salud de las personas. Que procura la salud global desde todos sus aspectos, tales como el tratamiento de las enfermedades y el cuidado del funcionamiento del organismo de las personas, todo ello para la conservación de la salud, lo que conlleva el goce social de la población. Los hospitales en general cumplen tres funciones: la prevención de enfermedades, el diagnóstico y tratamiento de ellas y la convalecencia del paciente. Añádase además, la enseñanza y práctica de los futuros médicos y la investigación científica que los médicos efectúan in situ. Estos nosocomios comprenden la clínica, el hospital y el sanatorio.

La clínica es un pequeño hospital en el que se atiende a los pacientes hospitalizados y a los ambulatorios y, su importancia deviene no solamente de la calidad médica y asistencial, sino también del número de camas. En estas clínicas se proporciona alimentación, ropa limpia y todo otro requerimiento para el tratamiento de la salud. En el sanatorio se atiende a los convalecientes, y consecuentemente son edificaciones para las estancias prolongadas; tienen importancia pues permiten dinamizar el hospital por el descongestionamiento de los convalecientes, sobre todo en las consultas externas.

Por otra parte, por el área a que sirven, los hospitales pueden ser urbanos y rurales y dentro de ellos, nacionales y regionales. Por su especialización: generales y especializados, y por las economías que los hace funcionar, estatales, de instituciones descentralizadas, privados, etc.

Historia de los hospitales y las diversas etapas

La atención médica se remonta a las civilizaciones más antiguas, en especial a las orientales, griegas y romanas. Los griegos y romanos construyeron locales especiales anexos a los templos de Esculapio (ascliepei) para curar enfermos y el posterior reposo, disponiéndose ambientes separados para parturientas y moribundos. Se situaban en zonas con grandes ambientes abiertos, destinándose incluso áreas para la cultura física. Otra forma de atención fue el iatreo griego, en los que se hallaban, cercanos a las viviendas de los médicos, los dispensarios para consultas, curas y urgencias.

Desde comienzos del cristianismo los centros asistenciales para la salud estuvieron adyacentes a las instituciones religiosas. En las hospederías e incluso en las enfermerías de los conventos, se crearon tipos de hospitales de una sola nave que tuvieron su origen en los dormitorios de los religiosos o en las iglesias de una sola nave. El cambio trascendente se produjo con el Ospedale Maggiore, con distribución cruciforme y que posteriormente influyó en España, y luego ésta lo transmitió a Latinoamérica. Se norma que los hospitales deben construirse no sólo vecinos a una catedral o un convento, sino que las salas de hospitalización tengan un altar disponiéndose las camas en forma de que los pacientes puedan observar el Oficio de la misa. Así tenemos las grandes naves abovedadas, provistas de columnas y de estrechas ventanas. Incluso la arquitectura cruciforme se proyectó de manera que en el centro o ambiente común central se ubicara una capilla, dispuesta de tal manera que los enfermos de las cuatro naves pudieran observar el desarrollo de la Santa Misa. Luego se proyectaron hospitales de forma cuadrangular, con la hospitalización en los lados y con una capilla en el patio central.

En la época de la conquista española en América, los hospitales nacen como una necesidad frente al hecho de que los enfermos se abandonaban en las calles o en las plazas. Fueron en América los curanderos indígenas los que inicialmente se hicieron cargo de la salud, incluyendo a los propios españoles, redaliziándose la asistencia en la casa del enfermo.

Los hospitales datan en el Perú del año 1549, con la construcción del Hospital de Santa Ana, siguiendo el de San Andrés en el año 1556. Posteriormente tenemos el Hospital de San Bartolomé fundado el año 1646, que a pesar de los estragos que sufrió por el terremoto del año 1687 sigue funcionando hasta la fecha, naturalmente con ampliaciones y modificaciones y lamentablemente con una congestión abrumadora de pacientes. Asimismo en el Perú funcionan hospitales de épocas coloniales y de los primeros años de la República que han pasado por diversas remodelaciones por los terremotos, y que han tenido ampliaciones para operar aunque sin el necesario ordenamiento funcional.

Con respecto a la ubicación de los hospitales de esas épocas se tomaron las siguientes normas: situarlos en los perímetros de la ciudad para aislarlos por razones sanitarias o proteger a la población de las enfermedades; establecerlos en lugares amplios por su dimensionamiento y la necesidad de espacios para el esparcimiento de los convalecientes y para la edificación de templos, conventos y cementerios; facilitar el abastecimiento de víveres, instalar los servicios de agua, evacuación de aguas negras etc; y la cercanía de la población a servir.

Se puede decir sin lugar a equivocarse, que los hospitales han pasado por tres etapas. La primera comprende los tiempos descritos que llegan hasta comienzos del siglo presente, debiéndose añadir que el concepto se basa en pabellones aislados para lograr evitar contaminaciones y ambientes más higiénicos. Su inconveniente fue el de la circulación al descubierto para la comunicación entre pabellones. En la figura 1 observamos al hospital Arzobispo Loayza en Lima, que data del año 1925.

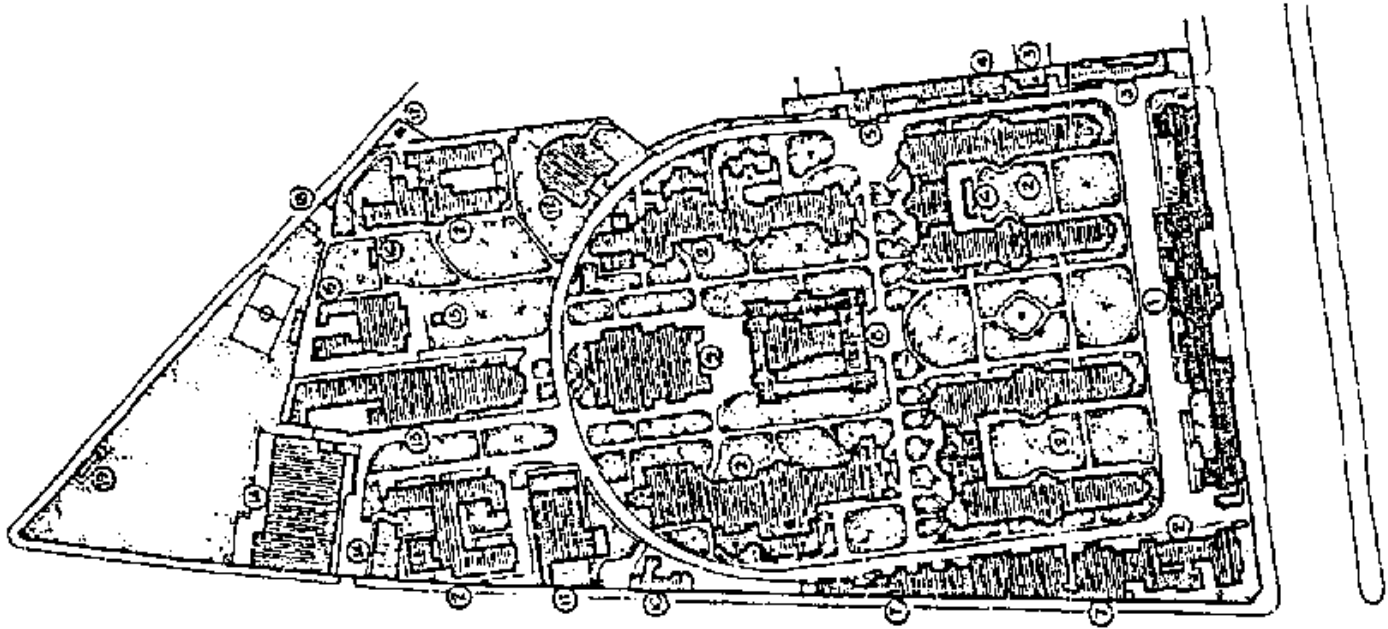


Figura 1. Hospital Arzobispo Loayza, composición general.

Los pabellones comunicados por medios de circulaciones cubiertas constituye la segunda etapa de la arquitectura. Aquí se logra unir los departamentos o pabellones diversos con galerías con techos, pero se mantiene siempre los grandes recorridos. Una primera idea de este tipo de solución la vemos en la figura 2, en el antiguo hospital Dos de Mayo y, la figura 3 nos muestra el Hospital de Ilo.

La tercera etapa se distingue por los hospitales que constituyen una unidad clínica "monobloques". Esto llegó con las nuevas técnicas constructivas, la invención del ascensor y el desarrollo de la organización médica. La superposición de pisos significó sacrificar las dimensiones óptimas y las disposiciones internas y, con frecuencia, las condiciones de iluminaciones, ventilación y asoleamiento. En consecuencia, el tipo de hospital jardín de pabellones aislados o unidos por medios de galerías, tan propios del siglo XIX, sufrió una crisis en nuestro siglo.

HOSPITAL DOS DE MAYO

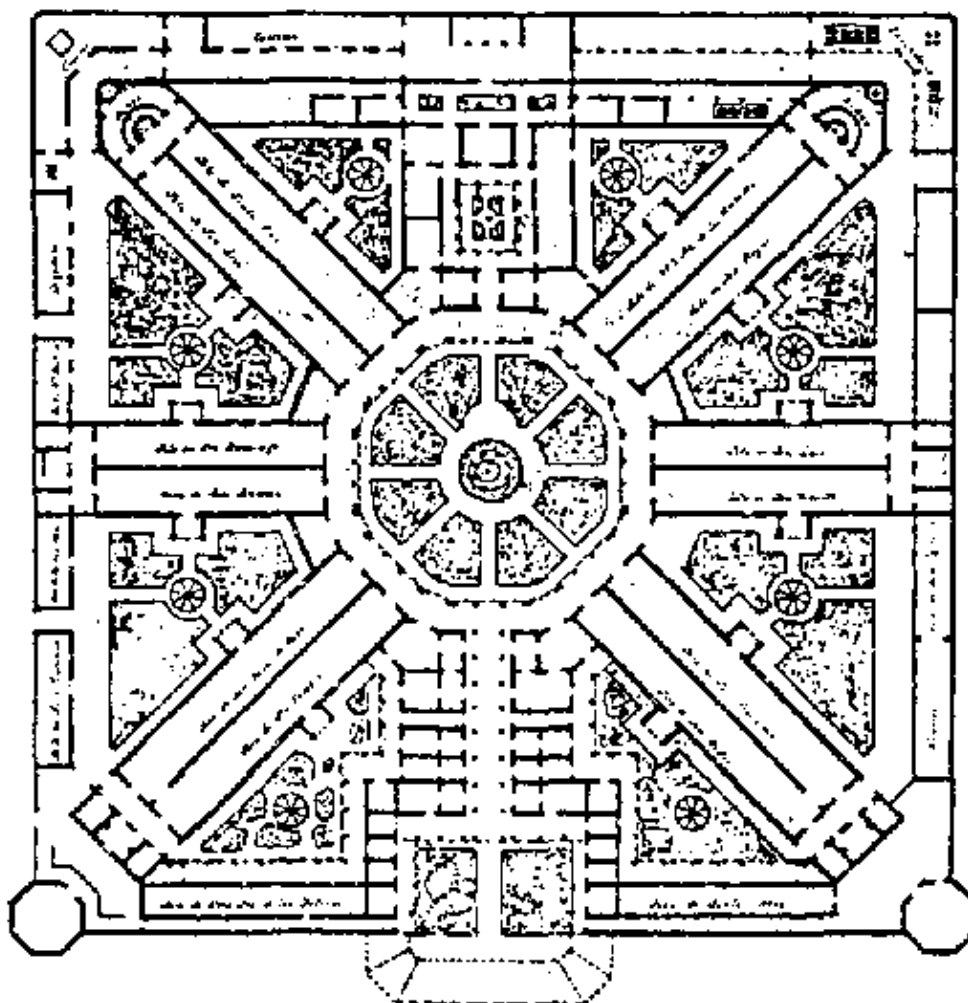


Figura 2. Hospital dos de Mayo, distribución general.

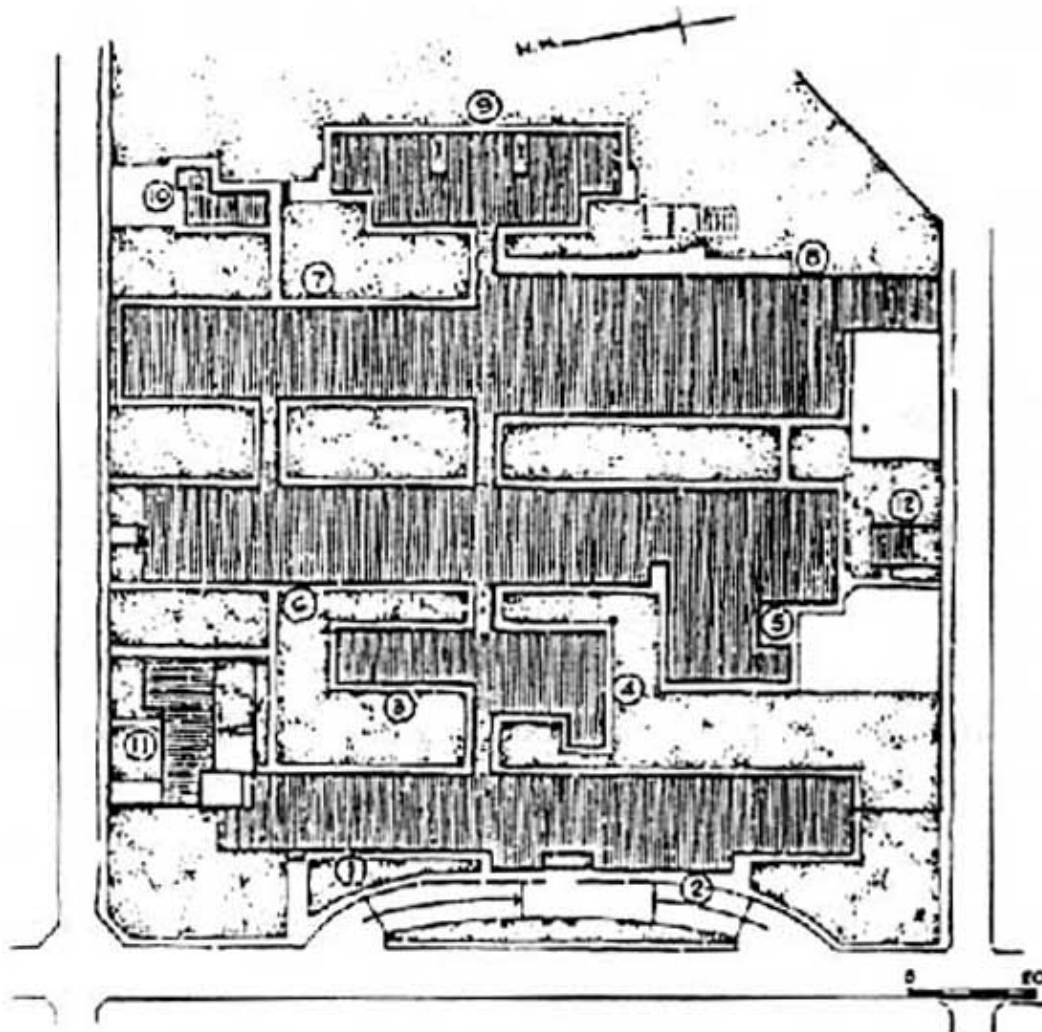


Figura 3. Hospital de Ilo, composición general.

Se construyeron las llamadas fortalezas contra la enfermedad, como el Medical Center de Nueva York. Pero todo ello no significó que se siguieran construyendo hospitales horizontales unitarios en Latinoamérica, por las propias condiciones económicas de los países en desarrollo. En América Latina se llegó a una expresión clara, tanto de funcionamiento de los hospitales, como de las condiciones que intervienen en el proyecto, como el clima, sistemas constructivos y escasos recursos económicos. En lo relativo al clima, se trató de aprovechar los medios naturales por el ya citado factor económico, esto por el costo de los equipos de aire acondicionado, cuanto por su mantenimiento.

En las soluciones se han tomado en cuenta las características sismo-resistentes, tratando incluso de unir los volúmenes simples por medio de puentes articulados en ambos lados. Las figuras 4 a 7 muestran hospitales "unidad clínica de salud" en el Perú, El Salvador y Brasil.

Los desastres y las edificaciones hospitalarias

Muchos han sido los terremotos que constantemente han asolado a Latinoamérica. Por citar, en el Perú el terremoto del año 1746 y el de 1646 destruyeron, el primero, el Hospital de San Lázaro y el segundo, el Hospital de San Juan de Dios. Esto sin hablar de los años 1940 y siguientes. Estos movimientos sísmicos provocan el pánico, la muerte, la desolación, la destrucción de hogares, la salud, la afectación de los servicios, la destrucción de la ganadería, agricultura, etc. Si agregamos los huracanes, maremotos, inundaciones, desplazamientos de tierras, erupciones volcánicas, incendios y explosiones, el panorama es pavoroso.

Todos estos fenómenos naturales o provocados por el hombre se presentan inesperadamente alterando la salud de la población y en consecuencia el funcionamiento normal de los hospitales. Incluso afectan al propio hospital, por lo que agravan más aún el problema de la salud de los implicados. Deben tomarse las medidas para proteger a la infraestructura hospitalaria y trazar los planes para organizar a las instancias involucradas en la atención de los pacientes. No hay que olvidar, que son los hospitales los centros más importantes en

casos de estas emergencias y, en consecuencia, son los primeros llamados a conocer del problema producido.

Será necesario el trazado de un planeamiento nacional de salud y un planeamiento regional de salud. Ambos comprenden los métodos y la infraestructura.

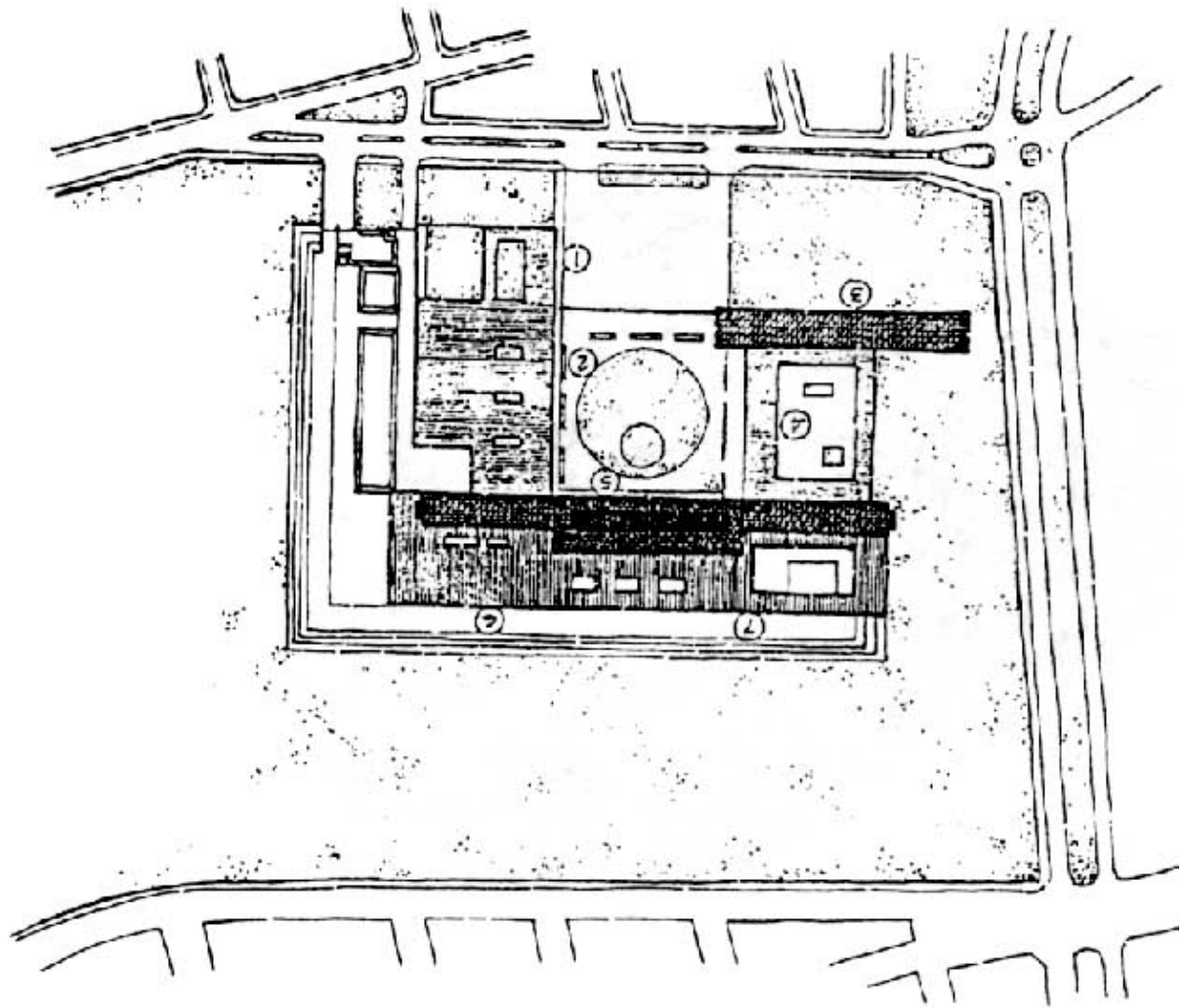


Figura 4. Hospital del Empleado, 1000 camas, composición general.

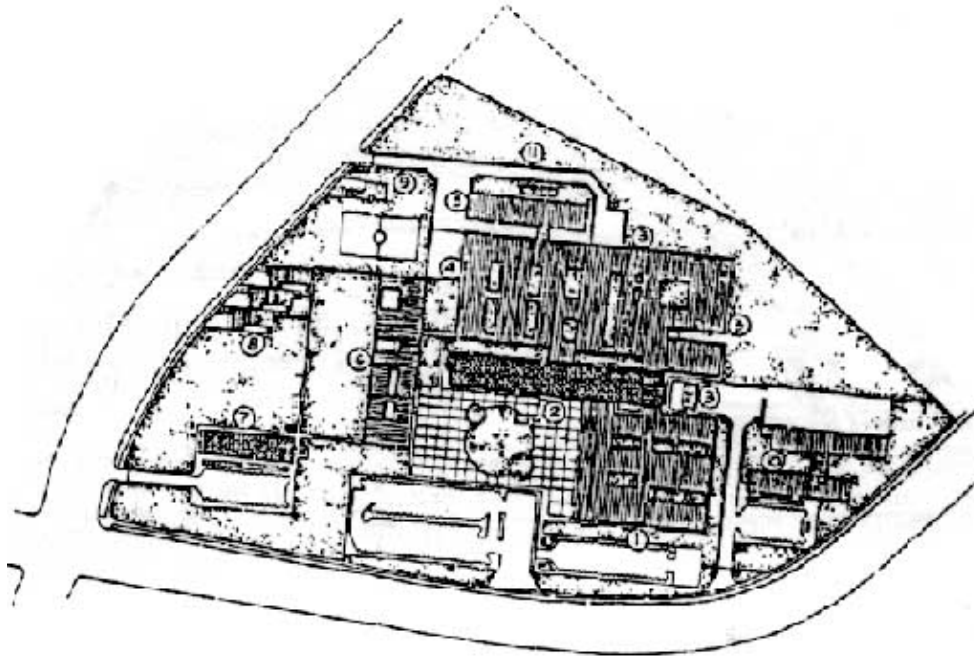


Figura 5. Hospital de Chimbote, 300 camas, composición general.

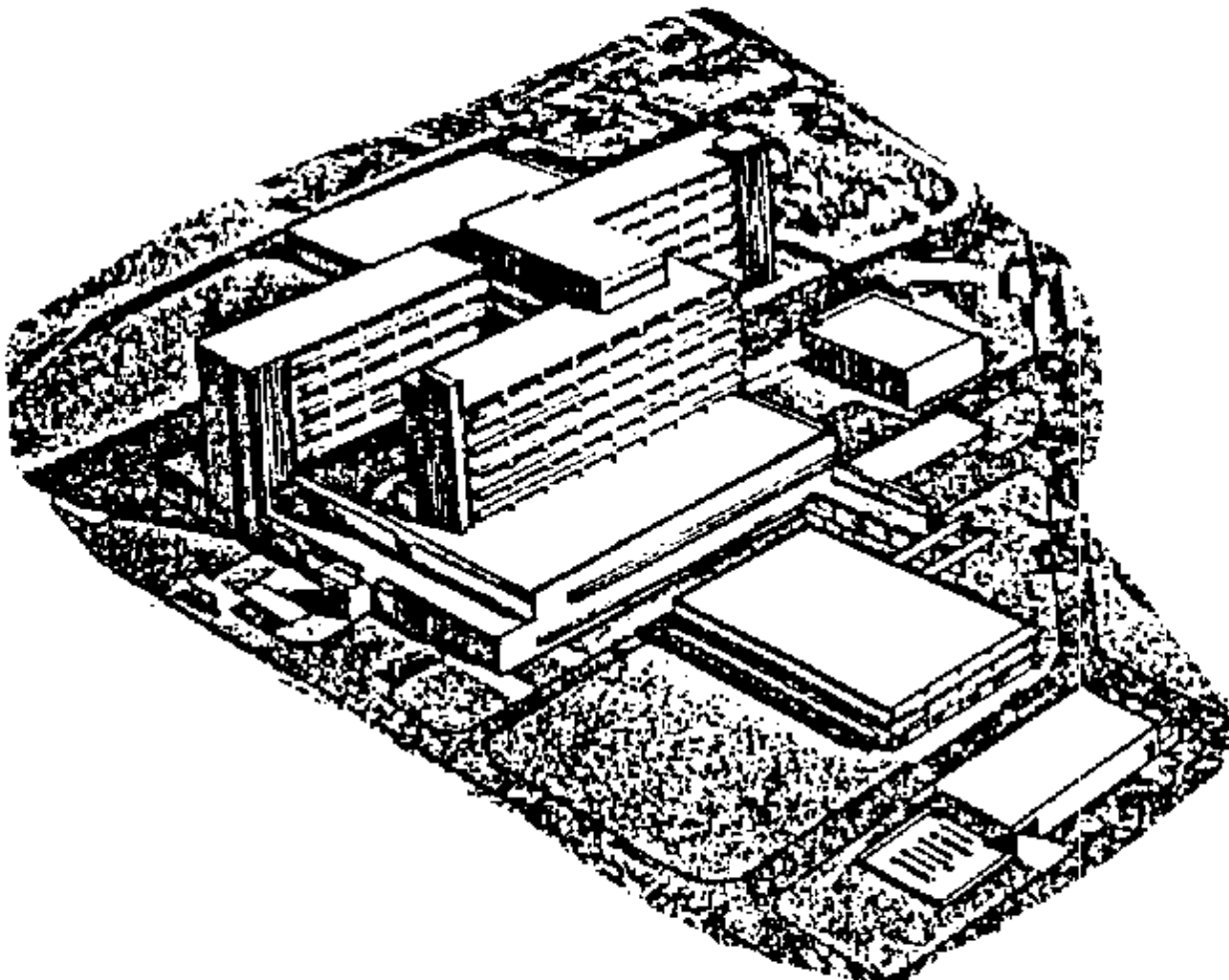


Figura 6. Hospital General de El Salvador, 360 camas, composición general.

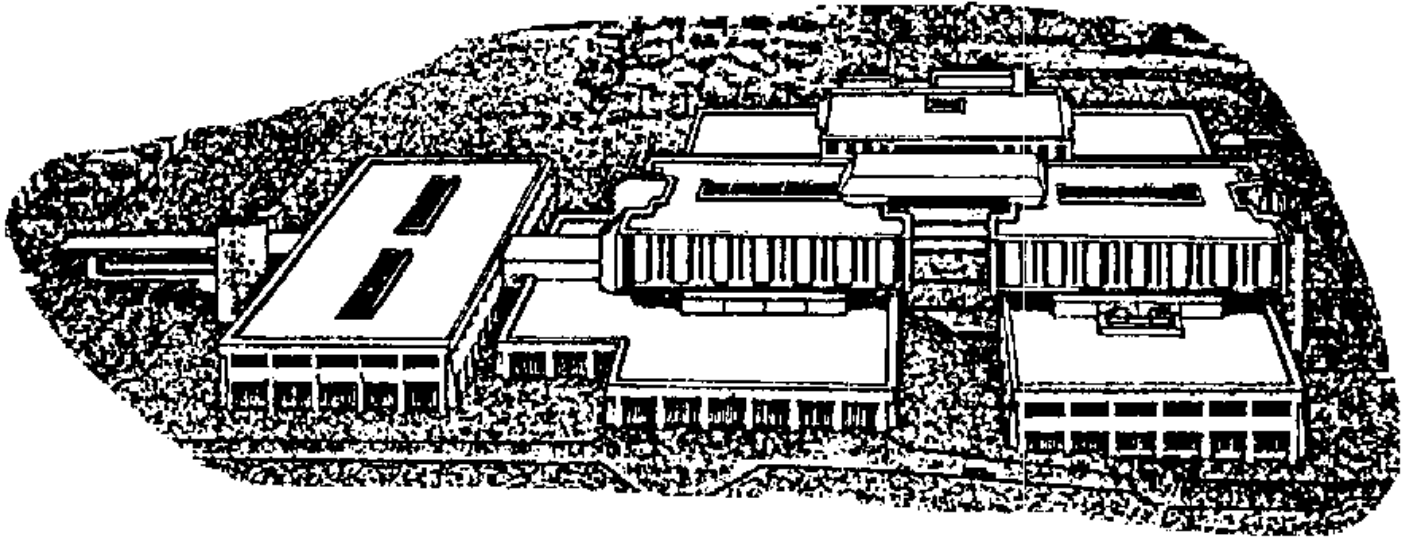


Figura 7. Hospital de Campinas, Brasil 400 camas, composición general.

En cuanto a los hospitales, éstos pueden ser afectados tanto en su estructura cuanto en sus instalaciones. En estos casos se hace necesario disponer de áreas libres para la atención de los enfermos. Pero lo ideal es que los hospitales continúen funcionando, para lo cual se deben tomar las medidas conducentes a este fin. Otro factor es el de la saturación de los hospitales por el número de enfermos, lo que acrecienta el problema en casos de desastres.

En el Perú no se ha laseado lo suficiente el área de las infraestructuras hospitalarias. Incluso nada se ha normado sobre las características de los hospitales, de los sistemas posibles de establecer de acuerdo con la realidad socio-económica, de los posibles sistemas constructivos, de las modulaciones en relación con el equipamiento médico, etc.

No hay que olvidar que el hospital es el lugar en donde se debe tratar a todos los afectados y, en consecuencia, son los edificios que deben resistir más los terremotos.

La arquitectura antisísmica y las estructuras e instalaciones

Se ha dicho con mucha frecuencia que el cinturón en donde se producen los más frecuentes terremotos es el cinturón circunpacífico. en relación con las otras zonas del mundo. Nuestros países están ubicados en estas áreas sísmicas y de ello somos conscientes, específicamente los arquitectos.

Por este motivo, hoy en día nos preocupamos cada vez más por el diseño de volúmenes que tiendan a restar la acción dinámica de los movimientos telúricos. Es parte de una de las condicionantes del diseño plástico, el comportamiento dinámico en caso de movimientos telúricos, o es parte la estabilidad de las construcciones. Solamente así los arquitectos podrán concebir formas y estructuras que permitan el cálculo adecuado por los ingenieros estructurales, quienes tienen muy presente las condiciones de los terrenos y su topografía adyacente. En la actividad de los proyectistas, sobre todo de hospitales, está la disciplina de mitigación de desastres, por lo que es una actividad polivalente.

La composición volumétrica es una de las primeras concepciones del arquitecto, y son estas formas plásticas las que deben adecuarse a las condicionantes antisísmicas, sin quitarle a la idea la composición y el equilibrio, así como la armonía y el ritmo a la creación. Luego hay que considerar la estructura y las juntas dinámicas o de dilatación, en ambos casos el ideal sería el de las estructuras simétricas para que en el trabajo dinámico las formas actúen con igualdad de condiciones. Pero en un hospital esto es muy difícil de lograrse. En efecto, tenemos que los diversos departamentos de un hospital tienen corredores de diferentes anchos, así: el pasadizo de hospitalización es de 2.40 mts. y el de la consulta externa no baja de 4.80 mts. Este problema se presenta tanto en los edificios de varios pisos cuanto en los de un piso. Por otra parte, eliminar las columnas por trabes es antieconómico a pesar de que con los sistemas actuales del pretensado de concreto se logran grandes luces. En todo caso el problema hay que estudiarlo para cada situación. Serán las juntas dinámicas las que en una u otra posición y en armonía con la composición volumétrica, permitirán armonizar el comportamiento de los diversos componentes en casos de movimientos sísmicos.

Las placas de concreto o los vanos entre columnas y vigas arriostradas por vigas diagonales son consideradas por el arquitecto, quien con el calculita, habrá de proyectarlos desde las bases hasta el último piso del edificio. Son estas placas las que permiten absorber los esfuerzos dinámicos en el caso de columnas cortas, que son puntos neurálgicos y más comunes en los que fallan las estructuras. En cuanto a las columnas perimetrales de las fachadas longitudinales tenemos las situadas en el interior de dicha fachada, con el objeto de construir los muros cortina. Estos muros no son recomendables para los hospitales, pues quitan la posibilidad de ubicar diversas instalaciones en los perímetros y, en cuanto a la presentación arquitectónica, desvirtúan el carácter del propio hospital, desnaturalizando su concepción.

Son muy variadas y complicadas las instalaciones de un hospital. Por citar algunas tenemos las siguientes: agua potable y plantas de ablandamiento, agua fría y caliente con su bombeo correspondiente, servicios contra incendios, desagües pluviales, desagües de aguas negras y desagües corrosivos con sus plantas de dilución, vapor, oxígeno, aire comprimido, vacío para la succión, grupos electrógenos, alumbrado externo e interno, teléfonos incluidos los intercomunicadores, ubicación del personal, televisión, aire acondicionado, ascensores, equipamiento médico.

Estas instalaciones sanitarias y electromecánicas deben construirse con las debidas normas técnicas, que permitan las dilataciones o expansiones y compresiones en los puntos estratégicos, para evitar su paralización por roturas. Son instalaciones muy valiosas por su alto costo, por lo que su trazado debe ser visto con criterio integral por el arquitecto.

La ubicación de los hospitales

Para la determinación de la ubicación de un hospital hay que considerar tres aspectos: los enfermos, los médicos y los elementos complementarios. Son los estudios de factibilidad médica los que incluyen sobre todo, estos dos primeros campos. El hospital debe ubicarse indudablemente en el lugar equidistante de los pacientes a atender, con el objeto de evitar las migraciones, el desarraigo, etc. Igualmente importante es contar con los médicos que atiendan en el hospital, sin tener que importarlos o desplazarlos a grandes distancias. Los elementos complementarios son el clima, los movimientos telúricos, las carreteras los servicios urbanos, etc.

Otro aspecto a considerar para la localización del hospital es su carácter mismo, es decir el hospital general será el más céntrico para facilitar el acceso de todas las personas involucradas, pues ubicarlo en la periferia sería obligar a prolongar las vías de comunicación, alejándolo de las otras partes de la misma ciudad y obligando a traslados innecesarios al personal y familiares y al propio enfermo hacia la consulta externa. En cambio, los hospitales dedicados al tratamiento especializado y prolongado se ubicarán en el perímetro de la ciudad o fuera de la ciudad. Los dedicados a emergencias deben estar próximos a las zonas de viviendas y los dedicados a maternidad o las clínicas, se dispondrán técnicamente dentro de la ciudad de forma de servir de "colchón" hacia el hospital general.

El equipamiento urbano para la salud

El equipamiento urbano está constituido por los edificios e instalaciones para la atención de los servicios básicos de la población, tales como la salud, la educación, el comercio, la recreación; de carácter público y privado, etc. Urbanísticamente se les considera centros de trabajo. Su influencia o amplitud de influencia depende de dos factores: la dimensión o capacidad, y la periodicidad de su uso. Naturalmente que estos factores obedecen a una serie de circunstancias, las que en unos u otros casos atraen a las poblaciones de un distrito o de una área de mayores dimensiones. El equipamiento concentra a la población gestando la vida colectiva de ésta. Dentro del urbanismo, el equipamiento es la estructura más importante.

Dentro del equipamiento para la salud tenemos los hospitales generales y de especialidad, los sanatorios y las clínicas, las emergencias y la consulta externa. Añádase también los otros centros de rehabilitación. Dentro de equipamiento los hospitales funcionan determinadamente en la estructura urbana, y para lo que se debe considerar los siguientes aspectos

- conexión directa con la vialidad primaria.
- accesos para el público, servicios y emergencias diferenciadas.
- plazas para el público en las zonas de acceso.
- áreas de estacionamiento para vehículos del público y personal.

- áreas verdes públicas y privadas del hospital que sirva como colchón contraruidos, olores, aire que contenga polvo, etc.
- unidos a vías de transporte público que los conecte con la ciudad.
- que su escala y fuerza de expresión se adecúen al contorno urbano.
- contar con áreas verdes para las futuras ampliaciones.
- disponer de área para posibles atenciones en los casos de máxima catástrofe.

Se recomienda que los hospitales no se encuentren situados directamente sobre carreteras, que estén alejados de las fábricas o zona industrial y, que en general, los accesos no se encuentran en vías congestionadas por el tránsito vehicular.

Numero de camas y población

El principio de la planificación de hospitales nace de una base técnica: el número de camas necesarias para la atención médica hospitalaria, de acuerdo con los estudios médicos de factibilidad de toda la población de país, y por regiones y, hasta las diversas localidades.

La disponibilidad de camas se calcula por cada 1,000 habitantes en todos los países del mundo, lo que permite con este parámetro determinar el grado de atención sanitaria que se presta en una nación. La disponibilidad de camas hospitalarias por cada mil habitante en Suecia, el año 1975 llegó a 16.4; en la República Federal de Alemania en el año 1976 a 11.8; en Venezuela, en el año 1977 a 3.54; y en Brasil en el año 1974 a 3.8. Según el urbanista Rigoti, deben tenerse de 5 a 8 camas/1000 habitantes; y de 15 a 20 camas en centros industriales.

El cuadro que presento a continuación nos muestra la realidad peruana:

CAMAS DISPONIBLES	PERIODO 1950–1986
Años	Tasa/ 1000 hab .
1950	2.29
1955	2.15
1960	2.40
1965	2.46
1970	2.33
1975	2.20
1980	1.92
1986	1.60

Fuente: Informática del Ministerio de Salud, OPS–OMS.

En efecto, en el Perú habían 32,349 camas para un estimado de 20,207,000 habitantes en el año 1986, según la Oficina de Informática del Ministerio de Salud. Los estudiosos de estos problemas de la salud han explicado que, dada la situación de los países en desarrollo, necesitaremos decenios de años para alcanzar los coeficientes de los países desarrollados.

Dimensionamientos por camas

De manera general se ha determinado que, el área o superficie necesaria por cama oscila entre 60 a 80 m². Esta cifra es muy variable y depende del país en que se encuentre el hospital, el grado de desarrollo técnico y las condiciones de salud que se acostumbra prestar a la población.

En general, los coeficientes que usualmente empleamos para determinar las áreas necesarias de los diversos servicios del hospital son diferentes, a los empleados en otros países desarrollados, dado el adelanto tecnológico alcanzado y la disponibilidad de fondos para edificar, cuanto para mantener el nosocomio. Si comparamos simplemente número de las salas de operaciones de un hospital nuestro con uno norteamericano, tendremos grandes sorpresas, pues para un mismo número de camas cuando menos duplican el número de salas de operaciones y de partos. Esto por la alta tecnología con que cuentan y las

facilidades, así como el número de personal.

La experiencia nos ha demostrado que los hospitales pueden tener un mínimo de 25 camas. El máximo número que hay en día se busca es de 800 a 1,000 camas. Se trata de que el nosocomio no alcance un número excesivo, con el objeto de hacerlo más operativo y controlable.

Los cuadros adjuntos nos muestran la última norma relativa a las áreas establecidas en el Pera para la edificación de hospitales particulares, y la promedia de México:

AREAS DE LOS HOSPITALES PARTICULARES : PERU		
Ambiente	m ² /cama	%
Administración	2.18	3.30
Consulta externa	5.17	8.20
Emergencia	2.08	3.10
Diagnóstico y tratamiento	5.35	8.40
Hospitalización	18.65	31.00
Centros quirúrgicos	3.11	5.00
Centro obstétrico y recién nacidos	2.18	6.00
Servicios generales y otros	13.39	22.00
Vivienda	7.86	13.00
Total	59.97	100.

AREAS PROMEDIOS DE UN HOSPITAL DE 50 CAMAS Instituto Mexicano de Seguridad Social		
Ambiente	m ²	%
Administración	150	4.34
Consulta externa	390	11.28
Diagnóstico y tratamiento	612	17.70
Hospitalización	1,450	41.94
Centro quirúrgico y centro obstétrico	385	11.136
Emergencia	115	3.336
Servicios generales	355	10.268
Total	3,457	100
Area promedio	69.14 m ² /cama	

Módulos

En relación con la modulación y la edificación, debemos observar que las experiencias ganadas en los países del mundo, después de coincidencias y desacuerdos, se han debido a la reducción del costo de las obras, incidiendo en sus tres vitales aspectos: modulación, productividad en las obras y mecanización.

Estados Unidos, Francia, Bélgica, Reino Unido, Suiza y otros, han normado la construcción. Estos países, a través de la División **EPA** (European Economic Cooperation Agency), de la **OEEC** (Organization for European Economic Cooperation), han desarrollado importantes aportes. La normalización de la construcción es uno de los factores importantes que se deben tener en cuenta en todo tipo de diseño. Naturalmente los países deben normar la producción de los elementos que intervienen en la obra. Así los proyectistas, llámense arquitectos o ingenieros, se verían obligados a usar los elementos normados que se producen para la construcción. Cabe señalar con respecto a la normalización, la fuerte objeción que mantienen por ejemplo los arquitectos, quienes ven que con estos nuevos parámetros se limita la creatividad de sus composiciones, alterando una serie de factores plásticos.

En mi opinión esto es relativo, pero lo importante, sobre todo en los actuales momentos de crisis económica por la que atravesamos, es la búsqueda de la productividad y la mecanización de la construcción como factor

para reducir los costos de edificación, sin dejar, por cierto la composición. La modulación tiene una base para su creación: ésta es la dimensión del hombre. De allí han partido todos los estudios y es por ello que nosotros, para los proyectos, hemos seguido la corriente norteamericana, en lo que a hospitales se refiere. El módulo es de 1.20 mts para dimensionar en superficie los diferentes componentes del nosocomio. De esta forma dimensionamos tanto un cuarto de hospitalización, como un baño, o una sala de cirugía. Incluso, los anchos de las circulaciones son un producto de 1.20 mts. por un coeficiente. Esta modulación nos permite dimensionar las estructuras del hospital entre 5×1.2 , es decir 6.00 y 6×1.2 , es decir 7.20 mts lo que se encuentra dentro del rango aceptable para el cálculo estructural en zonas sísmicas. Es este módulo el apropiado para absorber los movimientos dinámicos de los terremotos. A continuación se observan las figuras No. 11 y No. 12 en que se presenta un consultorio, tópico, servicios higiénicos y cuartos de hospitalización, debidamente acotados, con los módulos constructivos y equipados, con el objeto de observar el módulo y el funcionamiento integral.

Funcionamientos: en cada ambiente, entre ambientes y el partido arquitectónico

La labor del arquitecto se inicia con el estudio del programa médico. El análisis del programa nos permitirá dimensionar los diversos componentes. Además se deberá complementar con los servicios tales como los baños, lavaderos, estaciones eléctricas, tratamiento de agua, servicios, talleres, etc. Una vez terminado el programa arquitectónico con las áreas de ambientes y las de muros y columnas, el arquitecto procede al estudio de las siguientes etapas que definirán la solución y que se expondrán de manera general:

- características del territorio
- condicionantes sismorresistentes y resistencias de los suelos
- recursos naturales aprovechables
- entorno urbano
- vías de circulación
- transportes

El conjunto de los elementos constituirá un todo orgánico, que le permita al arquitecto pensar en dimensionamientos en superficie y volumen. Más tarde ejecutará el análisis de lo siguiente:

- funciones en un ambiente
- funciones entre ambientes
- partido arquitectónico

Las funciones en un ambiente o las diversas actividades que deben realizarse en él y los equipos que sean necesarios, conforman el conocimiento de cada componente del hospital.

Las funciones entre ambientes es la interacción entre los diversos ambientes, lo que permite al arquitecto crear las futuras unidades o departamentos.

El partido es la solución que toma el arquitecto, y que dará una disposición peculiar de cada componente y del conjunto. Es en el conjunto en el que deberá haberse observado las características dinámicas o de dilatación.

El partido es una decisión creativa y por tal el resultado de las condicionantes que todos los requerimientos exigen; también de las posibilidades económicas.

Hospitales Peruanos – Unidades de Salud y Monobloques

Para complementar las últimas concepciones del diseño de hospitales de los últimos años en el Perú y relacionarlos con las fuerzas dinámicas actuantes en las zonas sísmicas, estoy agregando los planos reducidos de los siguientes hospitales:

- hospitales de 50 camas que se vienen construyendo a lo largo del país.
- hospital de 50 camas para Huaral (investigación para la costa).
- hospital de Yurimaguas de 120 camas (selva del Perú).
- hospital de Huancayo de 500 camas (sierra del Perú).

Como no es posible entrar a tratar cada hospital analizándolo arquitectónicamente, nos vamos a referir a los elementos que menguan las acciones de los movimientos telúricos, por lo que los comentarios serán específicos y generales. Debo reafirmarme en que las disposiciones de los muros y las concentraciones de

los servicios contribuyen eficazmente a disminuir los riesgos, pues incluso facilitan las evacuaciones y concentran los servicios en casos de catástrofes.

- juntas dinámicas y de dilatación. Los nosocomios se encuentran divididos por juntas dinámicas y de dilatación en diversas direcciones con el objeto de conformar volúmenes independientes y en lo posible simétricos.
- juntas dinámicas y de dilatación entre volúmenes de diferentes alturas.
- placas de concreto para compensar las, zonas rígidas de ascensores y escaleras.
- placas de concreto para absorber los esfuerzos dinámicos de los terremotos de manera que el conjunto quede compensado.
- disminución de los riesgos en los casos de columnas cortas con la inclusión de placas estratégicamente ubicadas.
- ingresos al hospital diferenciados; del paciente, del público, del personal y de emergencia.
- esperas de público con circulaciones amplias para las evacuaciones.
- concentración de servicios y de personal en hospitalización y en los demás departamentos.

Escaleras estratégicamente ubicadas para la evacuación de las gentes.

- circulaciones del personal y del público diferenciados.
- ubicación de departamentos que eviten grandes recorridos o recorridos innecesarios.
- emergencias suficientes para un intenso tráfico de pacientes y relacionada íntimamente o directamente con cirugía, obstetricia, cuidados intensivos y ayuda al diagnóstico y tratamiento tales como rayos x, laboratorio, banco de sangre, etc.
- áreas externas para atención de heridos en casos de saturación del hospital o en el extremo caso que la estructura hospitalaria haya fallado.
- en general una circulación fluida tanto del interior como del exterior.
- zonas de estacionamiento vehicular.
- los edificios resistentes a sismos no tienen porque dejar de ser bellos o de primera categoría arquitectónica.

Mucho más se podría expresar sobre los hospitales en zonas de desastres, incluso de las nuevas tendencias del diseño en el mundo, pero el tiempo no lo permite.

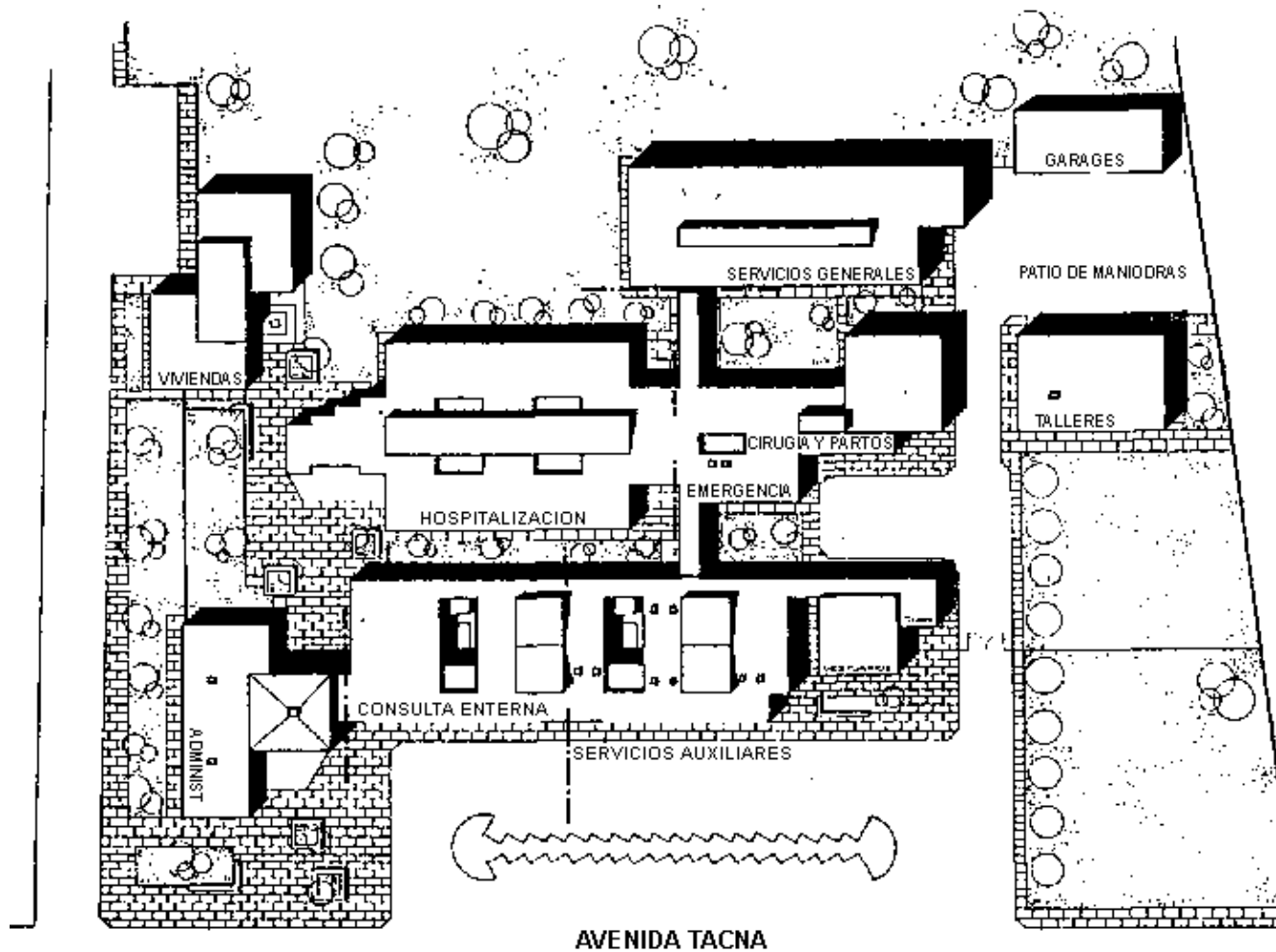
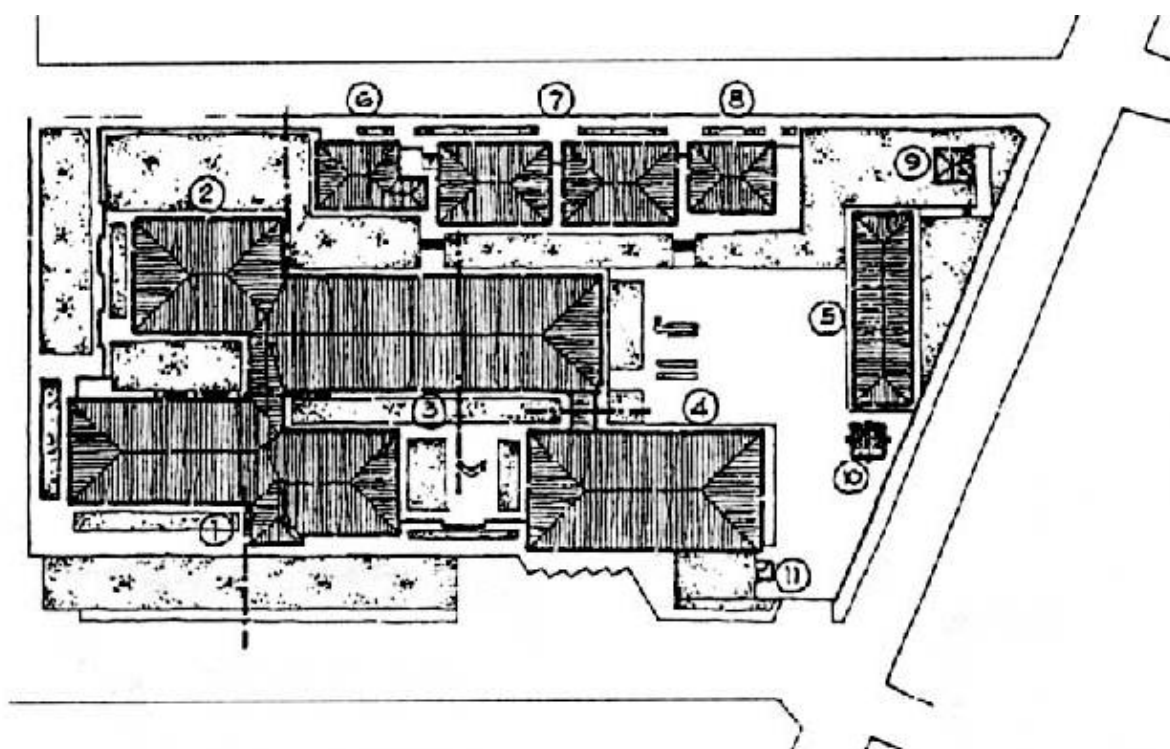


Figura 8. Hospital de 50 camas, conjunto.



Hospital de Huaral, 50 camas, conjunto.

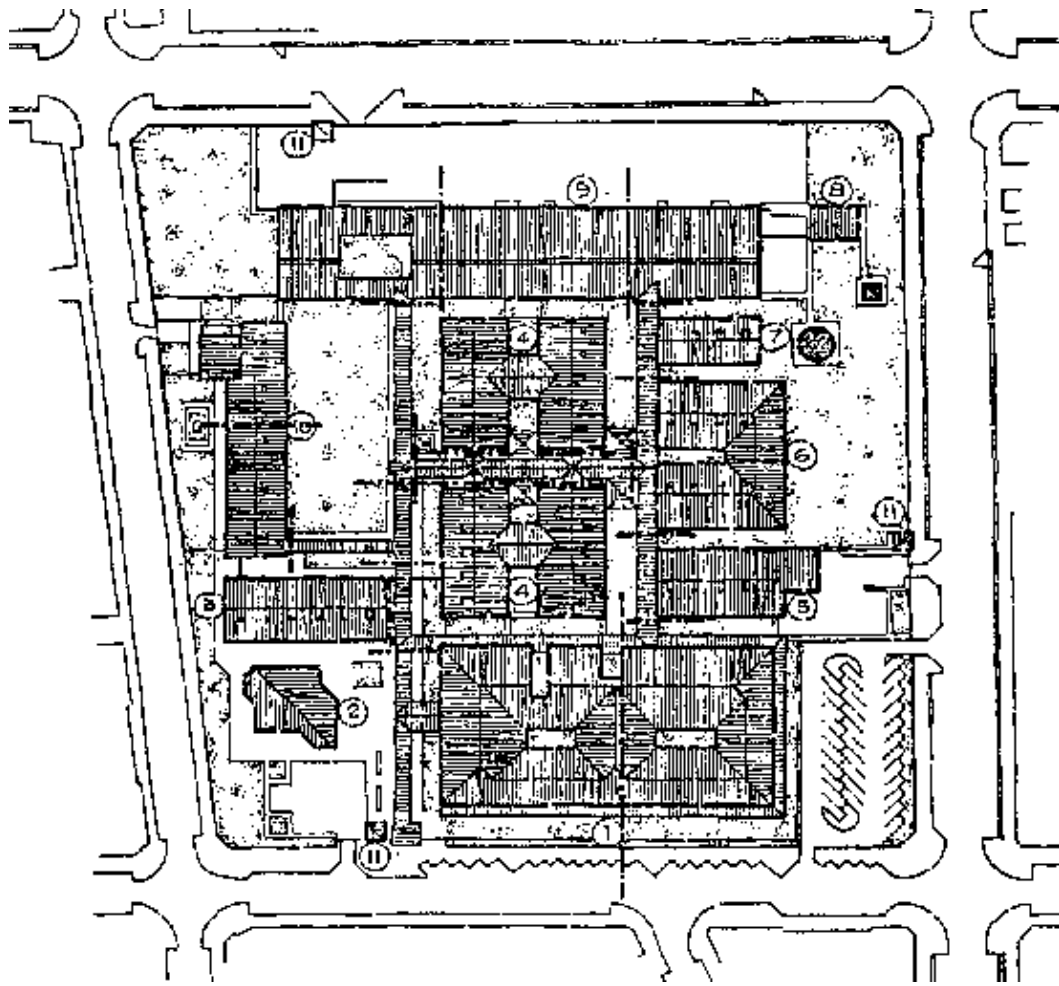


Figura 10. Hospital de Yurimaguas, 120 camas, conjunto.

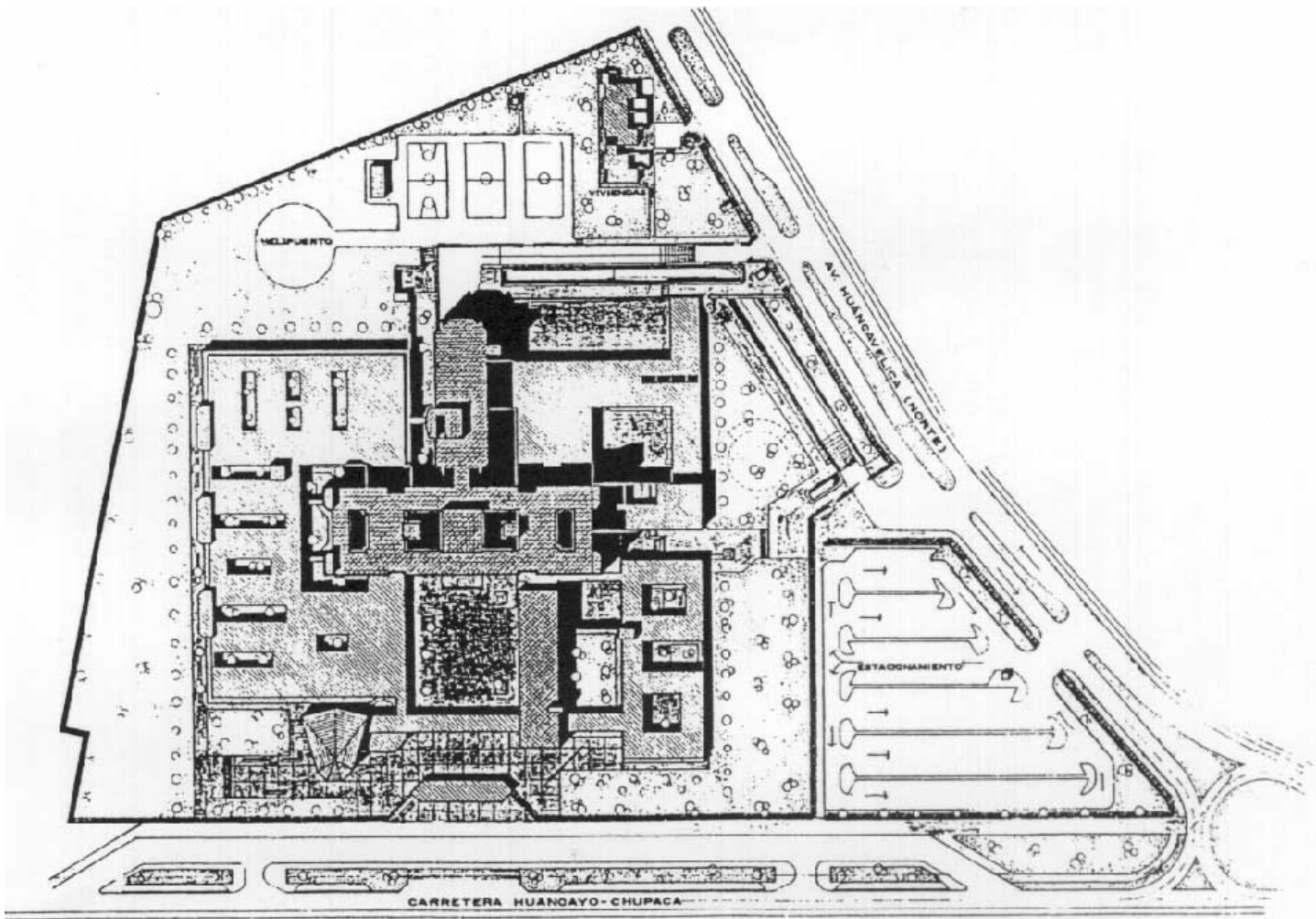


Figura 11. Hospital Regional de Huancayo, 500 camas, conjunto.

Normas de diseño sismorresistente en América latina: limitaciones

Ing. Jesús Iglesias

Introducción

Año de 7-pedernal y de 1460 según la (cuenta) nuestra, hubo un temblor de tierra y es de saber que como ellos temían que se había de perder el mundo otra vez por temblores de tierra iban pintando todos los años los agüeros que acaecían" (Códice Telleriano-Remensis)¹

La actividad sísmica ha tenido una presencia constante en la vida de los pueblos latinoamericanos, lo que nos permite rastrearla a las épocas prehispánicas a través de los códices que han sobrevivido hasta nuestros días.

La región latinoamericana está formada por las placas tectónicas de Norteamérica, Cocos, el Caribe, Nazca y Sudamérica fig. 1). Estas placas, de material *duro*, se asientan sobre el material *suave* de la astenósfera y se mueven como cuerpos rígidos que flotan a la deriva. El movimiento relativo entre ellas es la causa de la gran actividad sísmica generada en sus bordes, en las costas latinoamericanas del Pacífico y en la cuenca del Caribe. Los sismos de 1985 en Chile y México son ejemplos de las enormes pérdidas humanas y económicas que con frecuencia produce este mecanismo. Adicionalmente, los sistemas de fallas localizados en el interior de las placas tectónicas generan también una actividad sísmica importante en Latinoamérica, como lo demuestran los recientes temblores ocurridos durante 1986 y 1987 en El Salvador y Ecuador respectivamente (fig. 2).

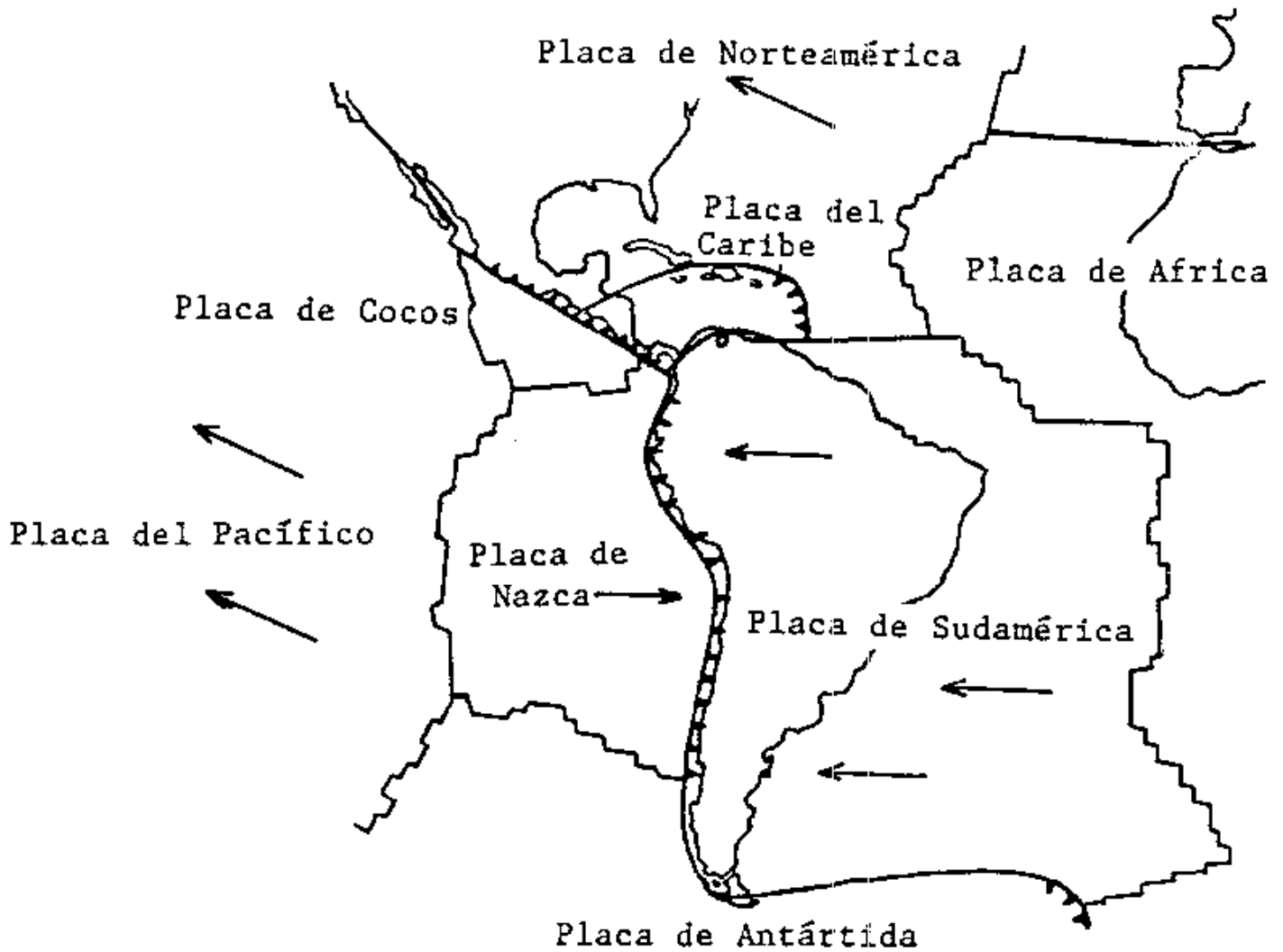


Figura 1. Placas tectónicas de América Latina

La importancia de la actividad sísmica en América Latina ha sido la causa de que la mayoría de los países que la integran hayan desarrollado normas de diseño sismorresistente, como una medida indispensable para la mitigación del riesgo sísmico. La intensa comunicación científica en el campo de la ingeniería sísmica, tanto a nivel internacional como dentro del ámbito latinoamericano, ha dado lugar a que la mayoría de estas normas respondan a un mismo esquema básico que será descrito en el resto de este trabajo. Con este propósito se revisaron la mayoría de las normas de diseño sismorresistente de América Latina, a través de las reí 2-9.

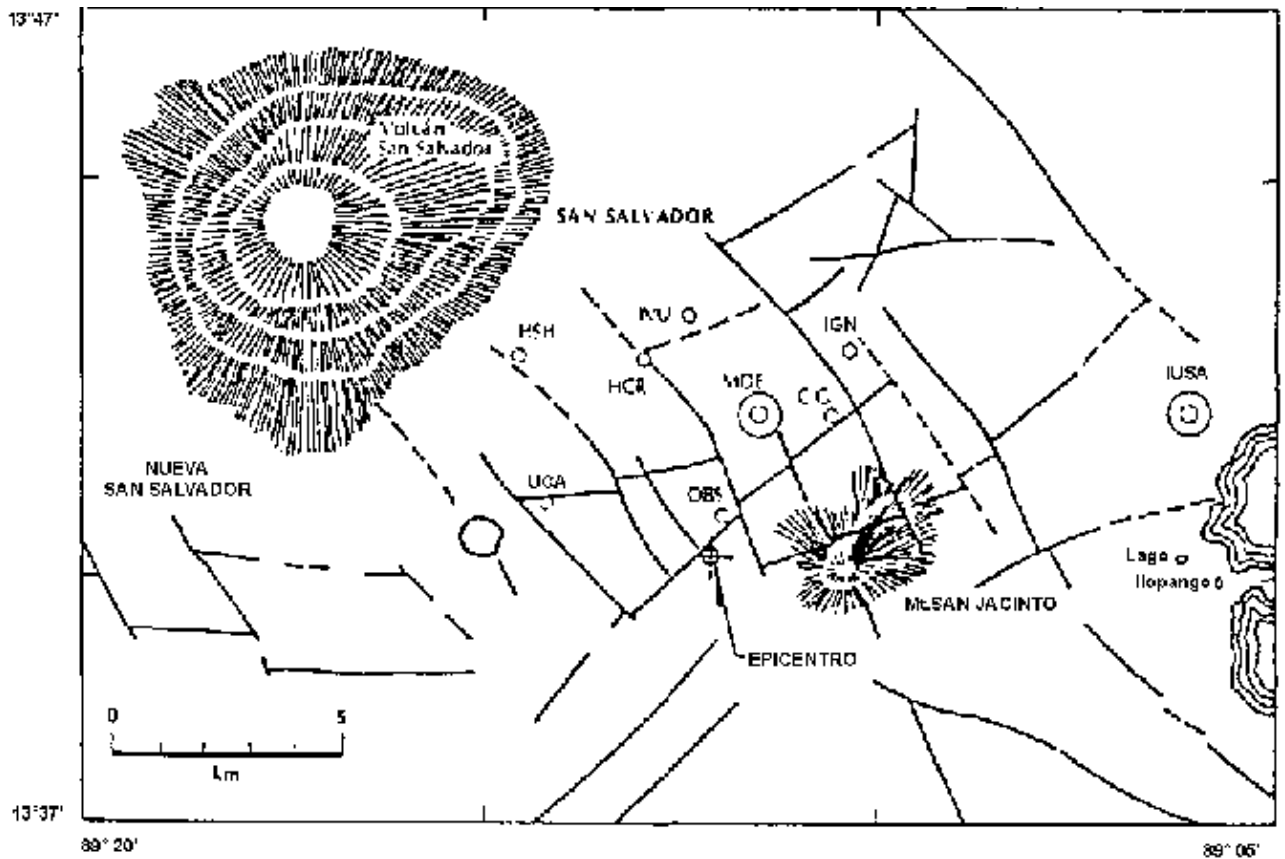


Figura 2. San Salvador con la ubicación de las fallas geológicas.

Filosofía de las Normas

La mayoría de las normas de diseño sismorresistente en América Latina tienen como objetivo fundamental el proporcionar los requerimientos mínimos para diseñar estructuras que: ante sismos menores no sufran daños; con sismos moderados los daños se limiten a los elementos no estructurales y ante sismos fuertes se evite el colapso.

Alcance

En general, las normas latinoamericanas son de aplicación nacional. Además, en su mayoría se limitan a las edificaciones de tipo urbano, aunque en muchas de ellas se incluyen recomendaciones específicas para cierto tipo de estructuras industriales o para la vivienda rural.

Riesgo Sísmico

- *Regionalización sísmica:* El análisis de la información sísmológica existente, tanto en los catálogos sísmicos como en las fuentes históricas, junto con la información geológica disponible en cada país, permite elaborar mapas de regionalización sísmica (fig. en donde se divide al país en zonas de igual sísmicidad. A cada zona corresponden parámetros específicos para la evaluación de las fuerzas sísmicas.

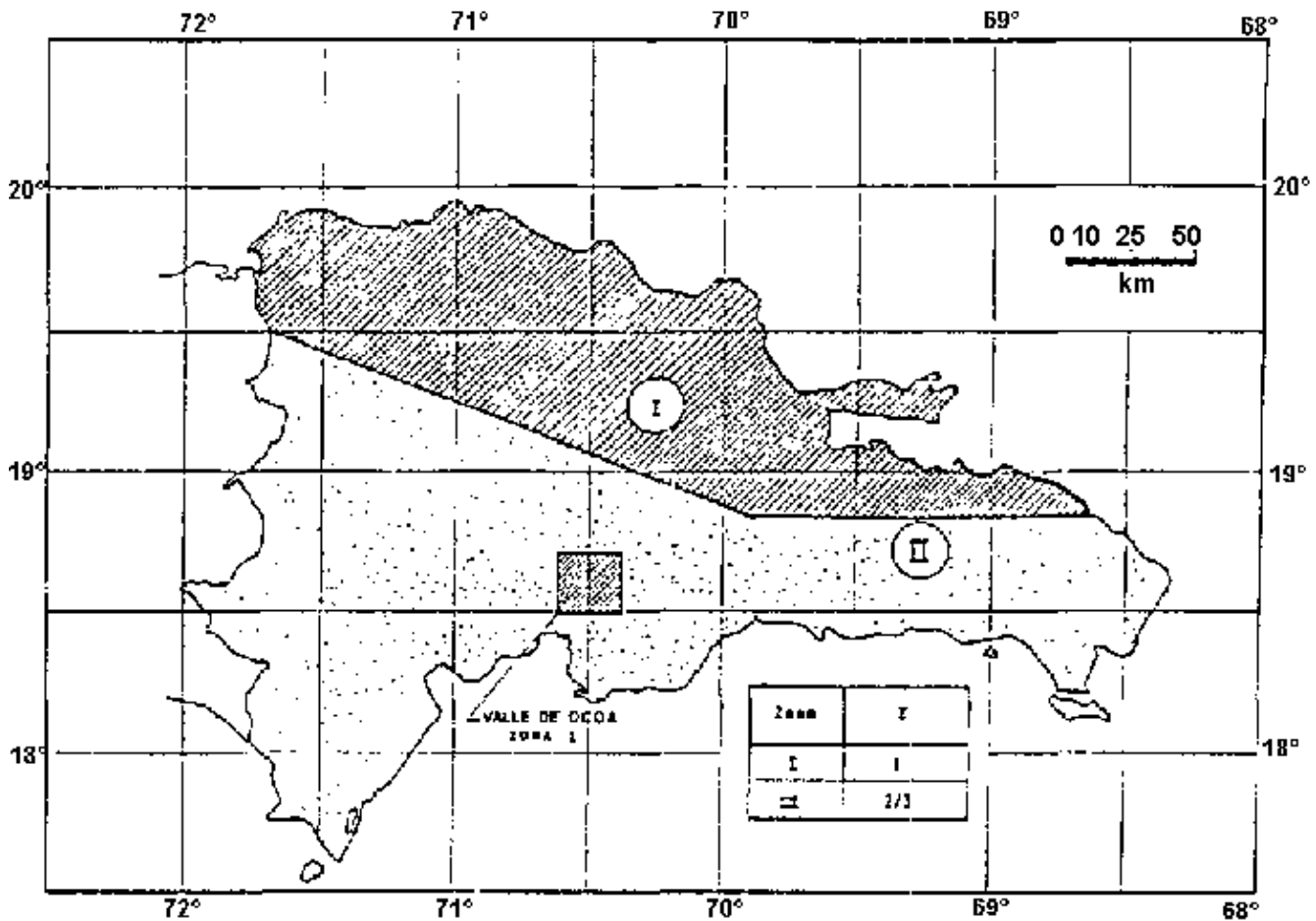


Figura 3. Zonificación sísmica de la República Dominicana.

• *Clasificación de las estructuras:* Para fines de evaluar las fuerzas sísmicas los edificios se clasifican de acuerdo con su uso y sus características estructurales.

En cuanto al uso, la mayoría de las normas distinguen a los edificios importantes, ya sea porque en ellos existan grandes concentraciones de personas, o porque su supervivencia resulte vital para responder a las situaciones de emergencia provocadas por los sismos. Conviene subrayar que los hospitales son un buen ejemplo, tanto de edificios con una gran densidad de uso, como de centros indispensables para la atención de las víctimas después de un sismo. En general, a los edificios importantes se les asigna un factor de sobrediseño que afecta directamente al cálculo de las fuerzas sísmicas.

Las características estructurales definen fundamentalmente el comportamiento inelástico de los edificios. Como se verá más adelante, un buen porcentaje de los reglamentos latinoamericanos proporciona coeficientes sísmicos y espectros de diseño que consideran el comportamiento inelástico de las estructuras, lo cual permite utilizar valores de diseño menores que los necesarios para mantenerse en el rango elástico. De aquí que sea necesario clasificar a las estructuras en función de las características que definen su capacidad para absorber energía en el rango inelástico. Esta clasificación permite asignar diferentes valores de los parámetros utilizados para el cálculo de las fuerzas sísmicas en cada caso. En aquellas normas en que se proporcionan coeficientes sísmicos o espectros de diseño elásticos, la clasificación de los edificios según sus características estructurales permite elegir el factor de reducción por comportamiento inelástico (factor de ductilidad) adecuado.

• *Coefficiente sísmico:* coeficiente sísmico define el porcentaje del peso total de la estructura que se debe considerar como cortante actuante en su base con fines de diseño. Para una región sísmica específica la mayoría de las normas proporcionan valores del coeficiente sísmico en función de las características estructurales, del uso del inmueble y del tipo de suelo. Los dos primeros factores se han descrito en los incisos anteriores, en cuanto al tipo de suelo, en general se distingue cuando menos entre suelos compresibles y suelos firmes. Los valores del coeficiente sísmico para suelos compresibles suelen ser mayores que para los firmes, ya que consideran la amplificación que sufren las ondas sísmicas en este tipo de suelos. En varios casos el coeficiente sísmico es también función del periodo fundamental de la estructura, por lo cual estos reglamentos proporcionan expresiones para su cálculo aproximado.

- *Espectros de diseño*: Para el análisis sísmico de estructuras utilizando modelos dinámicos se proporcionan espectros de diseño. Estos espectros son envolventes de los espectros de respuesta obtenidos para varios sismos en una cierta región y se deben calcular analizando con herramientas estadísticas la información disponible de manera que tiendan a garantizar una probabilidad reducida de excedencia. Los espectros de respuesta son gráficas de la máxima respuesta de sistemas de un grado de libertad con diferentes períodos, sujetos a la acción de un sismo determinado. Se suelen usar espectros de aceleración, que grafican períodos vs. aceleración en función de la aceleración de la gravedad, considerando un factor de amortiguamiento de 5% del valor crítico. En general, los espectros de diseño se definen mediante una rama ascendente (que en algunos casos se omite), una zona plana, cuya ordenada suele ser igual al coeficiente sísmico, y una rama descendente. Se suelen proporcionar espectros para cuando menos dos tipos de suelo: compresible y firme. el espectro correspondiente al suelo compresible se define con las tres ramas y los períodos que limitan la rama horizontal suelen ser mayores que para suelo firme (fig 4).

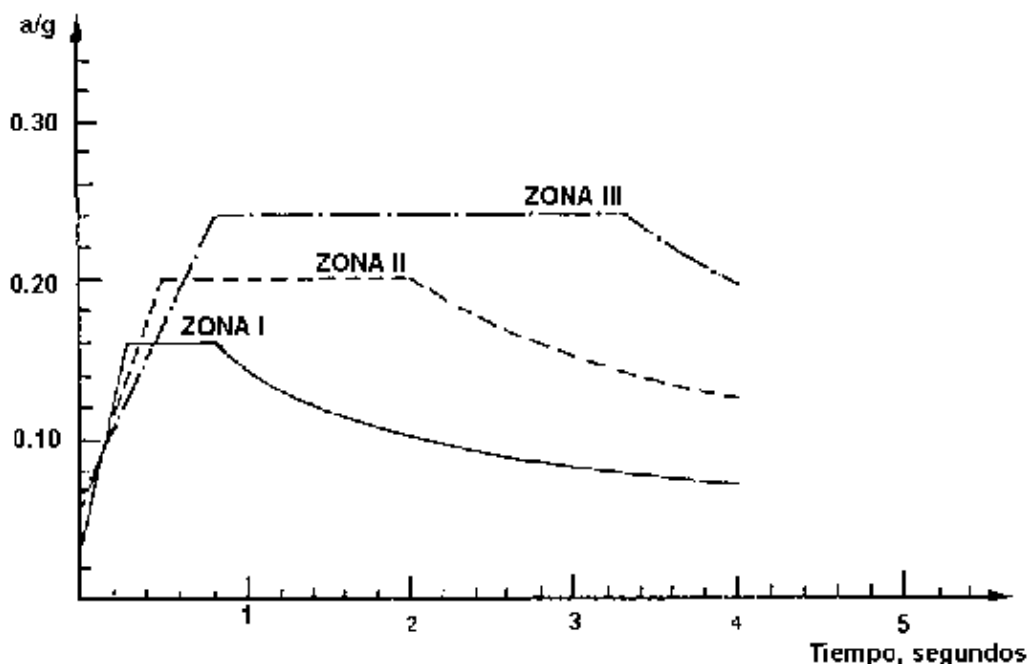


Figura 4. Espectros de diseño para los tres tipos de suelo en el Distrito Federal, Ciudad de México, 1976

Como se mencionó en Clasificación de las estructuras, una parte de las normas latinoamericanas proporciona coeficientes sísmicos y espectros de diseño reducidos por consideración del comportamiento inelástico de las estructuras. En otros casos se proporcionan los valores correspondientes al comportamiento elástico y se vuelve entonces necesario efectuar la reducción asociada al comportamiento inelástico, en función de las características de la estructura en estudio. También es necesario modificar estos valores para tomar en cuenta el uso de la estructura.

Análisis

- *Criterios generales*: En general, las normas de diseño sismorresistente latinoamericanas exigen que las estructuras se analicen cuando menos bajo la acción de dos componentes ortogonales del movimiento del terreno no simultáneas. Asimismo, en la mayoría de las normas se incluyen recomendaciones generales para modelar las estructuras suponiendo un comportamiento elástico de los materiales.

Además de los modelos de análisis propuestos, que se describen a continuación, las normas suelen incluir recomendaciones especiales para la evaluación de las fuerzas sísmicas en apéndices y estructuras especiales como tanques y muros de retención.

- *Análisis estático*: Para el cálculo de las fuerzas sísmicas, el análisis estático considera el uso de coeficientes que corresponden a una aceleración que varía en forma lineal, desde cero, en la base de los edificios, hasta un máximo, en la parte superior, de tal manera que el cociente de la fuerza cortante en la base V entre el peso total del edificio W sea igual al valor del coeficiente sísmico C (fig. 5). Esta simplificación conduce a resultados suficientemente precisos en edificios donde la influencia de los modos superiores y las deformaciones axiales de las columnas no sean importantes. Para tomar en cuenta de manera aproximada la posible subestimación de las fuerzas cortantes en los pisos superiores, en algunos normas se considera una

fuerza concentrada en la azotea del orden del 5% de la cortante basal.

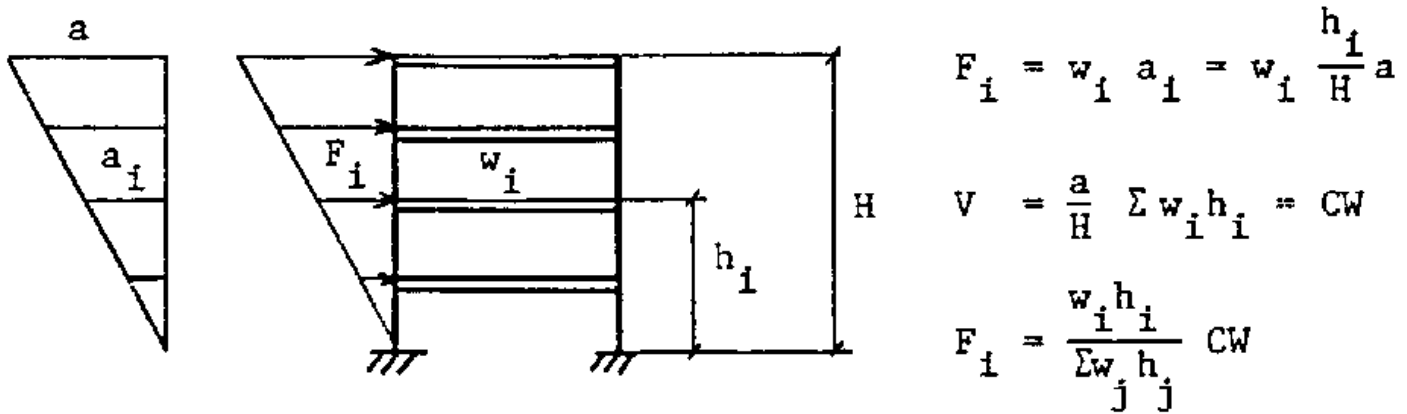


Figura 5. Método estático según el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, Ciudad de México.

De acuerdo con lo anterior, la fuerza sísmica que actúa en el piso *i* está dada por:

$$F_i = \frac{w_i h_i}{w_1 h_1 + w_2 h_2 + \dots + w_n h_n} C W$$

donde:

- w_i = peso del piso *i*
- h_i = altura del piso *i* sobre el nivel de desplante
- n = número de pisos
- C = coeficiente sísmico
- W = peso total de la estructura

• *Análisis dinámico*: El análisis estático es obligatorio en la mayoría de las normas, sin embargo, para estructuras elevadas o irregulares se recomienda recurrir también al análisis dinámico modal utilizando espectros de diseño. Con este fin, se suele admitir el modelar las estructuras mediante un sistema de masas concentradas en los pisos (fig. 6.)

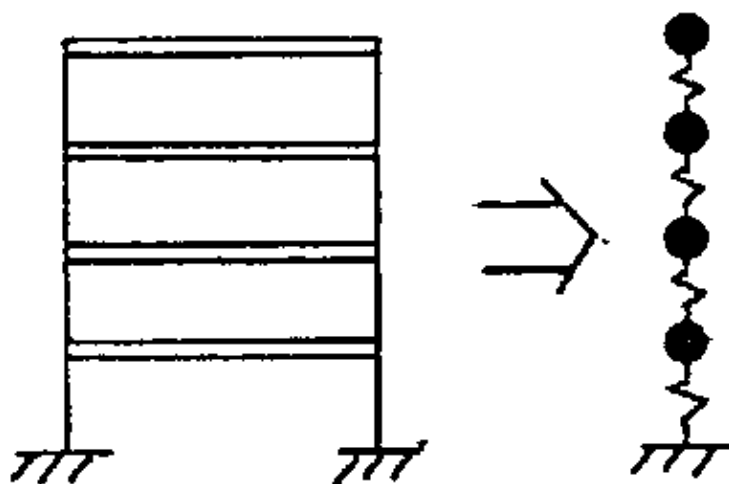


Figura 6 Modelo de masas concentradas para el análisis dinámico.

En general, se dan recomendaciones para determinar el número de modos necesarios. La combinación modal se efectúa en la mayoría de los casos recurriendo a la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de la respuesta de cada modo.

En la mayoría de las normas latinoamericanas la fuerza cortante basal obtenido del análisis dinámico no puede ser menor que un porcentaje de la obtenido del análisis estático. Este porcentaje oscila entre el 60% y el 80%.

- **Análisis simplificado:** La mayor parte de los códigos de diseño sismorresistente propone un método simplificado para el análisis de inmuebles de poca altura, estructurados a base de muros de carga. La simplificación consiste en que no se requiere calcular los desplazamientos, ni distribuir las fuerzas cortantes entre los diferentes elementos estructurales, siempre que se cumplan ciertos requisitos de regularidad y que la disposición de los muros sea tal que no sean importantes los efectos de torsión.

En general se limitan: la relación de esbeltez de la construcción; su relación ancho a largo en planta y su altura. Además, se requiere que en cada nivel existan al menos dos muros perimetrales paralelos, con una longitud significativa respecto a la dimensión del edificio, que garanticen un buen comportamiento ante problemas de torsión. En estas circunstancias se hace caso omiso del cálculo de los desplazamientos y basta verificar solamente que, en cada piso, la suma de las resistencias al corte de los muros de carga sea cuando menos igual a la fuerza cortante total en dicho piso, calculada mediante el análisis estático.

- **Distribución de las fuerzas cortantes:** Las normas de diseño sismorresistente proporcionan recomendaciones para la distribución de las fuerzas cortantes, sobre la hipótesis de un comportamiento rígido del sistema de piso. De cumplirse esta condición, la distribución entre los elementos resistentes en cada piso se efectúa considerando un incremento del 50% en la excentricidad real y una excentricidad accidental de entre 5% y 10% de la dimensión en planta de la estructura perpendicular a la dirección analizada. La excentricidad accidental se supone actuando en el sentido más desfavorable (fig. 7).

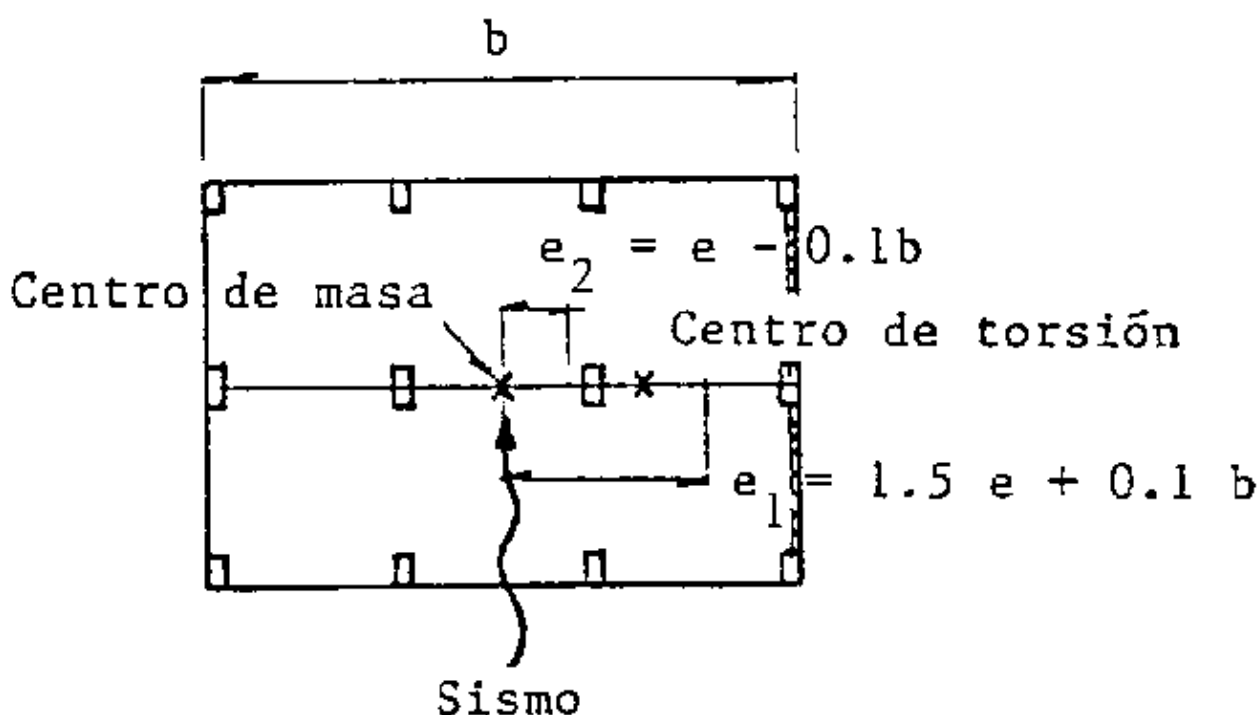


Figura 7. Excentricidades de diseño según el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, Ciudad de México.

- **Momento de volteo:** En general, las normas proporcionan criterios para la evaluación de los momentos de volteo, considerando un factor de reducción que en varios casos es de 0.80 en la base y aumenta linealmente hasta 1.00 en el piso superior.

Diseño

- **Acciones:** Las normas de diseño sismorresistente exigen la revisión de la seguridad de las estructuras ante la combinación de las cargas muertas con las vivas y con los efectos de sismo. Las cargas vivas consideradas suelen ser un porcentaje de los valores máximos probables, para tomar en cuenta el efecto accidental del sismo. El factor de carga utilizado es también un valor menor que el recomendado para combinaciones de cargas que no incluyan acciones accidentales. En aquellas normas en que el diseño se basa en el uso de esfuerzos permisibles, la naturaleza accidental del sismo permite incrementar los valores propuestos de dichos esfuerzos.

- **Estado límite de falla:** En las normas en que se diseña con base en la revisión de estados límite debe verificarse que la resistencia de diseño sea mayor o igual que la acción de diseño. En aquellos casos en que

el diseño se basa en el empleo de esfuerzos permisibles debe verificarse que no se excedan los valores especificados de los mismos.

• *Estado límite de servicio*: Las normas de diseño sismorresistente exigen la verificación de los desplazamientos para que los mismos no generen efectos de segundo orden, ni creen una sensación de inseguridad, ni propicien el daño de los elementos no estructurales. En general, se proporcionan valores límite al desplazamiento de los entrepisos que, para aquellos códigos que manejan coeficientes sísmicos reducidos por inelasticidad, son del orden de 0.002 veces la altura del entrepiso cuando los elementos no estructurales están ligados a la estructura y de 0.004 cuando dichos elementos se encuentran desligados de ésta. En las normas que manejan coeficientes sísmicos elásticos, los valores son del orden de 0.008 y 0.016 respectivamente. Asimismo, se dan recomendaciones para que la separación entre edificios vecinos sea tal que no exista riesgo de golpeteo con los desplazamientos previstos.

• *Recomendaciones de diseño*: Una buena parte de las normas latinoamericanas proporciona recomendaciones especiales para el detallado estructural en zonas sísmicas, particularmente para las estructuras de concreto, aunque sin excluir a las de acero y mampostería. Básicamente se trata de recomendaciones para la colocación del acero de refuerzo que permiten incrementar el confinamiento del concreto, proporcionando así mayor ductilidad al comportamiento de los elementos estructurales (fig. 8).

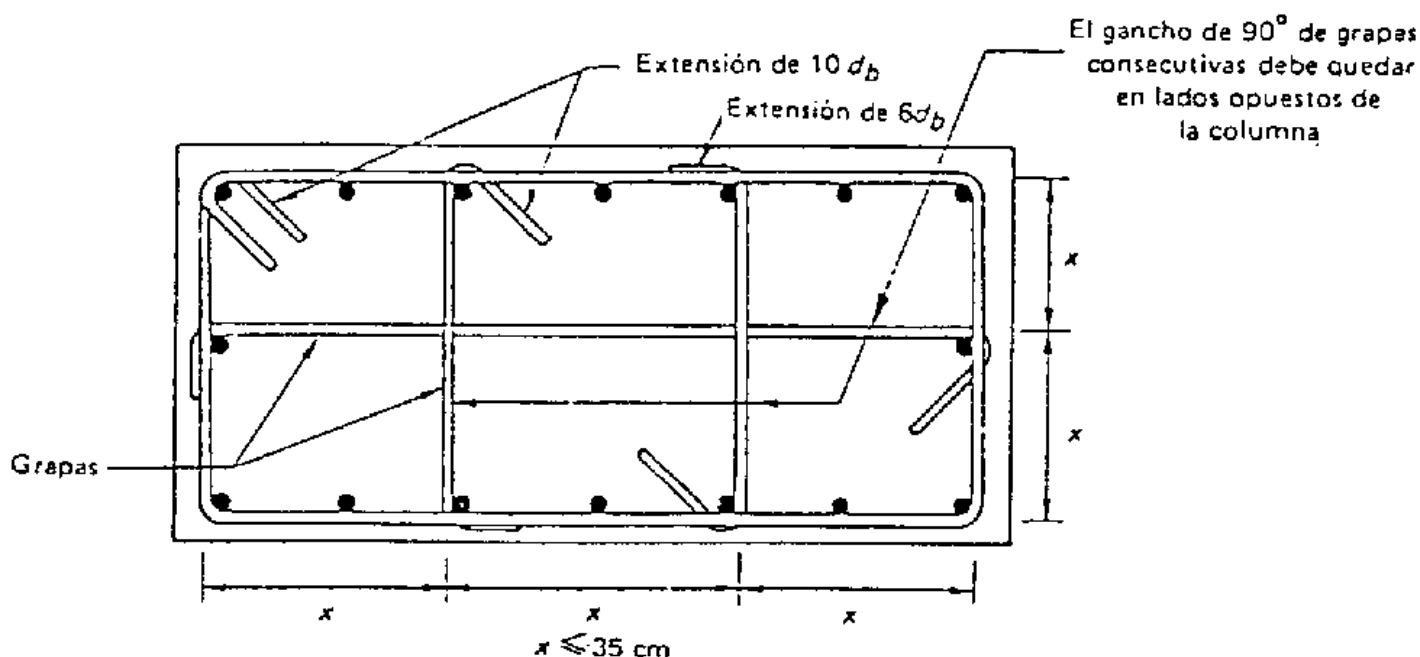


Figura 8. Detalles del refuerzo transversal de columnas según el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, Ciudad de México.

Cimentaciones

El diseño sísmico de las cimentaciones es una de las deficiencias más evidentes en la normativa sismorresistente. Usualmente, los códigos incluyen información muy general tendiente a evitar la aparición de tensiones en las cimentaciones y a garantizar un comportamiento de conjunto entre los elementos que las forman.

Construcción

Las especificaciones de construcción dentro de las normas de diseño antisísmico suelen limitarse a llamar la atención sobre la necesidad de garantizar la seguridad en las diversas etapas del proceso constructivo y a recomendar que se realice una supervisión detallada durante el mismo.

Estructuras Existentes

• *Reparación y refuerzo*: Es muy escaso el contenido de las normas en lo que se refiere a la reparación y el refuerzo de estructuras dañadas, incluso en los códigos de varios países donde ha habido daños importantes

recientemente. En general se establece la necesidad de reparar las estructuras con daños estructurales severos hasta alcanzar los requisitos de la normativa vigente, lo que significa la necesidad de reparar y reforzar, sobre todo en los casos de inmuebles construidos conforme a reglamentos anteriores.

- *Instrumentación*: Buena parte de los reglamentos latinoamericanos de construcción coinciden en especificar la necesidad de instrumentar los edificios, para esto se imponen límites muy variables a la altura y a la superficie construida, arriba de los cuales es obligatorio colocar acelerómetros.

Responsabilidad

A pesar de la importancia que reviste deslindar las responsabilidades, tanto civil como penal, en el caso de una construcción, es bastante superficial el tratamiento de este problema en las normas sismorresistentes. Normalmente se especifica la necesidad de contar con un responsable del proyecto, ingeniero o arquitecto, a fin de obtener la licencia de construcción por parte de las autoridades. No queda claro, sin embargo, el límite jurídico de esta responsabilidad, ni su relación con la responsabilidad del propietario o de la misma autoridad.

Experiencias en México

El sismo de septiembre de 1985 en la Ciudad de México dejó un saldo de casi 400 edificios de concreto derrumbados y cerca de 1,500 con daños estructurales. El número oficial de víctimas fue de 5,000 muertos, cifra que asciende a 20,000 según fuentes extraoficiales, además de varios cientos de miles de personas que quedaron sin hogar.

Una de las primeras acciones dentro del proceso de reconstrucción de la Ciudad de México fue la expedición de unas Normas de Emergencia, publicadas el 18 de octubre de 1985. Posteriormente, el 6 de julio de 1987 se expidió el nuevo Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal y el 5 de noviembre del mismo año se publicaron las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo.

Debido a la dificultad legal para su actualización, el actual reglamento de construcciones para la Ciudad de México contiene solamente los principios básicos del diseño por sismo, como son: la clasificación de las estructuras; los criterios de análisis y de revisión de los estados límite; una zonificación sísmica básica y los correspondientes coeficientes sísmicos. Asimismo, se definen con bastante detalle las responsabilidades del proyecto y la construcción, sin que esto aclare el problema en función de los códigos civil y penal. Los demás detalles para el diseño sismorresistente de estructuras se especifican en las normas complementarias, cuya modificación requiere un trámite legal mucho más sencillo, lo que facilita su actualización.

Los documentos mencionados introdujeron una serie de cambios respecto al patrón de las normas latinoamericanas de diseño sismorresistente antes expuesto. A continuación se discuten las principales diferencias.

- *Clasificación de las estructuras*: A pesar de que el reglamento anterior exigía un sobrediseño por sismo del 30% para estructuras importantes, como son las escuelas y los hospitales, éstos fueron los tipos de edificios más afectados durante 1985 desde el punto de vista del uso. Por esta causa, se elevó el factor de sobrediseño sísmico en este tipo de estructuras al 50%.
- *Coficiente sísmico y espectros de diseño*: El incremento de los coeficientes sísmicos fue una de las medidas más importantes de las normas de emergencia. A pesar de que el espectro de respuesta, con 5% del amortiguamiento crítico, alcanzó ordenadas de 1.00g en la zona de suelo blando, el coeficiente sísmico para este suelo, y por lo tanto la ordenada máxima del espectro de diseño, se incrementó de 0.24g hasta sólo 0.40g (fig. 9). Este incremento se hizo con base en el criterio de un grupo de ingenieros de amplia experiencia que integraron el Subcomité de Normas, encargado de elaborar las normas de emergencia y posteriormente el nuevo reglamento. Los valores del coeficiente sísmico del nuevo reglamento fueron los mismos que para las normas de emergencia, salvo en el caso de suelos intermedios o de transición en que se incrementó aún más el valor propuesto en ellas. Asimismo, se hizo más ancha la zona plana de los espectros, tratando de cubrir las incertidumbres existentes en el cálculo de los períodos naturales de vibración de las estructuras.

Los estudios de la intensidad del sismo de 1985 y los de riesgo sísmico elaborados con posterioridad a las normas de emergencia, demostraron que los valores de los coeficientes sísmicos contenidos en ellas eran sumamente bajos, ya que al menos debería haberse alcanzado 0.60g para lograr un nivel de seguridad adecuado en combinación con el análisis estático, ó 0.80g con el análisis dinámico (fig. 9). No obstante lo anterior, prevaleció el criterio empírico adoptado en un principio debido a las dificultades políticas de

modificarlo.

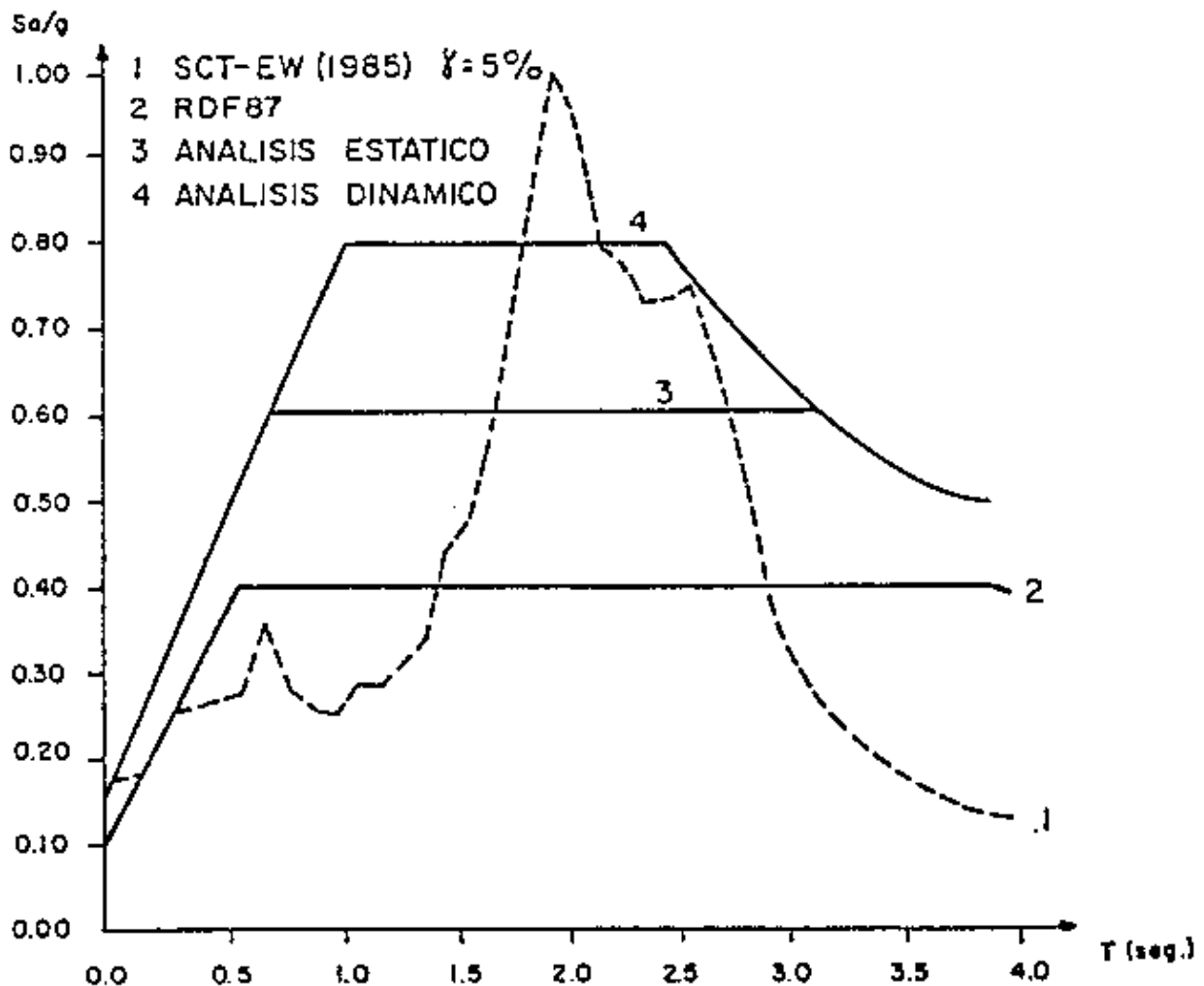


Figura 9. Espectros de diseño para suelo blando en la Ciudad de México.

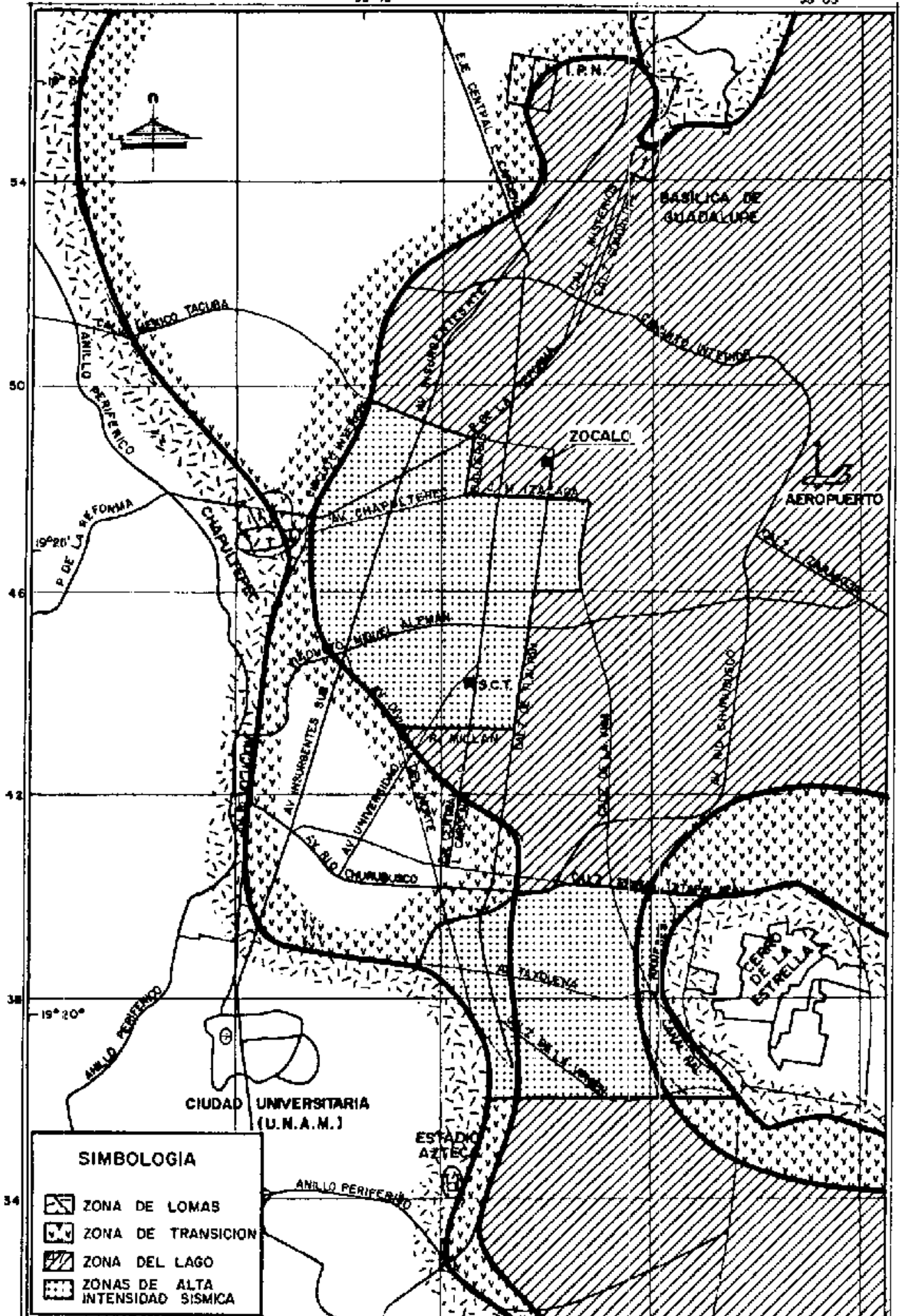
Además del incremento en los coeficientes sísmicos, tanto en las normas de emergencia como en el nuevo reglamento se hicieron bastante más estrictos los requisitos para poder utilizar factores de reducción por comportamiento inelástico elevados. Entre otras cosas, se incluyeron especificaciones detalladas y muy estrictas para el armado de los elementos de concreto reforzado. Los factores de reducción por comportamiento inelástico se ven a su vez afectados por un factor de reducción adicional de 0.8 en el caso de que la estructura sea irregular.

- *Zonificación sísmica:* estudio de los daños causados por el sismo de 1985 permitió distinguir la importancia de los efectos de interacción lateral entre las irregularidades geotécnicas del valle de México. Como resultado de esto, la nueva zonificación sísmica de la Ciudad de México identifica dos zonas de alta sismicidad ubicadas en su mayor parte dentro de la zona de suelo blando (fig. 10). Por las mismas causas expuestas en el inciso anterior, el coeficiente sísmico dentro de estas zonas es el mismo que fuera de ellas, sin que para fines prácticos tengan ninguna trascendencia.





- *Análisis:* En el nuevo reglamento de construcciones para la Ciudad de México el método simplificado de análisis sólo es aplicable a edificios con altura no mayor de 13 metros. Para alturas de hasta 60 metros debe hacerse un análisis estático y más allá de los 60 metros es obligatorio realizar además un análisis dinámico.

El anterior reglamento de construcciones no consideraba limitar los resultados del análisis dinámico a un porcentaje del estático, sin embargo, la discusión sobre la seguridad de los coeficientes sísmicos empleados con el método estático dejó en claro que si se usaba el dinámico, en las construcciones que no tuvieran alguna irregularidad exagerada los resultados obtenidos serían todavía menores. Por este motivo se limitó la fuerza cortante basal obtenido del análisis dinámico al 80% del valor correspondiente al análisis estático.

- *Distribución de las fuerzas cortantes*: Casi un 40% de los edificios colapsados durante 1985 presentaron problemas de torsión, debido principalmente a la estructuración típica de esquina, en que dos ejes de colindancia concurrentes se cierran con muros de tabique, dejando por otro lado las fachadas abiertas. En principio, las normas de emergencia atacaron este problema limitando la excentricidad calculada al 20% de la dimensión en planta en la dirección de la excentricidad. Posteriormente, se hicieron una serie de estudios teóricos que especulaban sobre los posibles efectos de la torsión en el rango inelástico, a pesar de que no hubo pruebas fehacientes de que éste hubiera sido un problema presente en 1985. Como resultado de estos trabajos se introdujo un nuevo concepto en el reglamento de 1987 bajo el nombre de excentricidad por resistencia; dada su aplicación limitada está previsto regresar a la versión inicial de las normas de emergencia.



SIMBOLOGIA

-  ZONA DE LOMAS
-  ZONA DE TRANSICION
-  ZONA DEL LAGO
-  ZONAS DE ALTA INTENSIDAD SISMICA

34

Figura 10. Zonificación sísmica del Distrito Federal, Ciudad de México.

- *Acciones:* Durante 1985 se observó que una buena cantidad de los colapsos se debió a un exceso de cargas en la estructura. El uso intensivo de las áreas construidas, sobre todo en el caso de las oficinas, en que fue frecuente encontrar la acumulación de archiveros o equipo, condujo a un aumento en las cargas vivas consideradas, tanto en las normas de emergencia como en el nuevo reglamento.
- *Estado límite de falla:* Junto con el incremento de los coeficientes sísmicos una de las modificaciones más importantes que introdujeron las normas de emergencia fue la disminución de los factores de resistencia. Las normas sísmicas de la Ciudad de México se basan en la revisión de estados límite de falla; para esto, se exige que la acción de diseño, multiplicada por un factor de carga, sea inferior a la resistencia de diseño, afectada por un factor de reducción que toma en cuenta la incertidumbre existente en los modelos matemáticos empleados en su determinación. La decisión del Subcomité de Normas de aumentar los coeficientes sísmicos en suelo blando hasta sólo un 40% de la ordenada máxima del espectro de respuesta de 1985, en realidad se complementó con una reducción de los factores de resistencia empleados para estimar la resistencia de las columnas: en flexocompresión de 0.75 a 0.5 y en cortante de 0.8 a 0.5. Asimismo, la aparición de algunas fallas en cimentaciones a base de pilotes de fricción hizo que se redujera el factor de resistencia empleado para el cálculo de su capacidad de carga, de 0.7 a 0.35, cuando los pilotes estuvieran sujetos a acciones sísmicas. Esta forma de ubicar parte de la intensidad sísmica en los procedimientos de diseño fue adoptada casi sin modificaciones por el nuevo reglamento.
- *Estado límite de servicio:* Un buen número de fallas y problemas observados en 1985 se debieron al golpeteo entre inmuebles vecinos ocasionado por un exceso de flexibilidad en las estructuras y un incumplimiento del reglamento en lo referente a las separaciones de las colindancias. Las normas de emergencia, en un principio no modificaron los requisitos para la revisión de los desplazamientos, sin embargo, en la nueva versión del reglamento, los valores límite a los desplazamientos de entrepiso se disminuyeron de 0.008 veces la altura del entrepiso a 0.006 en el caso de elementos no estructurales ligados a la estructura, y de 0.016 a 0.012 cuando los elementos no estructurales se encuentren debidamente desligados de la estructura. Cumplir estos límites resulta en muchos casos el principal problema del diseño.
- *Recomendaciones de diseño:* Como ya se mencionó anteriormente, junto con el incremento de coeficientes sísmicos se dieron especificaciones muy estrictas y detalladas para la elección del factor de reducción por comportamiento inelástico. Esto se hizo en particular para detallar la colocación del refuerzo en los elementos de concreto reforzado. La separación y forma de los estribos, así como la influencia de la longitud de desarrollo de las varillas que llegan a un nudo en la dimensión de los elementos estructurales que lo forman, son quizás los detalles más importantes.
- *Reparación y refuerzo:* Las normas de emergencia exigían que todas aquellas estructuras que hubieran sufrido daños estructurales que afectaran la estabilidad de la construcción tendrían que ser sometidas a la reparación y al refuerzo necesarios para cumplir los requisitos de dichas normas. El nuevo reglamento expedido en 1987 añadió a lo anterior el que todas las construcciones clasificadas como importantes (Grupo A), aún cuando no hubiesen sufrido daños por el sismo de 1985, están obligadas a efectuar las obras de refuerzo necesarias para cumplir los requisitos del nuevo reglamento.
- *Responsabilidad:* Después del sismo de 1985, las autoridades, conscientes del relajamiento técnico existente en el otorgamiento de las licencias de perito, decidieron cancelarlas y elaborar una lista de ingenieros y arquitectos calificados para aplicar las normas de emergencia. Esta lista fue preparada con el consejo de los colegios profesionales de ingenieros y arquitectos.

El nuevo reglamento volvió a anular la figura de perito autorizado y creó una nueva organización para el manejo de la responsabilidad técnica en las construcciones. Actualmente, una construcción debe tener un Director Responsable, quien comparte la responsabilidad general con Corresponsables en Seguridad Estructural, Diseño Urbano y Arquitectónico y en Instalaciones. La licencia de Director Responsable, o de Corresponsable en alguna especialidad, se obtiene mediante un proceso de calificación efectuado por comités que son integrados por las autoridades y por profesionistas reconocidos propuestos por los colegios de profesionales.

Limitaciones y Alternativas

Muchas son las limitaciones de las normas de diseño sismorresistente existentes en América Latina. En su mayor parte, se deben a lo verdaderamente joven que es la ingeniería sísmica. Se debe recordar que el

registro instrumental de los sismos se inició apenas en la segunda mitad del siglo pasado y que la medición de sismos intensos mediante acelerógrafos en América Latina comenzó apenas en la segunda mitad de este siglo. Por esta razón, las estimaciones del riesgo sísmico carecen de la información estadística necesaria para ser suficientemente confiables. Respecto al análisis y diseño sismorresistente, no debemos olvidar que éste se remonta apenas a los primeros años de este siglo, cuando Tacha Naito diseñó en Tokio varios edificios suponiendo una aceleración uniforme de un décimo de la gravedad. En suma, tenemos que diseñar para resistir acciones de las que sabemos muy poco, mediante estructuras de cuya resistencia tampoco tenemos un conocimiento pleno.

Es importante subrayar que ante todas estas incertidumbres, el diseño sismorresistente debe basarse fundamentalmente en la prudencia y en lo que podríamos llamar el diseño conceptual, esto es, en el manejo de los conceptos básicos de sencillez, simetría y regularidad, que constituyen la diferencia constante entre los edificios colapsados y los sobrevivientes en los sismos catastróficos que ha sido posible estudiar en los últimos años. Aunado a lo anterior, el uso de materiales de buena calidad y una construcción cuidadosa constituyen los factores más importantes en el diseño sismorresistente.

Anteriormente se ha descrito la reacción de un código moderno ante una catástrofe que no pudo evitar. Este es un buen ejemplo de que es un error pensar que basta con seguir las normas para obtener un diseño adecuado. Buena parte de las normas sismorresistentes en América Latina enfatizan que sólo son requisitos mínimos a seguir y sin embargo, la tendencia en muchos casos, como lo muestra el nuevo reglamento de la Ciudad de México, consiste en intentar garantizar un buen diseño independientemente del diseñador, mediante especificaciones tan restrictivas que en ocasiones el ingeniero no tiene más opciones que aplicar una serie de recetas.

Una alternativa que se presenta ante esta tendencia hacia el reglamento–recetario la constituye el reglamento–mínimo, que proporciona tan sólo los criterios básicos para el diseño sismorresistente y la caracterización del riesgo sísmico, estimulando al diseñador para que ejerza su profesión conforme a los conocimientos adquiridos y asumiendo su verdadera responsabilidad. Un ejemplo de este tipo de reglamentos son las Normas de Seguridad Estructural desarrolladas por la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología para su aplicación en toda la República Mexicana (*ref. 10*).

Diseño Sismorresistente de Hospitales

Los hospitales se clasifican como estructuras importantes en todas las normas sismorresistentes de Latinoamérica. Esto implica un sobrediseño que intenta garantizar el que estos edificios permanezcan en pie aún en situaciones extremas.

El sismo de 1985 en la Ciudad de México demostró que un sobrediseño del 30% no fue suficiente para evitar el colapso de: varios hospitales y el daño severo de muchos más, lo que produjo un enorme déficit de camas en los momentos en que éstas más se necesitaron. Las causas principales de que los daños en hospitales fueran tan grandes a pesar del sobrediseño fueron los problemas de diseño conceptual: irregularidades en planta y elevación; torsiones excesivas; existencia de columnas cortas; etc., que limitaron el buen comportamiento de las estructuras en el intervalo, inelástico ante un sismo extraordinario. Como consecuencia de lo anterior, el nuevo reglamento de construcciones para la ciudad incrementó el sobrediseño hasta 50%. Sin embargo, esta experiencia hace evidente que no basta especificar un sobrediseño para evitar problemas, es necesario ir más allá del reglamento y formular diseños que conceptualmente sean adecuados, aún cuando con esto se sacrifique en algo la estética y la funcionalidad. Esto es indispensable en este tipo de estructuras cuya supervivencia resulta vital para las acciones de recuperación después de un desastre sísmico.

A continuación se presentan algunas sugerencias de concepto para el diseño sismorresistente de estructuras importantes, como los hospitales.

- *Elementos estructurales:* Se debe tener conciencia de que ante solicitaciones extraordinarias la estabilidad de la estructura dependerá de su capacidad para deformarse inelásticamente. En el caso de los elementos de concreto reforzado, el comportamiento inelástico depende fundamentalmente del confinamiento que le proporciona el refuerzo transversal, tanto al concreto como al refuerzo longitudinal. Por esta razón, resulta de particular importancia para el comportamiento sísmico de las estructuras de concreto reforzado la abundancia de estribos, sobre todo en los extremos de los elementos estructurales, donde suelen presentarse las articulaciones plásticas. Asimismo, en el caso de los elementos sujetos a flexión es necesario usar secciones subreforzadas, en las cuales la falla se inicie en el acero que es un material bastante dúctil, antes que en el concreto que es frágil.

En el caso de los elementos de acero, material que presenta un comportamiento inelástico muy adecuado, es importante evitar los problemas de inestabilidad. Se recomienda usar secciones compactas que eviten los problemas de pandeo local, así como reforzar con atiesadores los extremos de los elementos en que pueden presentarse articulaciones plásticas. Particular atención merecen los elementos de armaduras y vigas de alma abierta ante la posibilidad de que sismos extraordinarios provoquen una inversión de fuerzas, sometiendo a compresión elementos diseñados para resistir tensiones únicamente.

La dificultad de lograr un comportamiento inelástico adecuado en las columnas sujetas a cargas axiales importantes hace recomendable evitar que las articulaciones plásticas se presenten en ellas. Este criterio de *columnas fuertes-vigas débiles* es válido tanto en las estructuras de acero como en las de concreto.

• *Elementos no estructurales*: Los elementos no estructurales pueden llegar a generar problemas serios en las estructuras sujetas a sismo cuando están ligados a éstas sin haber sido considerados en el diseño. Los muros divisorios, los plafones y las fachadas suelen introducir cambios en la estructuración y en los mecanismos de transmisión de las cargas sísmicas que propician la falta prematura de la estructura. En el caso en que se decida desligar los elementos no estructurales, deberán dejarse las holguras adecuadas y emplearse materiales de relleno que no pierdan su capacidad de deformación con el tiempo (fig. 11). Además, es necesario considerar en el diseño sismorresistente la necesidad de garantizar la estabilidad de los elementos no estructurales mediante su fijación adecuada a la estructura. Esto es importante, sobre todo en el caso del equipo tan delicado que puede tenerse en un hospital, así como de los estantes de almacenamiento que pueden contener sustancias muy valiosas o de alto riesgo.

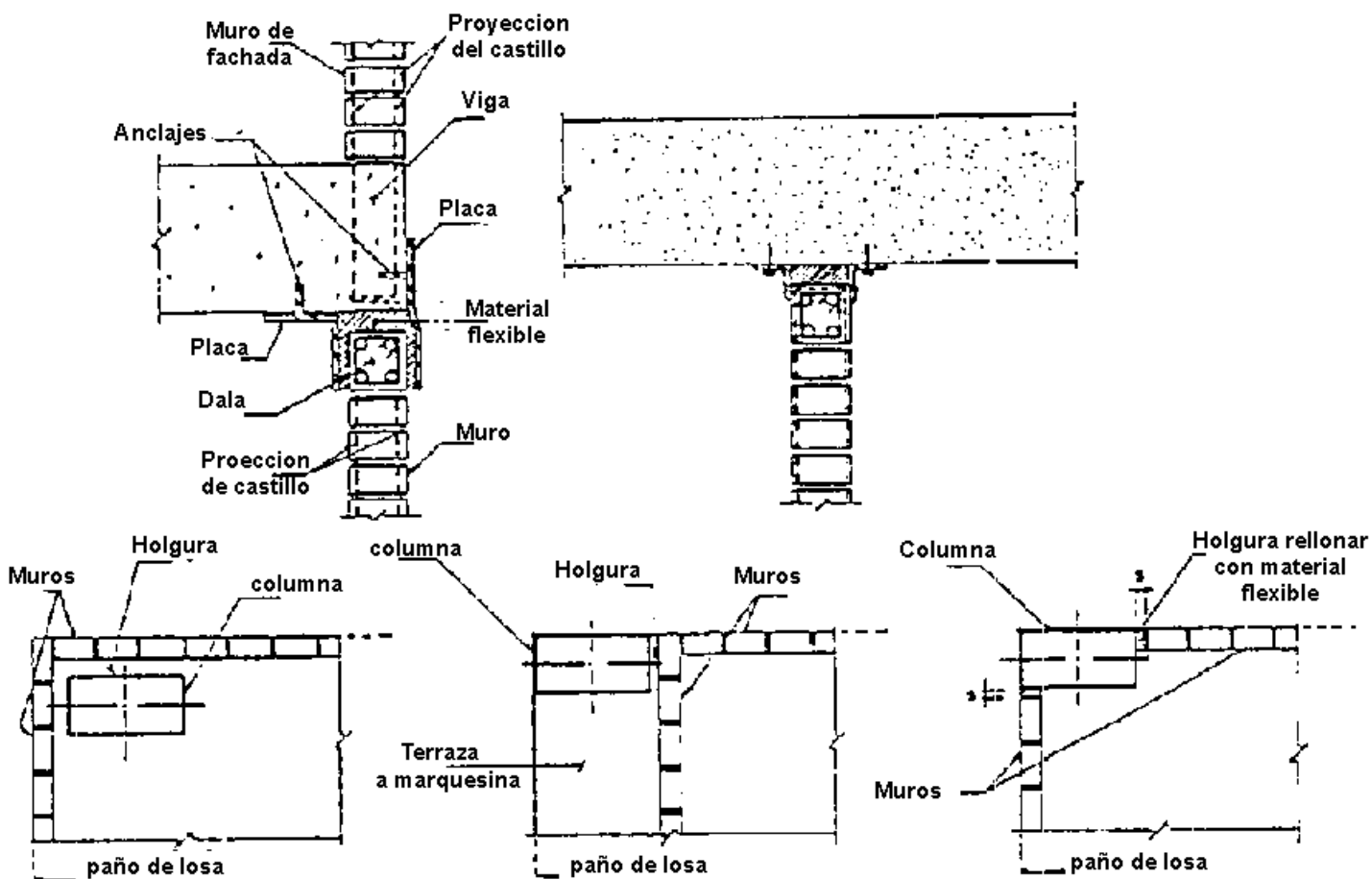


Figura 11. Detalles de desligue y fijación de muros..

• *Distribución de las cargas*: Es importante recordar que mientras menor sea el peso de una estructura menor serán las fuerzas cortantes que produzcan los sismos, además, se debe tener en cuenta que la aceleración a que se ven sujetos los edificios es mayor en los pisos superiores. De lo anterior se desprende que sería ideal en zonas sísmicas tener edificios ligeros y de poca altura. En el caso de los hospitales esto significaría inmuebles de pocos niveles, con materiales ligeros y las mayores cargas colocadas en los pisos inferiores..

En los volados, que pueden significar un elemento estético atractivo, los sismos generan fuerzas verticales muy desfavorables y de difícil evaluación. Por esta razón, no conviene usar volados en edificios sujetos a

sismos y mucho menos en servicios importantes como los hospitales.

- *Sencillez, simetría y regularidad*: La sencillez de la estructura y la uniformidad en sus dimensiones facilitan el entendimiento de su comportamiento sísmico para el diseñador y la misma realización de la estructura por parte del constructor.

La simetría y la regularidad en planta, tanto en la distribución de las masas como en la de las rigideces, evita los problemas de torsión que son tan difíciles de controlar. Conviene también evitar el uso de plantas muy alargadas o con entrantes y salientes pronunciados (fig. 12). En caso necesario es preferible recurrir al uso de juntas de construcción que permitan obtener plantas regulares y simétricas.

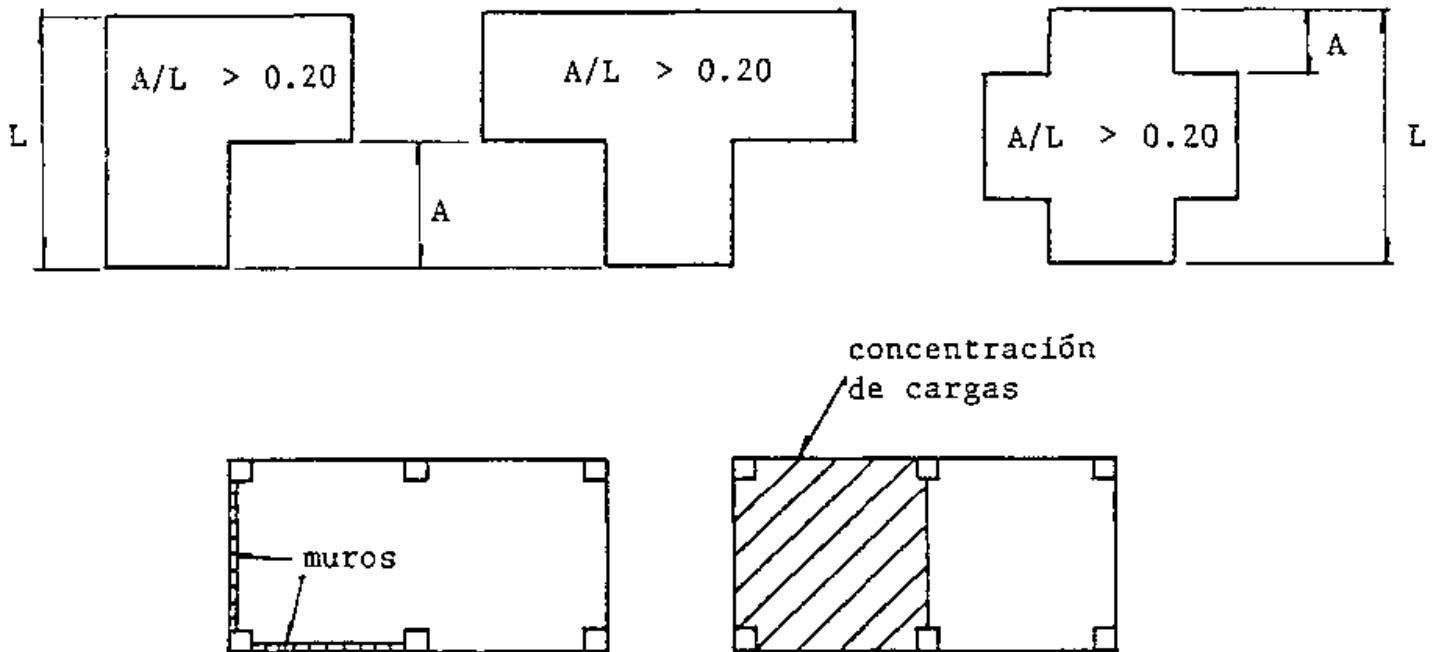


Figura 12. Asimetría e irregularidad en planta.

En cuanto a la regularidad en elevación, ésta evita la concentración brusca de las acciones sísmicas en porciones de la estructura, fenómeno que resulta muy difícil de modelar con las herramientas de análisis disponibles (fig. 13). Tampoco es recomendable diseñar edificios muy esbeltos en las que la flexibilidad y los efectos de segundo orden pueden causar problemas inesperados.

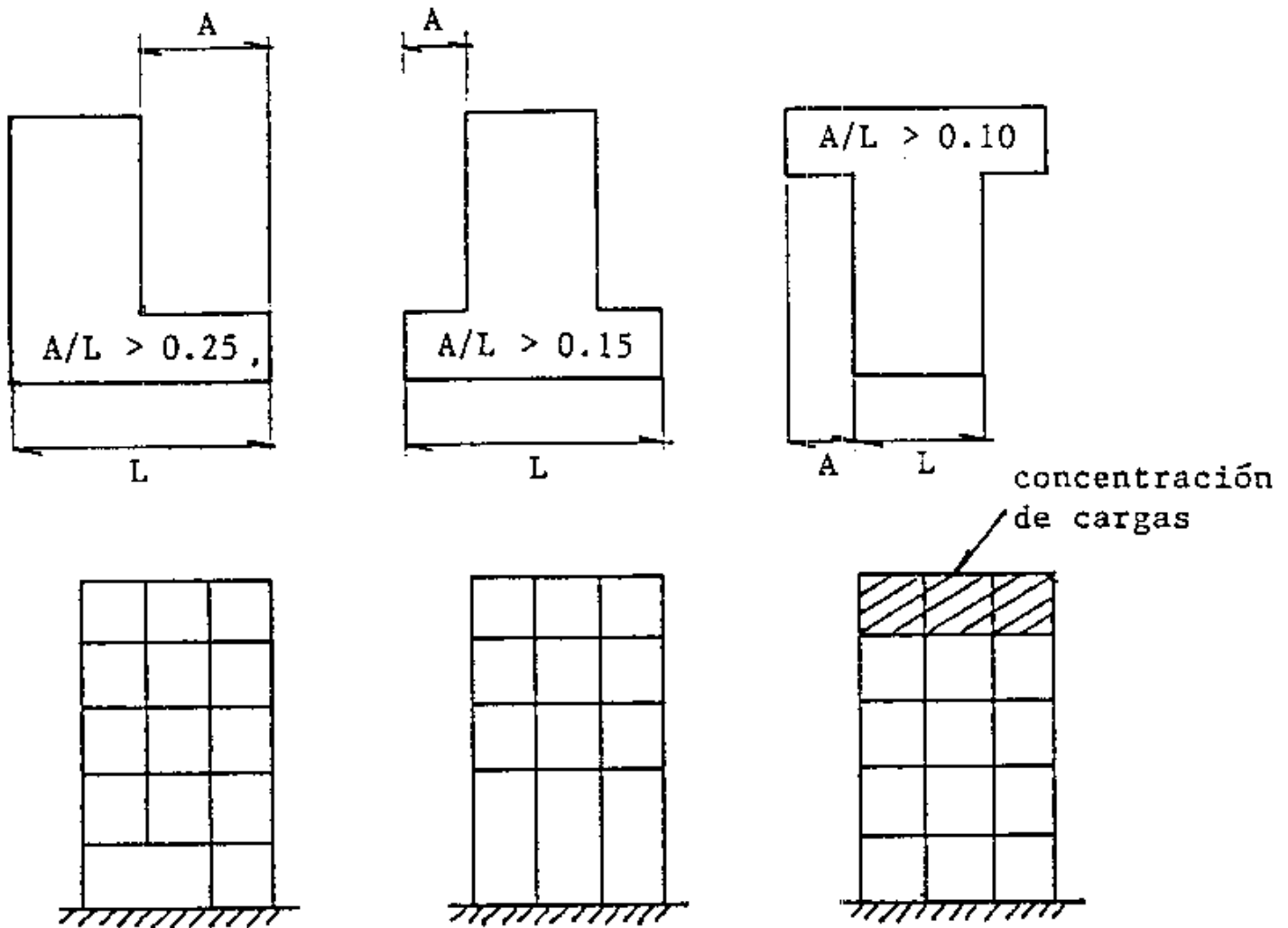


Figura 13. Irregularidad en elevación.

• *Líneas de defensa escalonadas*: Un mecanismo de colapso requiere de la formación de un número de articulaciones plásticas igual al grado de hiperestaticidad de la estructura. Si los elementos estructurales en que se forman dichas articulaciones tienen suficiente capacidad de deformación inelástica y el grado de hiperestaticidad es alto, la generación del mecanismo implica una gran absorción de energía sísmica, lo que puede significar la supervivencia del inmueble en condiciones extraordinarias. Debe buscarse que el mecanismo de colapso se desarrolle mediante articulaciones en las vigas, ya que las columnas presentan un comportamiento frágil debido a la presencia de carga axial. Asimismo, debe evitarse la posibilidad de mecanismos de colapso de entrepiso prematuros (fig. 14).

Como parte de la estrategia de disipación de energía, además de recurrir a estructuraciones hiperestáticas, resulta bastante recomendable combinar las estructuraciones típicas a base de marcos con muros de rigidez de concreto reforzado.

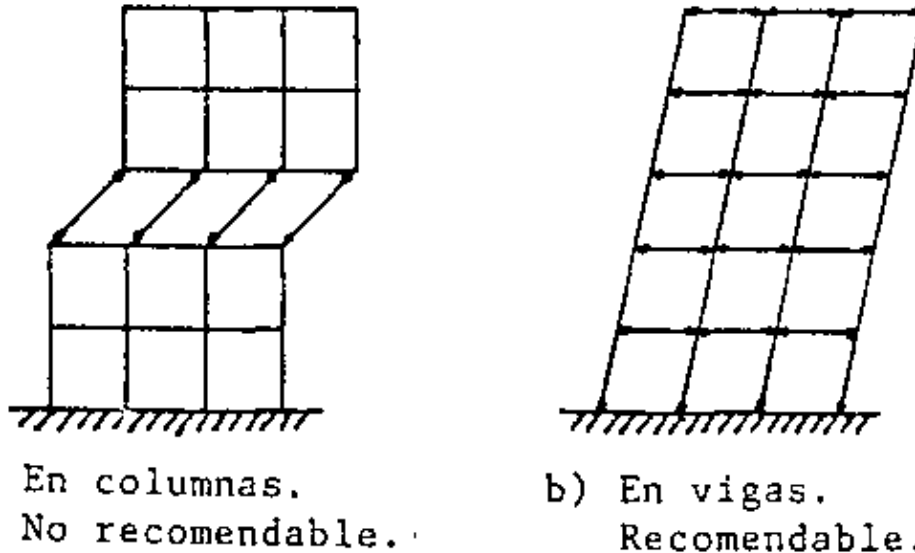


Figura 14 Mecanismos de colapso.

Referencias

1. Rojas, T., et al "Y volvió a temblar. Cronología de los sismos en México. (de 1–pedernal a 1821)". **CIESAS**, Cuadernos de la Casa Chata, Vol. 135 México, 1987.
2. "Earthquake resistant regulations. A world list." International Association for Earthquake Engineering. 1988.
3. "Recomendaciones provisionales para el análisis sísmico de estructuras." **DNRS**, Santo Domingo, diciembre 1979.
4. "Reglamento nacional de construcción." **MINVAH**, Nicaragua, mayo 1983.
5. "Reglamento de emergencia del diseño sísmico de la República de El Salvador". ASIA, San Salvador, noviembre 1986.
6. "Requisitos de seguridad y servicio para las estructuras. Título IV del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal". Instituto de Ingeniería, **UNAM**, julio 1977.
7. "Normas de emergencia al reglamento de construcciones del Distrito Federal. Con comentarios." Instituto de Ingeniería, **UNAM**, enero 1986.
8. "Reglamento de construcciones para el Distrito Federal." Diario Oficial, tomo **CDVI**, No. 3, México D.F., 3 de julio de 1987.
9. "Normas técnicas complementarias para diseño por sismo." Gaceta Oficial del Departamento del Distrito Federal, Quinta época, No. 38, noviembre 1987.
10. "Desarrollo urbano y seguridad estructural. Normas de seguridad estructural" SEDUE, México, 1988.

Concreto armado en zonas sísmicas

Ing. José Grases

Introducción y antecedentes

El diseño sismorresistente requiere la toma de decisiones en áreas del conocimiento que aún son de dominio incompleto: **las acciones sísmicas previsibles y la respuesta estructural no lineal bajo movimientos intensos del terreno**. En una u otra forma, éstas decisiones condicionan el resultado final de edificaciones proyectadas en zonas sísmicas, ignorándose habitualmente las incertidumbres asociadas a tales

conocimientos incompletos. Por otra parte, las previsiones de diseño contra futuras solicitaciones debidas a sismos son respaldadas y justificadas en las memorias de cálculo por la normativa vigente, aceptando tácitamente que tal normativa contiene predicciones confiables para las edificaciones cubiertas en su ámbito aplicación, que garantizan la seguridad frente a solicitaciones de tipo sísmico.

Aún cuando hay aspectos mal conocidos y otros que no se han incorporado a las normas vigentes, las estrategias de análisis y diseño han sufrido modificaciones sustanciales y las normativas se han ido adaptando a la luz de lecciones aprendidas en terremotos que han afectado centros urbanos, con lo cual hoy en día se logran diseños más confiables.

Para limitar las consecuencias desfavorables de sismos intensos, es preciso respetar un conjunto de recomendaciones cuya finalidad es la de conferir al sistema resistente a sismos la cualidad de mantener una elevada capacidad para absorber y disipar energía, sin pérdida apreciable de la resistencia de sus elementos portantes, redistribuyendo las solicitaciones debidas al efecto conjunto del sismo y la gravedad terrestre. Las recomendaciones que conducen a éste comportamiento dúctil en estructuras de concreto armado, se presentan aquí. (Diapositiva 1)

La experiencia adquirida en sismos intensos que han afectado edificaciones de concreto armado, así como ensayos de laboratorio, ha puesto de manifiesto que con este material, bien diseñado y ejecutado, se pueden construir obras capaces de resistir movimientos sísmicos intensos. El edificio de la figura constituido por muros estructurales de concreto armado, sobrevivió sin ningún tipo de daño el terremoto de Caracas de 1967, y está ubicado en un área donde se derrumbaron 4 edificios y los daños fueron generalizados. (Diapositiva 2)

Para la mayoría de las edificaciones ordinarias de concreto armado, el criterio dominante es el de prevenir la inestabilidad (ruina o colapso) como consecuencia del sismo más severo que pueda esperarse durante la vida útil de la edificación. Esta estrategia encaminada a la protección de vidas, está asociada a lograr que el sistema resistente a sismos posea suficiente resistencia, y capacidad de absorción y disipación de energía. Otros criterios de resistencia y rigidez, permiten controlar daños como consecuencia de eventos sísmicos moderados, aún cuando sean más frecuentes.

Particularidades de las acciones sísmicas

Por sus características, esta amenaza de la naturaleza exige un enfoque singular cuando se trata de mitigar sus efectos en las construcciones dado lo infrecuente de los eventos más intensos; la solución del proyectista tiende a ser óptima desde un punto de vista económico si, en los criterios de diseño contra tales eventos de extrema severidad, se aceptan daños importantes en las construcciones, incluso daños estructurales, en lugar de pretender evitarlos totalmente a base de soluciones más robustas y costosas.

De aquí que, en general, no resulta económico diseñar estructuras que respondan elásticamente bajo las acciones sísmicas más severas previsible. Las fuerzas laterales F_i de diseño establecidas en los códigos para simular la acción sísmica, son menores que las correspondientes a la respuesta elástica de la estructura sometida a sismos de una intensidad comparable a la que se considera en dichos códigos (Figura 1).

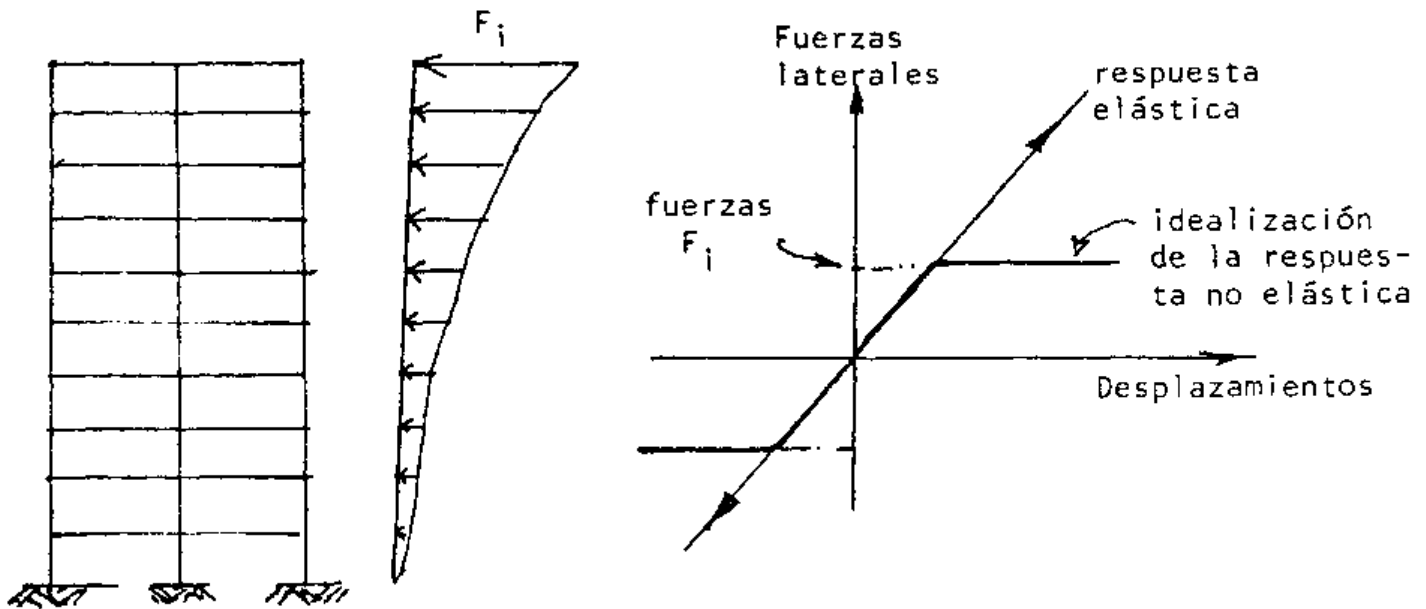


Figura 1. Fuerzas laterales para simular la acción sísmica.

No obstante, la experiencia revela que estructuras diseñadas con tales acciones puede sobrevivir sismos intensos. Esto es esencialmente atribuido a la capacidad que poseen las edificaciones bien diseñadas de absorber y disipar energía de deformación, así como a efectos debidos a la reducción de rigidez, interacción suelo-estructura y posible sobre-resistencia.

De lo anterior es evidente que en la concepción y diseño del sistema resistente a sismos con las acciones sísmicas estipuladas en las normas, debe garantizarse una capacidad de absorción y disipación de energía en sus miembros y uniones, consistente con aquellas. Esto implica que las regiones críticas posean la ductilidad suficiente para sobrevivir varios ciclos de deformaciones inelásticas alternantes sin pérdida apreciable de la capacidad portante. Por tanto, **es preciso evitar toda forma de falla frágil y garantizar una capacidad adecuada de absorber y disipar energía** por cedencia a la flexión, capacidad esta que se puede expresar en términos de la tenacidad de los miembros del sistema resistente a sismos. En la Figura 2 se ilustran esquemáticamente las diferencias de comportamiento, características de miembros: insuficientemente reforzados para resistir las tensiones debidas a la flexión alternante (Figura 2a) y las que presentan un comportamiento estable (Figura 2b).

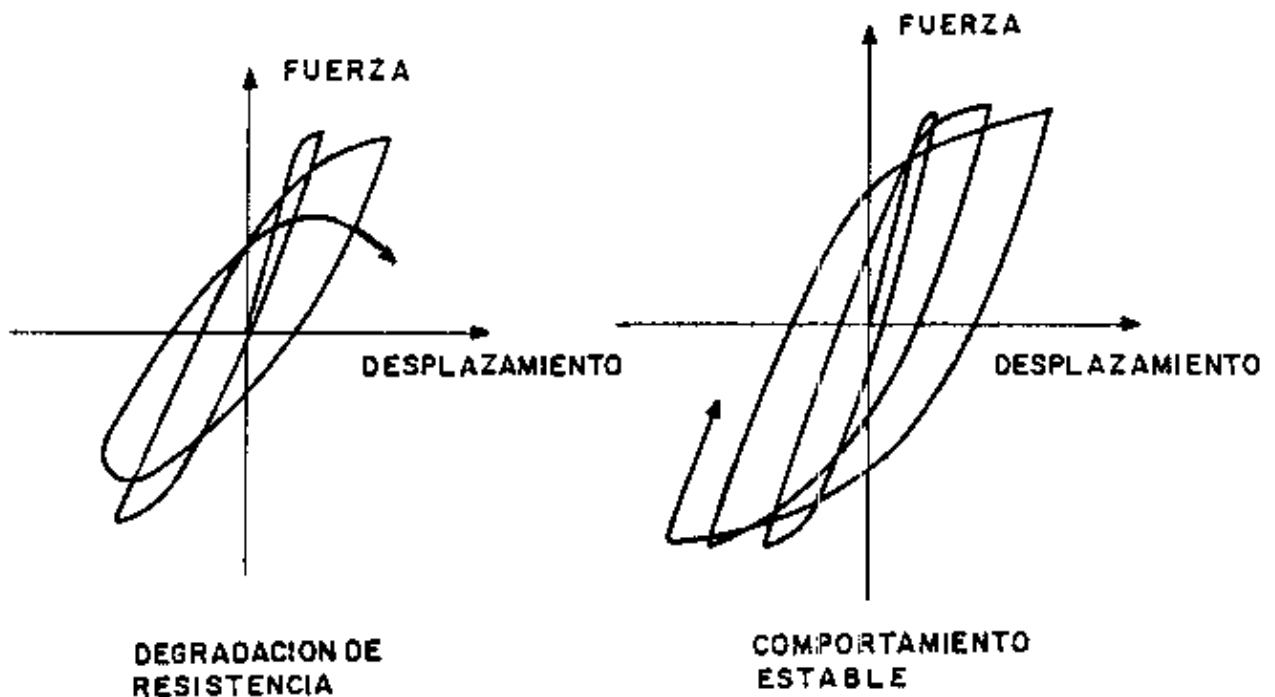


Figura 2. Diagramas de restitución característicos

En el caso particular de las estructuras de concreto armado, lo antes dicho se traduce en un detallado cuidadoso de Las armaduras de refuerzo, las cuales, además de suministrar resistencia a la flexión, a la compresión y al corte en miembros y uniones, deben confinar adecuadamente al concreto y evitar el pandeo prematuro de las barras sometidas a deformaciones de compresión en las secciones más solicitadas por la acción sísmica. (Figura 3). Por éstas razones, con frecuencia se acota que el diseño sismorresistente requiere un cuidadoso equilibrio entre ciencia y arte de armar.

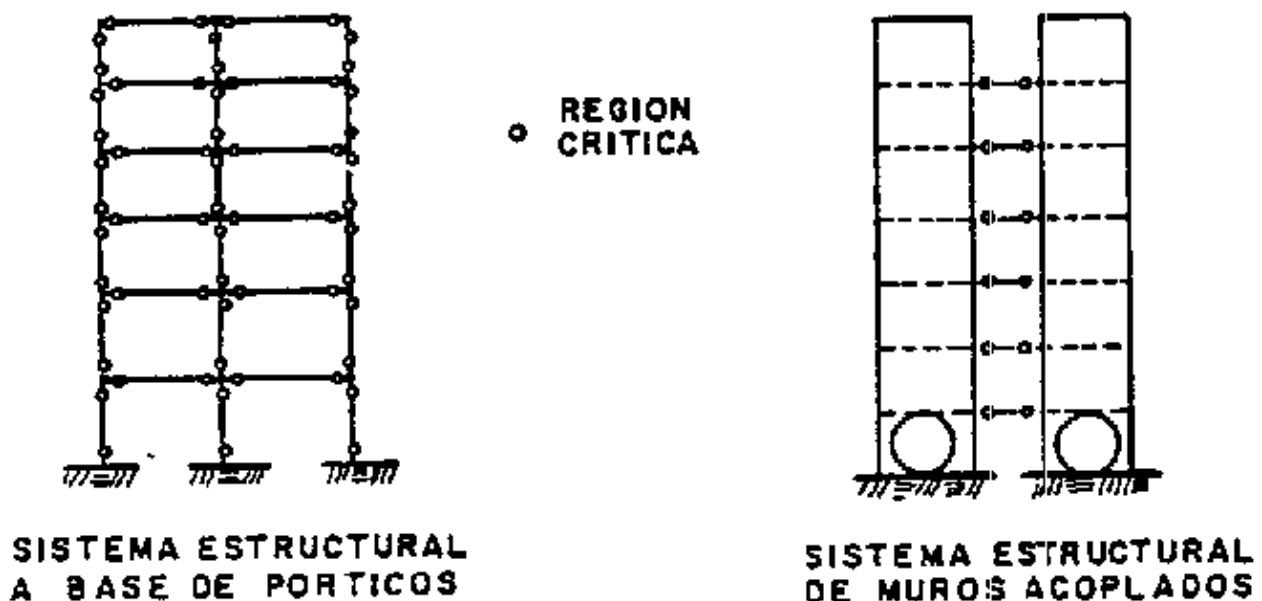


Figura 3. Regiones críticas en sistemas estructurales de concreto armado.

Causas de daños frecuentes

Del análisis e interpretación de los efectos de sismos intensos se han extraído numerosas lecciones. Como causas de un desempeño inadecuado de edificaciones sacudidas por sismos intensos, es frecuente encontrar las siguientes:

- i) la separación inadecuada entre edificaciones de varios niveles ha conducido a interacciones desfavorables;
- ii) irregularidades en la distribución de rigideces, de masa y/o resistencias; (Diapositiva 3)
- iii) la interacción de elementos no estructurales; esta ha dado lugar a situaciones como la descrita en i).
- iv) ausencia de diafragmas horizontales, esenciales para lograr la distribución de las fuerzas inerciales entre los diferentes elementos del sistema resistente a sismos; (Diapositiva 4)
- v) en el caso de las edificaciones de concreto armado, se presentan con frecuencia las deficiencias siguientes en los detalles de la armadura de refuerzo:
 - escasez de refuerzo transversal en regiones críticas (zonas de rotulación ó zonas de empalme de barras), dando lugar al pandeo prematuro del refuerzo longitudinal ó pérdida de continuidad del elemento portante; los daños en columnas son más frecuentes; (Diapositiva 5)
 - incapacidad de resistir el corte asociado a la cadencia por flexión; esta situación es típica en las denominadas columnas cortas; (Diapositivas 6 y 7)
 - empalmes en zonas inadecuadas
 - longitudes de anclaje insuficientes;
 - las debilidades en las zonas de unión ó en los elementos que vinculan partes de la estructura, son puestas en evidencia durante la respuesta de la edificación; (Diapositiva 8)

vi) defectos de construcción y uso de materiales inadecuados, bien sea concreto de mala calidad, ó aceros de poca ductilidad.

Apartando las fallas por sobre–esfuerzo debidas a una estructuración inadecuada ((torsión excesiva, columnas cortas, pisos blandos, discontinuidades de masa y rigidez), en elementos de concreto armado pertenecientes a edificaciones bien proporcionadas sin evidencias de irregularidades, han ocurrido daños por alguna de las razones siguientes:

- las solicitaciones reales excedieron las de diseño; (Diapositiva 9)
- excesivos esfuerzos de compresión en columnas, ó elevados esfuerzos de flexo–tracción como consecuencia de una esbeltez excesiva; (Diapositiva 10)
- armado insuficiente de vigas; (Diapositivas 11 y 12)
- armado insuficiente de muros. (Diapositiva 13)

Sistemas estructurales de concreto armado

En las normas suelen distinguirse cuatro tipologías estructurales de concreto armado, en función de los elementos del sistema resistente a sismos. Estas son las siguientes: (Diapositiva 14)

Tipo I

Estructuras capaces de resistir la totalidad de las acciones sísmicas mediante deformaciones debidas esencialmente a la flexión de sus miembros estructurales, tales como los sistemas estructurales constituídos principalmente por pórticos. (Diapositiva 15)

Tipo II

Estructuras constituídas por pórticos y muros estructurales de concreto armado o pórticos diagonalizados, cuya acción conjunta sea capaz de resistir la totalidad de las fuerzas sísmicas. Los pórticos por sí sólo deben estar en capacidad de resistir por lo menos el 25% de esas fuerzas.

Tipo III

Estructuras capaces de resistir la totalidad de las acciones sísmicas mediante pórticos diagonalizados o muros estructurales de concreto armado, que soportan la totalidad de las cargas permanentes y variables. Los últimos son los sistemas comúnmente denominados apantallados o de muros estructurales. Se consideran igualmente dentro de este grupo las estructuras Tipo II cuyos pórticos no sean capaces de resistir por sí sólo el 25% de las fuerzas sísmicas totales, pero sí contribuyan a resistir las cargas gravitacionales.

Tipo IV

Estructuras sustentadas por una sola columna. Estructuras que no posean diafragmas con la rigidez y resistencia necesaria para distribuir eficazmente las fuerzas sísmicas entre los diversos miembros verticales. (Diapositiva 16)

Todos los tipos de estructuras, con excepción del Tipo IV, deberán poseer suficientes diafragmas para distribuir eficazmente las acciones sísmicas entre los diferentes miembros del sistema resistente a sismos.

Sobrecargas y factores de carga

Gravedad

Los efectos de la gravedad terrestre son los del peso propio (CM) y las sobrecargas de servicio (CV). Por ejemplo, algunas cargas máximas de servicio para instalaciones hospitalarias, según normas de diferentes países, se dan en la Tabla 1.

Tabla 1. Sobrecargas de servicio para instalaciones hospitalarias.

	Cargas Máximas de Servicio para Hospitales
--	---

Parte de la instalación	Venezuela 1983	México* 1986	USA (UBC) 1970
Habitaciones	175	170	193
Laboratorios y salas de operación	300	250	----
Depósitos de cadáveres	600	----	----
Corredores	300	----	----

* pueden sufrir reducciones para áreas en exceso de 36 m²

Factores de carga

Los factores de carga tienen por finalidad lograr una adecuada contra posibles excedencias de las sobre-cargas estipuladas; igualmente persiguen satisfacer los estados límites de servicio y últimos. De este modo la carga última U (resistencia requerida) es calculada mayorando los correspondientes efectos.

Así, las dos siguientes superposiciones de efectos son comunes en el diseño de edificaciones de concreto armado:

$$U = 1,4 CM + 1,7 CV \text{ (gravedad)}$$

$$U = 0,75 (1,4 CM + 1,7 CV) + S \text{ (gravedad + sismo)}$$

A nivel de diseño de miembros, los factores de carga no sufren variaciones con las consecuencias de la eventual falla. Por ejemplo, los factores de carga para un hospital y un edificio industrial son iguales; esto es debido a que en la selección de las sobrecargas de servicio ya se tomaron en cuenta las consecuencias del eventual mal funcionamiento. En el caso de los sismos, las normas que establecen las fuerzas para simular sus efectos dinámicos --- y por tanto para calcular S --- establecen en forma explícita tal factor de importancia (Tabla 2).

Tabla 2. Factores de importancia según diferentes normas

Utilización de la edificación	Factor de importancia de la acción sísmica		
	Venezuela	México	USA (UBC 1976)
Vivienda, oficina o comercio	1,00	1,00	1,00
Hospitales	1,25	1,50	1,50
Estación de bomberos	1,25	1,50	1,50
Represa de gran altura	La determinación de los movimientos del terreno requiere estudios especiales, el factor varía entre 1,40 y 2,0 aproximadamente.		
Centrales nucleares			

Resistencia y ductilidad

Resistencia de diseño

La resistencia de diseño de una sección de concreto armado es igual a la resistencia, afectada por un **factor de reducción** ? típicamente igual a 0,90 para flexión (flexotracción ó tracción), e igual a 0,75 para flexocompresión (ó compresión axial) para columnas zunchadas y 0,70 si no son zunchadas. La reducción de resistencia en los elementos sometidos a flexión es menor ya que estos elementos están diseñados para fallar de un modo dúctil, por cedencia del acero a tracción. Las columnas están sujetas a reducciones mayores puesto que su falla puede ser frágil y, eventualmente, comprometer la seguridad de la estructura.

En forma simplificada, el factor de seguridad global se puede estimar dividiendo la carga última (resistencia requerida), entre la de diseño (capacidad resistente minorada). Por ejemplo, bajo la acción de la gravedad terrestre; el cociente:

$$(F =) \frac{(1,4CM + 1,7CV) / \varphi}{CM + CV}$$

depende de la proporción(λ) = CV/CM. Para el caso de flexión ($\lambda = 0,90$), $\lambda = 0$ dá $F = 1,55$ y $\lambda = 4$ dá $F = 1,82$; si se trata de compresión ($\lambda = 0,70$), $\lambda = 0$ dá $F = 1,99$ y $\lambda = 4$ dá $F = 2,34$.

Un cálculo similar para las combinaciones que incorporan el efecto sísmico, el cual no es mayorado, conduce a valores de F cercanos a $1/\lambda$; tanto más cercanos cuanto más importante sea la relación $S/(CM + CV)$. Este resultado es congruente con los criterios empleados para seleccionar las acciones sísmicas de diseño.

Ductilidad

En la Figura 4 se ilustran diagramas carga – desplazamiento típicos de miembros de concreto armado, bajo deformación monotónicamente creciente: dúctil y frágil.

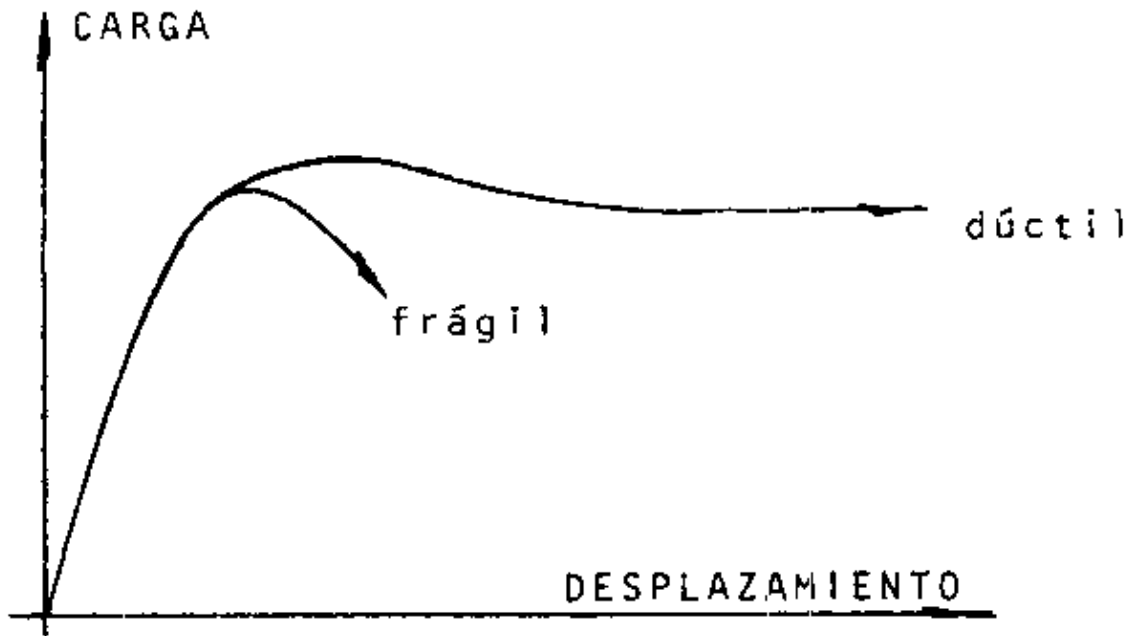


Figura 4. Cualitativas entre conducta dúctil y frágil.

Para historias de desplazamientos con alternancias, Figura 5a (cambios de signo en el desplazamiento), propias de la acción sísmica, una conducta dúctil implica estabilidad en los lazos de histéresis (Figura 5b) a diferencia de una conducta frágil, generalmente asociada a pérdida de rigidez, de resistencia y, de una manera más general, de la capacidad de absorber y disipar energía (Figura 5c).

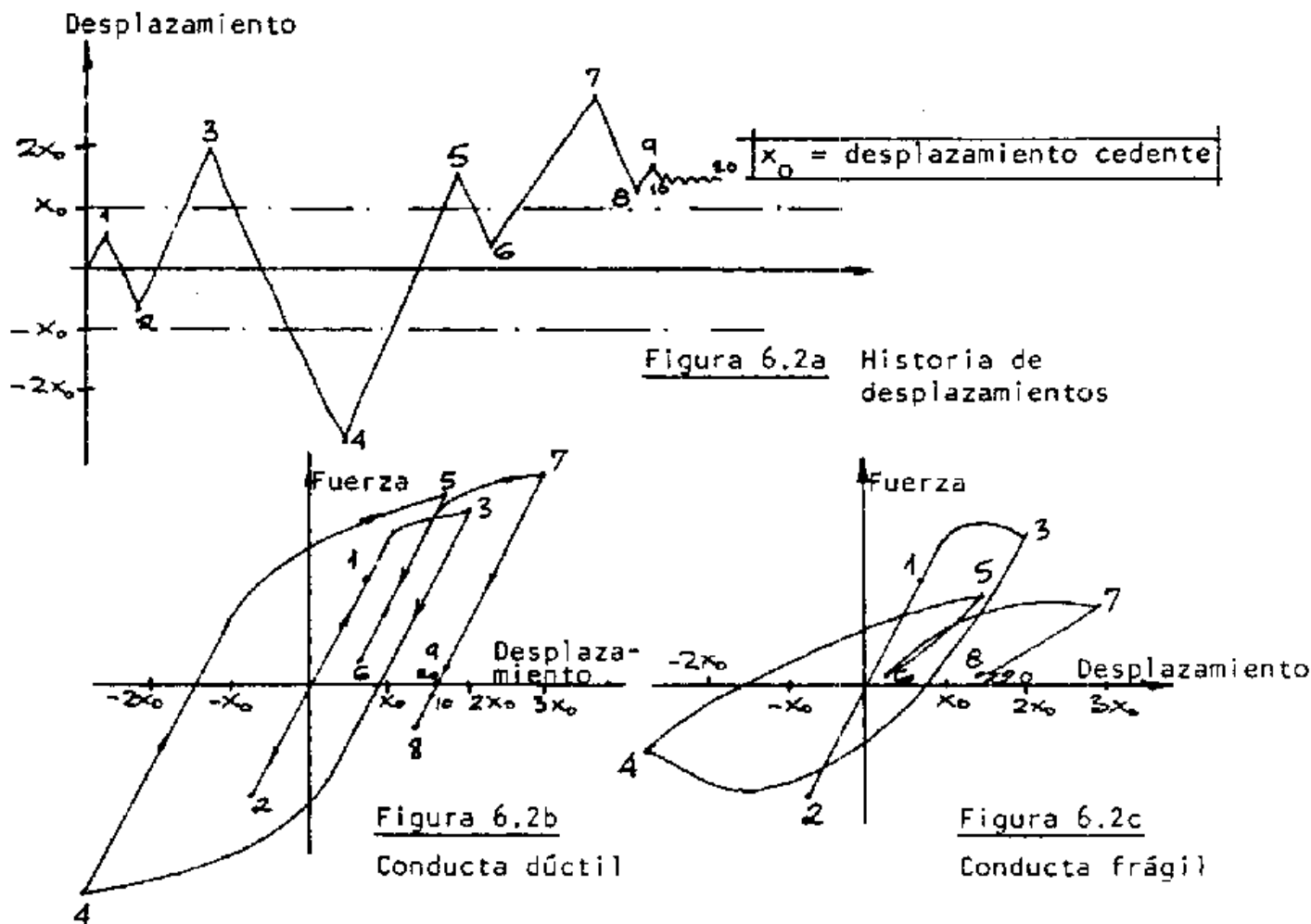


Figura 5. Historia de desplazamientos alternantes, y diferencias entre conducta dúctil y frágil.

Cuando se consideran acciones de tipo sísmico, es muy importante asegurar la conducta dúctil. Esto quiere decir que el sistema portante no sufra reducciones apreciables en su resistencia una vez excedida la deformación cedente, lo cual permite eventuales redistribuciones de sollicitaciones, diferentes a la que corresponde a la respuesta elástica. La manera de lograr tal conducta dúctil en miembros de concreto armado, es cuidando el diseño y ejecución de las armaduras de refuerzo. (véase la sección sobre requerimientos de diseño y ejecución).

Principios generales del diseño dúctil

Tal como se ha anotado, la experiencia demuestra que las estructuras de concreto armado puede resistir exitosamente movimientos sísmicos intensos; esto es así, siempre y cuando se satisfagan ciertas condiciones que permitan absorber y disipar energía de deformación, las cuales constituyen los requisitos de las normas vigentes. De igual modo, los armados inadecuados han sido el origen del comportamiento catastrófico de edificaciones afectadas por movimientos sísmicos.

La manera de cubrir las incertidumbres propias de los posibles movimientos futuros del terreno y de la respuesta dinámica de las edificaciones en el dominio de las deformaciones inelásticas, es un armado eficiente que confiera a la edificación suficiente resistencia y capacidad de absorción y disipación de energía. El sistema resistente a sismos se debe comportar de un modo controlado; es decir, requiere identificar los mecanismos potenciales de ruina y verificar que los componentes críticos de la edificación no fallen de un modo frágil. Para ello se debe tener presente un conjunto de principios generales del diseño dúctil; en particular, verificar que las zonas de disipación de energía se sitúen en elementos que no comprometan en forma prematura la estabilidad del conjunto bajo las acciones gravitacionales.

Estos principios se agrupan aquí en los cuatro que siguen:

- i) Concepción del sistema resistente a sismos (estructura)

- Evitar configuraciones irregulares. La mejor estrategia es aquella que evita problemas cuya solución no es bien comprendida; (Diapositivas 17 y 18)
- Disponer el mayor número posible de líneas de resistencia. Preferiblemente, la configuración final debe estar compuesta de varios sistemas estructurales unidos entre si por elementos que actúan como vínculos disipadores de energía;
- Suministrar rigidez y resistencia a los elementos portantes en forma tal que se asegure el aprovechamiento global de la resistencia y capacidad de absorción de energía de la estructura en conjunto; se minimiza así la probabilidad de formación de mecanismos prematuros; (Diapositiva 19)
- Controlar las demandas globales y locales de ductilidad, reduciendo en lo posible la respuesta; idealmente habría que disponer sistemas de aislación, lo cual aún no puede considerarse de aplicación práctica. Las configuraciones regulares tienden a limitar las demandas locales, para lo cual es preciso:
 - que el edificio sea preferiblemente liviano;
 - limitar los efectos de torsión;
 - en sitios donde las características del subsuelo puedan dar lugar a excitaciones casi armónicas con ordenadas espectrales pronunciadas, alejar el período fundamental de la estructura de la zona de resonancia.

ii) Resistencia y armado

- La resistencia y rigidez a diferentes alturas del sistema resistente a sismos debe ser lo más uniforme, sin discontinuidades. Lo mismo es deseable para la distribución de masas; (Diapositiva 20)
- Permitir la formación de regiones que alcancen deformaciones inelásticas (post-elásticas), debidamente localizadas, y construirlas de forma tal que estén en capacidad de disipar energía sin pérdida apreciable de resistencia;
- Asegurar que en las regiones críticas se desarrollen rótulas de longitud suficiente para que las demandas de ductilidad de curvaturas no sean excesivas. Para ello, en concreto armado se requiere:
 - concretos de suficiente resistencia ($> 200 \text{ Kg/cm}^2$);
 - aceros que garanticen un endurecimiento no menor de un 25% (es decir, rotura/cedencia por lo menos igual a 1,25);
 - limitar los porcentajes de refuerzo longitudinal;
 - confinar las secciones de concreto armado, de modo tal que con el refuerzo transversal se evite el pandeo prematuro de las armaduras longitudinales sometidas a deformaciones de compresión;
- Garantizar ciclos histeréticos estables hasta los niveles de deformación previsible. En concreto armado se requiere:
 - un confinamiento adecuado de las armaduras de refuerzo que deban soportar deformaciones de compresión;
 - disponer longitudes suficientes de anclaje de las armaduras longitudinales a fin de evitar la degradación de resistencia como consecuencia de acciones alternantes.
- Evitar efectos P- Δ excesivos, pues reducen parte de la resistencia lateral. Con este fin es necesario:

- limitar la desplazabilidad;
- evitar el "ablandamiento" excesivo por deformaciones inelásticas en las conexiones como consecuencia de la pérdida local de adherencia;
- limitar grandes masas en la parte superior de la edificación.

iii) Elementos no estructurales

- Evaluar la posible interacción entre los elementos del sistema resistente a sismos y los elementos no estructurales; eventualmente incorporar la capacidad portante de estos a la de la estructura, verificando la estabilidad de los estados límites últimos. (Diapositivas 21 y 22)

iv) Fundaciones

- Que la resistencia del suelo y del sistema de fundaciones sea compatible con la de la superestructura y las acciones que esta pueda transmitir a las primeras.

Algunos de estos principios generales, esencialmente válidos cualquiera sea el material, aparecen ocasionalmente bajo el nombre de "**diseño conceptual**" y a ellos se recomienda asignar tanta importancia como al cálculo de las solicitaciones sísmicas. De igual manera debe tenerse presente que una **inspección inteligente** es tan importante como un buen proyecto.

Requerimientos de Diseño y Ejecución

Las normas para el diseño de elementos de concreto armado en zonas sísmicas, además de suministrar la resistencia y rigidez necesaria para soportar las solicitaciones máximas previsibles, tienen como objetivo evitar la falla prematura generalmente de tipo frágil. Ello requiere criterios de diseño y el respeto a disposiciones constructivas adicionales a las que son de uso común en el diseño para soportar acciones gravitacionales:

Factores de Minoración de Resistencias

Es sabido que los factores γ de minoración establecidos en el diseño de miembros de concreto armado, tienen por finalidad compensar las incertidumbres en la estimación de resistencias. Los valores prescritos de γ para acciones estáticas o monotónicamente crecientes, no siempre son representativos de los efectos debidos a acciones repetidas de signos alternante. En la Tabla 3 se anotan valores representativos de normativas vigentes.

Tabla 3. Factores de minoración de resistencias.

		Factores de Minoración γ		
Tipo de solicitación		Acciones debidas a	Diseño máximas	Cálculo de solicitaciones
Flexión sin carga axial		0,90	0,90	1,0
Tracción accial y flexo-tracción		0,90	0,90	--
Compresión axial y flexocompresión	Miembros Zunchados	0,75 ⁽¹⁾	0,75 (0,50 cuando no se satisfacen requisitos normativos)	1,0
	Otros Miembros	0,70 ⁽¹⁾		1,0
Corte y torsión		0,85	0,85 (0,60 cuando la resistencia de diseño es menor que la exigida)	
Aplastamiento de concreto		0,70	--	--

¹ Puede incrementarse a 0,90 en función de la fuerza axial

Zonas a Confinar y Pandeo Prematuro de Armaduras

A fin de evitar el pandeo prematuro de Las armaduras longitudinales sometidas a deformaciones alternantes de compresión, la separación centro a centro de las barras no debe exceder ciertos límites. Las zonas

usualmente indicadas como de posible rotulación, para miembros sometidos a flexión o a flexo-compresión, se dan en Tabla 4.

Tabla 4. Rangos usuales de la separación máxima de estribos medida de centro a centro.

Se utiliza el menor de siguen: los valores, según los criterios que siguen	Zonas de posible rotulación	
	A la flexión	A la flexocompresión
Separación máxima (cm)	20 a 30	10 a 20
Referida a la profundidad efectiva (d)	d/4 a d/3	---
Referida al diámetro ϕ L de la barra longitudinal más delgada	8 ϕ L	6 ϕ L
Referida al diámetro del estribo ϕ e	24 ϕ e	---
Referida a la menor dimensión del miembro (b)	---	b/5 a b/4

La extensión de las zonas a confinar tanto para miembros sometidos a flexión, como para aquellos sometidos a flexión y carga axial, se comparan en la Tabla 5. (Diapositiva 23)

La agrupación de barras de refuerzo tal como la de esta columna de un edificio de 10 pisos, dañada por un terremoto, requiere más armadura de confinamiento para evitar el pandeo. En los miembros sometidos a flexión, la separación máxima de estribos a todo lo largo del miembro está condicionada por la fuerza cortante (gravedad + sismo), pero en ningún caso debe exceder d/2. (Diapositivas 24 y 25)

Tabla 5. Extensión de la zona a confinar, a fin de evitar el pandeo prematuro de las armaduras.

Tipo de solicitación	Extensión de la zona a confinar, en términos de:		
Flexión	Distancia medida desde la cara de apoyo		2h
	Distancia a cada lado de la sección en donde la armadura alcanza el límite elástico		2h
Flexo-compresión	Distancia medida desde cada extremo del miembro; seleccionar el mayor entre:	Dimensión de la sección transversa	la mayor
		Altura libre del miembro	1/6
		Longitud en cm	45

Fuerzas cortantes de diseño

Las fuerzas cortantes a considerar en el diseño de miembros, no son las que se obtiene en el análisis sino las máximas asociadas a la formación de rótulas plásticas. Por tanto, es preciso que en los cálculos se considere el acero realmente dispuesto en la sección cualquiera que sea el tipo de miembro.

Armadura Longitudinal

- Miembros sometidos a flexión: Para asegurar un comportamiento dúctil bajo la acción de momentos flectores de signo alternante, en las normas se establecen límites superiores e inferiores; estos límites toman en consideración que, para la misma cuantía, la ductilidad de curvaturas disponible varía inversamente con el valor del esfuerzo cedente del acero. La cuantía geométrica ($A_s/b.d$) varía entre un máximo del orden de 2,5% eventualmente función de f_y – y un mínimo de $14/f_y$, donde f_y es el esfuerzo cedente en Kg/cm².

Para cubrir las incertidumbres acerca del verdadero trazado de la envolvente de momentos, debido a que no se puede predecir la secuencia de formación de articulaciones plásticas de la estructura completa, en los miembros sometidos a flexión se exige que a lo largo del mismo exista una capacidad resistente a momentos positivos de por lo menos un 25% de los valores máximos. Aún cuando son muy raros los casos de daños en vigas que se pueden atribuir a la razón anterior, dado que efectivamente hay incertidumbres propias de la respuesta no elástica, se considera una buena práctica respetar esa prescripción.

- Miembros sometidos a flexo-compresión: En miembros sometidos a flexión y compresión axial, es usual limitar las cuantías geométricas de refuerzo longitudinal entre 0,01 y 0,06; el límite superior de la cuantía tiene por finalidad limitar las fuerzas cortantes y evitar la congestión de armaduras.

Armadura Transversal. Tipos

En la determinación de la armadura transversal para los miembros sometidos a flexión, se debe tener presente que usualmente la contribución del concreto se supone nula cuando se cumplen las dos condiciones siguientes:

- a) la fuerza axial mayorada en el elemento, incluyendo el efecto del sismo, es menor que $0,05 A_g F'_c$;
- b) cuando la contribución del sismo a la fuerza cortante de diseño supera el 50% del total.

La contribución del concreto en la resistencia al corte de elementos sometidos a flexo-compresión, se supone igual a cero si la carga axial mayorada incluidos los efectos del sismo es menor que $0,05 A_g f'_c$.

En aquellas estructuras que deban resistir acciones sísmicas intensas, las normas son particularmente exigentes en relación a la configuración de la armadura transversal. En las Figuras 6, 7 y 8 se describen diferentes tipos prescritos y en la Tabla 6 se indican las regiones en las cuales deben disponerse. (Diapositivas 26 y 27)

ESTRIBOS CERRADOS FORMADOS POR DOS PIEZAS

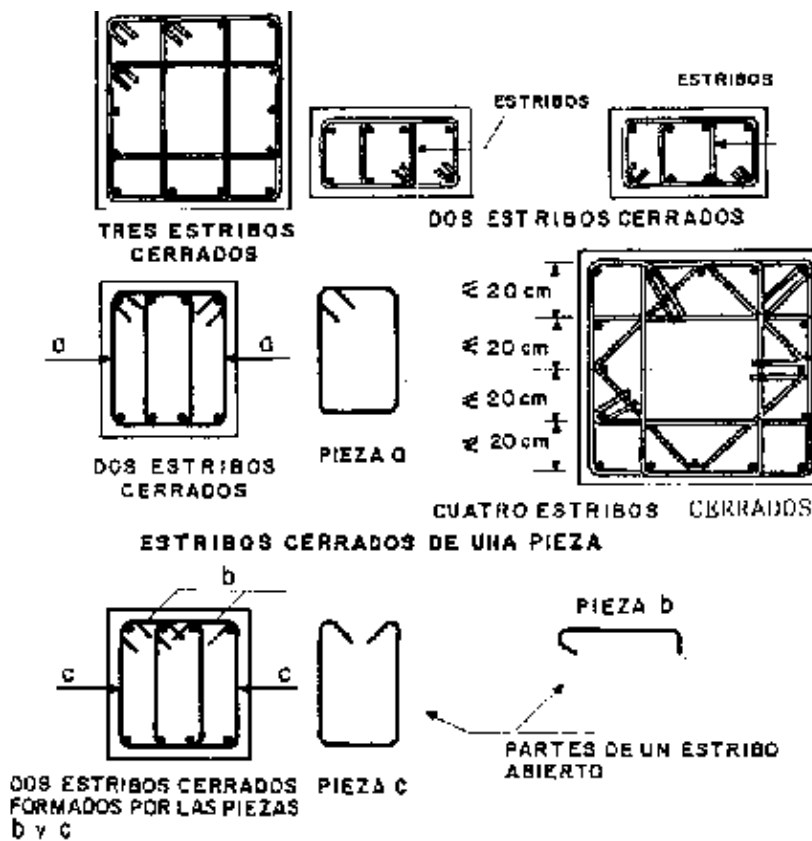


Figura 6 Tipos de estribos cerrados

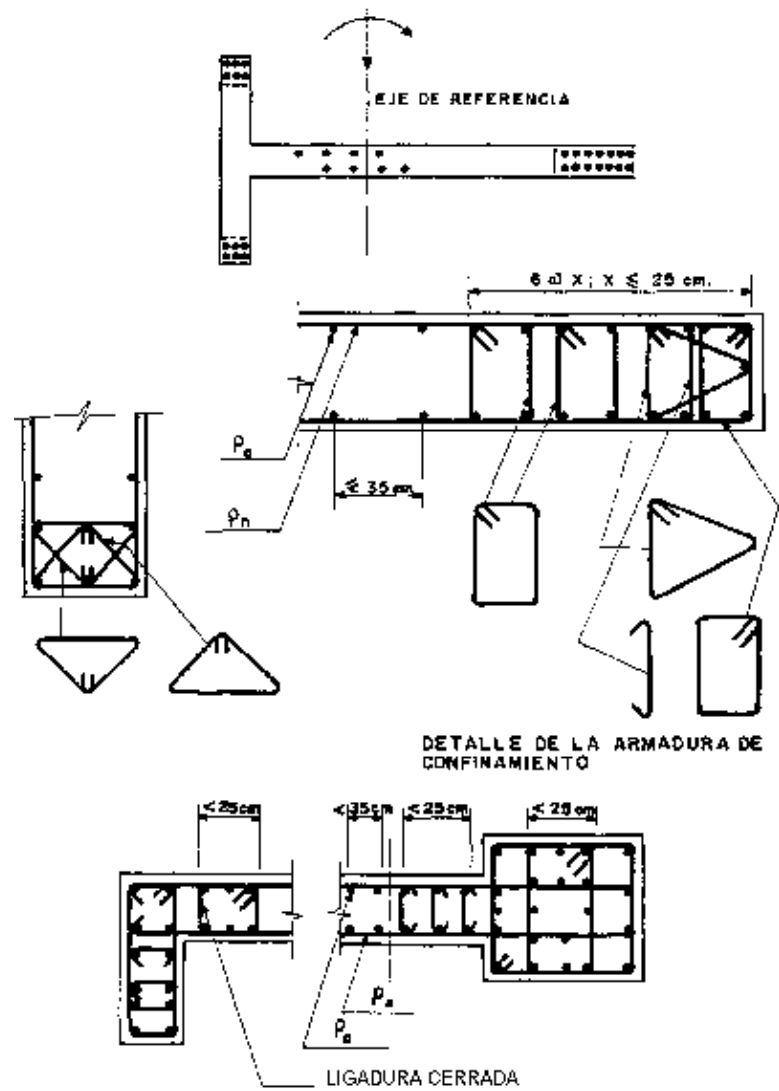


Figura 7. Ejemplos de disposición de armadura en un muro estructural

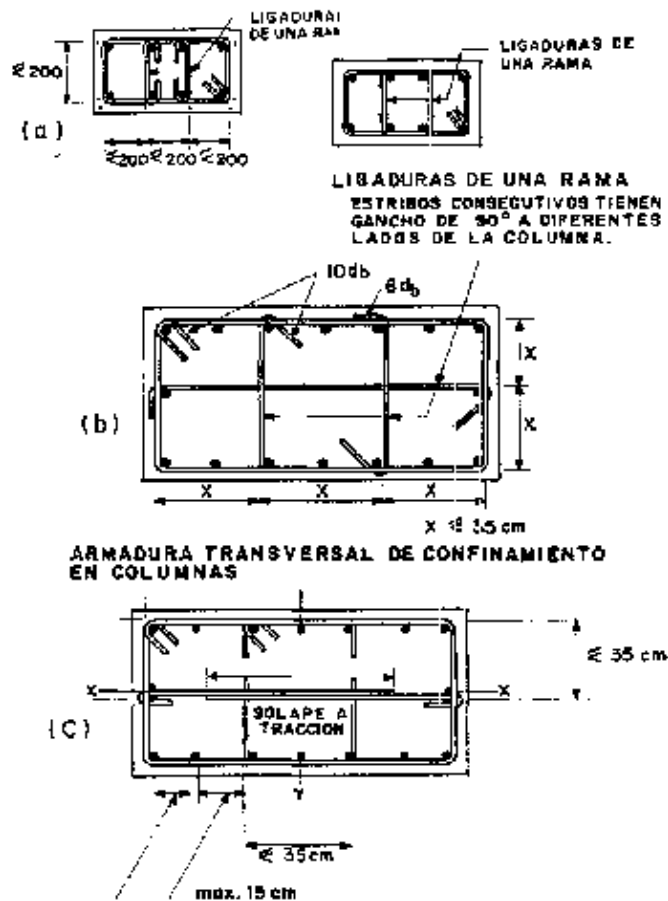


Figura 8. Ligaduras de una rama para refuerzo transversal en columnas.

Tabla 6 Armadura transversal para diseño antisísmico

Tipos de armadura		Regiones donde debe disponerse
Designación	Forma	
Estribos cerrados	Figura 6	Zonas a ser confinadas en miembros a ser sometidos a flexión
Estribos	Figura 6	A todo lo largo de miembros sometidos a flexión; arriostramiento de diagonales de dinteles
Ligaduras y estribos	Figura 7	En muros estructurales
Ligaduras cerradas: • simples • múltiples Ligaduras de una rama	Figura 8	Armaduras de confinamiento en miembros sometidos a flexión y carga axial. Miembros de pórticos diagonalizados y miembros de cerchas cuando los esfuerzos de compresión exceden 0,2 f'c. Armadura transversal de confinamiento en juntas viga-columna. Miembros de borde en diafragmas.

En algunas normas se acepta el estribo de una rama con un doblez a 90° en un extremo y 135° en el opuesto (Figura 8b). Si bien este refuerzo ofrece ventajas constructivas, no es aceptado por todas las normas; evidencias experimentales sugieren como más eficiente la solución indicada en la Figura 8c.

Empalmes de armadura

Generalmente se prohíbe el empalme de barras por solape dentro de las juntas, así como a una distancia igual a 2d medida a partir de la cara del apoyo. Tampoco se autoriza en zonas donde el análisis indique la posibilidad de que la armadura en tracción alcance su límite elástico debido a las incursiones de la estructura en el rango no elástico. Para asegurar un comportamiento adecuado, es recomendable disponer armadura transversal adicional a lo largo de la longitud de solape.

En elementos sometidos a flexión y carga axial, los empalmes por solape conviene disponerlos en la mitad central de la luz libre del miembro y deben ser diseñados como empalmes en tracción.

Las restricciones anteriores, así como los requisitos del armado, son debidos a la poca confiabilidad que merecen este tipo de uniones cuando son sometidas a cargas reversibles en el rango no elástico; su incumplimiento puede conducir a situaciones catastróficas tal como se ilustra en los daños en una escuela de San Salvador, afectada por el terremoto de 1986. (Diapositivas 28 y 29)

Armado de zonas de unión.

En las zonas donde se unen miembros de la estructura portante—vigas columnas o muros—se debe garantizar que la unión esté en capacidad de soportar los esfuerzos transmitidos por los miembros concurrentes. (Diapositivas 30 y 31)

Edificaciones Hospitalarias de Concreto Armado: Evaluación de vulnerabilidad

Como consecuencia de sismos recientes que han afectado centro urbanos de América, diversas instalaciones hospitalarias han sufrido daños. En una muestra de 10 sismos sucedidos entre 1971 y 1987, se han identificado 99 edificaciones, en su gran mayoría de concreto armado, con algún tipo de daño (Figura 9.1). De ellas, 18 se arruinaron o fueron evacuadas inmediatamente después del movimiento sísmico.

Si bien en la estadística anterior se ignora el número de edificaciones que no sufrieron daños, es un hecho reconocido que no todas las edificaciones diseñadas y construídas en años pasados satisfacen los principios y requerimientos de diseño propios de un proyecto sismorresistente (véase Figura 9).

Tal vulnerabilidad a sismos puede ser evaluado en términos cuantitativos y requiere analizar los siguientes aspectos:

- calcular el peligro sísmico de la localidad, tomando en consideración las condiciones locales del terreno
- calcular la resistencia a sismos de la edificación, en función del peligro sísmico del sitio
- analizar las eventuales vías de escape y evacuación;
- evaluar la señalización de equipos contra incendios evaluar los siguientes servicios básicos:
 - agua (fuentes de abastecimiento, potabilidad y reservas)
 - energía eléctrica (planta de emergencia, combustibles, reservas, "anatomía" del funcionamiento, áreas servidas). Paneles de control
 - gas (ubicación de llaves de seguridad, tuberías no)
 - comunicaciones (asegurar un sistema intra y extra hospitalario); con frecuencia se recomienda disponer de equipos de radio de banda ciudadana (11 metros) que también puedan funcionar con baterías
 - instalaciones y equipos (servicios de cirugía, resucitación, de emergencia)
 - áreas de acceso (el acceso de las ambulancias debe quedar garantizado en todo momento).

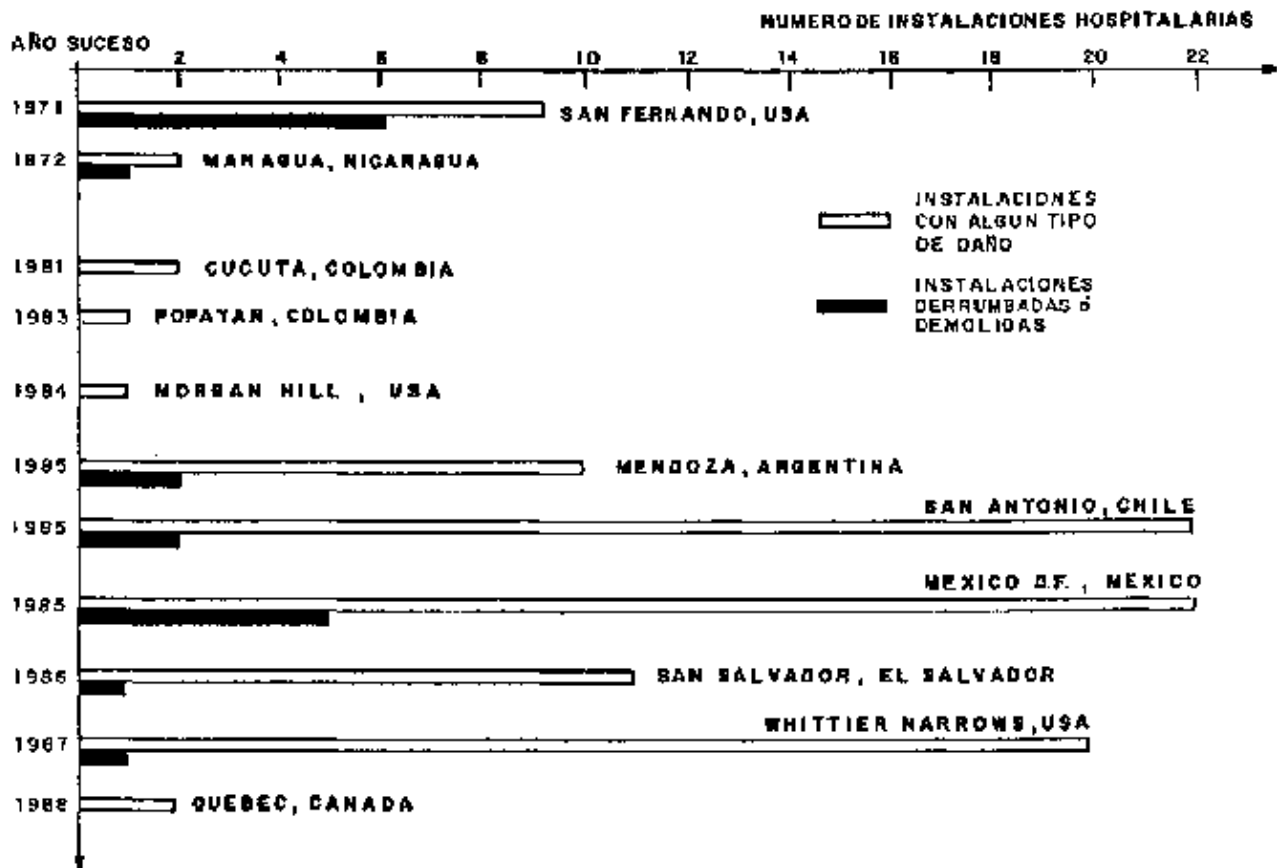


Figura 9. Instalaciones hospitalarias afectadas por terremotos recientes en América (1971–1988).

En el cuadro 1 se presenta esquemáticamente la cuantificación de la vulnerabilidad.

Cuadro 1. Cuantificación de la vulnerabilidad

Cálculo del peligro sísmico	
Cálculo de la resistencia a sismos	
Verificación de vías de escape, evacuación y acceso	
Evaluación de servicios básicos	
* agua	* gas
* comunicaciones	* áreas de acceso
* energía eléctrica	* instalaciones y equipos

Para reducir la vulnerabilidad en instalaciones hospitalarias, es preciso adoptar medidas preventivas que, de una manera general, se pueden agrupar en: inmediatas, mediatas y a largo plazo.

- **Inmediatas:** revisión de instalaciones (generador alterno de energía, tuberías de servicio colgadas, gas, instrumental, farmacia, equipos fundamentales). Medidas de emergencia para evitar volcamientos, caída de objetos pesados, deslizamientos, roturas de tuberías (productos químicos derramados pueden incendiarse). El tiempo y dinero que se invierta identificando y asegurando equipos críticos, puede ser la diferencia por ejemplo, entre un laboratorio funcional y uno que no funcione. No olvidar la señalización de vías de escape y/o evacuación.

- **Mediatas:** resolver en forma permanente los aspectos identificados como medidas inmediatas (el anclaje de equipos y gabinetes puede significar la diferencia entre la vida y la muerte de un empleado que trabaje al lado de ellos). Revisar riesgos asociados a elementos no estructurales (tabiques divisorios, falsos techos, lamparas, vidrios de fachada, elementos decorativos). Programas cortos y periódicos de entrenamiento y simulacros, pueden evitar una respuesta caótica y facilitar una acción eficiente ante cualquier tipo de desastre.

- **A largo plazo:** determinar en forma cuantitativa la vulnerabilidad a sismos de la edificación; si lo amerita, proceder al proyecto de refuerzo y a su ejecución.

Esquemas similares al anterior han sido aplicados en un extenso programa de adecuación sísmica emprendido por el Veterans Administration en Estados Unidos de Norte América, así como por entidades gubernamentales de México, Costa Rica y Perú.

Reducción de riesgos en componentes no estructurales de los hospitales para casos de terremoto

Dr. David Stewart

Efectos de los Terremotos en los Hospitales: El Desastre Interno

El hospital es normalmente una de las instalaciones más imprescindibles y esenciales de toda comunidad, pero tras un terremoto devastador es aún más esencial e imprescindible. Por esa razón, es sumamente importante tomar precauciones antes que se produzca un terremoto de gran intensidad, a fin de garantizar el funcionamiento ininterrumpido del hospital durante el temblor e inmediatamente después del mismo. Varios tipos de desastres y epidemias pueden crear una carga temporaria considerable para los hospitales, pero esa carga nunca será mayor que después de un terremoto devastador. Si los hospitales no están preparados para una catástrofe de este tipo, no podrán responder y mucha gente morirá.

Son varios los campos en los cuales los hospitales deben realizar preparativos para hacer frente a los terremotos. Entre ellos cabe señalar los preparativos para situaciones de emergencia y el diseño estructural, pero en el presente artículo no abordaré esos temas. Una de las maneras más económicas, y sin embargo más eficaces, de mitigar los daños ocasionados por terremotos es tomar precauciones en relación con los componentes no estructurales de los hospitales. De eso trata este artículo.

Entre los edificios e instituciones de un vecindario, el hospital es no sólo uno de los más necesarios para responder a los estragos de un terremoto, sino también uno de los más vulnerables. En la ciudad tal vez haya otros edificios y grupos de edificios de tamaño y construcción similares, pero posiblemente ninguno sean tan complejo desde el punto de vista funcional, tecnológico y administrativo. Algunos de los aspectos privativos de los hospitales son:

- **Complejidad.** Los centros asistenciales son edificios muy complejos que sirven de hoteles, oficinas, laboratorios y depósitos. La función de "hotel" es bastante compleja, y no se limita al suministro de cuartos y camas, sino que comprende también la distribución diaria de alimentos a un gran número de personas, entre ellos pacientes, empleados y visitantes. Estos edificios por lo general tienen muchas salas pequeñas y un laberinto de pasillos. Tras un terremoto, tanto los pacientes como las visitas se sentirán muy confundidos. Es probable que se corte la luz y que los pasillos y las puertas de las habitaciones estén bloqueados por muebles caídos o escombros. Los ascensores no funcionarán, y las escaleras quizá se hayan derrumbado o no se puedan usar por algún otro motivo.
- **Ocupantes.** En los hospitales siempre hay mucha gente: pacientes, empleados, médicos y visitantes. Los hospitales están ocupados 24 horas al día. Muchos pacientes no se pueden valer por sí mismo y necesitan permanentemente la atención de personal capacitado. Algunos están rodeados de aparatos especiales y usan gases que podrían ser perjudiciales, como oxígeno. Otros están conectados a sistemas para mantener la vida, que usan electricidad continuamente.
- **Suministros críticos.** Muchos suministros de los hospitales (fármacos, tablillas, vendas, etc.) son esenciales para la supervivencia de los pacientes e imprescindibles para el tratamiento de las víctimas de los terremotos. Los registros de los pacientes son necesarios para garantizar que reciban tratamiento apropiado, especialmente si deben ser evacuados. Si los locales donde se guardan los suministros y los registros sufren daños durante un terremoto, esos artículos no estarán disponibles justo en el momento en que más se los necesite.

- *Servicios públicos.* Ninguna institución depende más de los servicios públicos que un hospital. Sin electricidad, agua, combustible, sistemas de evacuación de desechos, comunicaciones y libertad de movimiento para entrar y salir del edificio, no puede funcionar. Los aparatos de radiología, monitoreo, mantenimiento de la vida y esterilización, entre otros, necesitan electricidad. Para los grandes centros asistenciales, que tienen una organización compleja, los sistemas internos y externos de comunicaciones son imprescindibles. Las instalaciones de gran tamaño dependen también de los ascensores para el traslado de personas y suministros. Aun en un terremoto de intensidad moderada, los elevadores permanecerán fuera de servicio hasta que un técnico los inspeccione a fin de determinar si se han averiado.
- *Materiales peligrosos.* En los hospitales se usan muchos productos que son peligrosos si se derraman o se fugan (por ej., si se caen estantes con fármacos o sustancias químicas tóxicas tanto en forma líquida como gaseosa). Ciertas reacciones químicas pueden causar incendios. Las botellas de gases caídas y las tuberías de oxígeno rotas también presentan numerosos peligros. Además, si los procedimientos o sistemas de seguridad normales dejan de funcionar, algunos fármacos susceptibles de abuso podrían ser robados.
- *Objetos pesados.* En muchos hospitales hay aparatos o televisores en estantes elevados o cerca de las camas. Si se caen, podrían causar serios traumatismos. Otros aparatos especiales, como máquinas de rayos X y grupos electrógenos de emergencia, son bastante pesados, y es posible que durante un terremoto se caigan o se deslicen por la sala.
- *Problemas externos.* Además de los problemas internos enumerados, resultantes de los daños que sufrirían las instalaciones del hospital, los estragos que se produzcan en el vecindario impedirán el desarrollo normal de la labor de bomberos y policías, y es posible que se corte el teléfono. Al mismo tiempo, comenzará a llegar al hospital un número de heridos sin precedentes, así como amigos y familiares de los pacientes para enterarse de su estado. Es posible que el edificio deje de funcionar y que algunos miembros del personal mueran o sufran heridas cuando más se los necesite.

Es evidente, entonces, que al prepararse para un terremoto los hospitales se enfrentan con problemas que ninguna otra institución del vecindario tiene. La mayoría de los problemas señalados están relacionados con la seguridad estructural del edificio y con los componentes no estructurales. La seguridad estructural se debe tener en cuenta cuando se construye el edificio, de manera que no la abordaré en este artículo. Si el edificio tiene una estructura apropiada, resistirá el terremoto, aunque sea intenso. Sufrirá daños, pero no se derrumbará. Si un hospital se derrumba, aunque sea parcialmente, se convierte en una carga para el vecindario después del terremoto, en vez de ser útil. Este artículo se basa en el supuesto de que se han cumplido los requisitos estructurales.

Aunque un hospital se mantenga en pie tras un terremoto, es posible que deje de funcionar debido a daños no estructurales. El costo de los componentes no estructurales de la mayoría de los edificios es mucho más elevado que el costo de la estructura, especialmente en el caso de los hospitales donde entre el 85 y el 90% del valor de las instalaciones no radica en las columnas, pisos y vigas, sino en el diseño arquitectónico, los sistemas mecánicos y eléctricos, y el equipo. Un temblor de poca intensidad podría causar daños no estructurales que arruinen los componentes estructurales. En consecuencia, los elementos más vitales de un hospital, los más directamente vinculados a su propósito y función, son los que un terremoto más fácilmente podría desbaratar o destruir. Sin embargo, esos elementos son también los más fáciles y los menos costosos de modificar a fin de evitar su avería o destrucción.

No basta que un hospital se mantenga en pie después de un terremoto: debe continuar funcionando como tal. Aunque la apariencia exterior sea la de un hospital, si adentro todo está en ruinas no podrá proporcionar los servicios necesarios a la población. Este artículo trata de la prevención del "desastre interno".

¿Qué diferencia hay entre componentes estructurales y no estructurales?

Es importante comprender cabalmente la diferencia entre los componentes estructurales y no estructurales de un edificio.

Los componentes estructurales son los que mantienen al edificio en pie: cimientos, columnas, paredes maestras y vigas, así como los pisos y techos diseñados para transmitir hasta los cimientos las fuerzas horizontales por las vigas y columnas. El diseño estructural de un edificio nuevo o la modificación estructural

de un edificio existente para que resista los terremotos es algo que sólo puede hacer un ingeniero o arquitecto especializado. Las normas de diseño estructural antisísmico no protegen necesariamente a los edificios contra daños irreparables, sino que impiden que el edificio o una parte del mismo se derrumbe y presente peligro. Por lo tanto, las normas de diseño antisísmico protegen a los seres humanos, y no al edificio. Construir un edificio verdaderamente "a prueba de terremotos" es demasiado costoso o imposible. Sin embargo, es posible —y eficaz en función del costo— construir un edificio que se ciña a las normas de diseño antisísmico para proteger las vidas humanas, a fin de que no se derrumbe aunque sufra serios daños. Los edificios de diseño antisísmico resisten los terremotos de poca intensidad o de intensidad media, sin sufrir daños estructurales. Pasado un punto, sin embargo, como en el caso de los terremotos de gran intensidad, los componentes estructurales que sirven de soporte se deforman, se desplazan permanentemente y sufren daños, aunque continúan soportando el peso del edificio y su contenido. En estos casos, la mayoría de las veces hay que demoler el edificio y construir uno nuevo, pero lo importante es que, si bien el edificio se deforma durante el terremoto, no causa heridos ni muertos.

En este marco resulta fácil comprender que es posible que un edificio sufra muy pocos daños estructurales, o no sufra ninguno, y sin embargo sufra una sacudida tan violenta que su contenido y sus componentes no estructurales queden prácticamente destruidos.

Los componentes no estructurales son los que se apoyan en los componentes estructurales (paredes divisorias, ventanas, cielos rasos, cocheras, etc.), los que desempeñan funciones esenciales (plomaría, calefacción, aire acondicionado, cableado eléctrico, etc.) y los objetos que se encuentran en el interior del edificio. Por consiguiente, hay tres categorías básicas de componentes "no estructurales":

- 1) componentes arquitectónicos,
- 2) sistemas eléctricos y mecánicos, y
- 3) contenido.

Es evidente que, en el caso de un hospital o centro asistencial, los componentes no estructurales son mucho más costosos que el edificio en sí. De hecho, por lo general los componentes estructurales no representan más del 15% del costo total del edificio. Si se agrega el costo del contenido y el equipo, los componentes no estructurales se convierten en el elemento más importante del costo del hospital.

En resumen, los componentes estructurales mantienen al edificio en pie. Generalmente no están a la vista, salvo en los subsuelos, ya que están cubiertos por las paredes y los cielos rasos. Los componentes no estructurales son todo lo demás: el contenido, los sistemas que posibilitan el funcionamiento del edificio y los elementos arquitectónicos visibles.

Medidas previas a los terremotos para mitigar los daños de los componentes no estructurales

El uso de los términos "previas a los terremotos" y "mitigar" en una misma oración es redundante. Mitigar los daños causados por terremotos significa hacer algo antes del terremoto a fin de reducir la severidad de sus efectos. En consecuencia, toda medida para mitigar los daños se toma, por definición, antes del terremoto. Sin embargo, lo decimos así para poner de relieve el hecho de que se puede hacer algo antes de la catástrofe para reducir considerablemente los daños y las pérdidas los terremotos no se pueden evitar; lo que se puede evitar es que causen un desastre. Las medidas para mitigar los daños ocasionados por terremotos, especialmente en lo que concierne a los componentes no estructurales, son muy eficaces en función del costo en las zonas donde se producen terremotos periódicamente. De hecho, por cada dólar bien invertido en medidas preventivas se ahorran entre US\$100 y US\$1.000 en concepto de pérdidas ocasionadas por los terremotos. En términos monetarios, las medidas para mitigar los daños no son un costo, sino un ahorro. En términos de la reducción del número de muertos y heridos, los beneficios son aún mayores.

En los apartados siguientes proporcionaré más detalles. Por ahora me centraré en algunos principios generales para evaluar los riesgos de los componentes no estructurales y tomar medidas preventivas. Después mostraré su aplicación con ejemplos específicos.

Lo primero que hay que hacer para llevar a cabo un programa de medidas para mitigar los daños a los componentes no estructurales de un hospital es realizar una inspección completa y sistemática de las instalaciones a fin de determinar los peligros existentes y clasificarlos en tres categorías y en tres niveles de riesgo. Las tres categorías son: 1) riesgo para la vida, 2) riesgo de pérdida y 3) riesgo de interrupción del funcionamiento. En cada caso se debe indicar si el riesgo es bajo, moderado o alto.

Un ejemplo de un objeto que constituye un riesgo para la vida es un aparato montado en la pared sobre la cama de un paciente que podría caerse y herir o matar al paciente. Si el aparato no está sujeto (por ej., si está apoyado en un estante), el riesgo de que se caiga durante un terremoto es grande. Si está abulonado, pero en forma incorrecta, presenta un riesgo moderado. Si está bien sujeto y es poco probable que se caiga, presenta un riesgo bajo.

Un ejemplo de un objeto que se podría arruinar es una procesadora de textos de una oficina. Probablemente no se caiga ni cause traumatismos a nadie (aunque la posibilidad existe), y su pérdida tal vez no afecte el funcionamiento de los servicios esenciales del hospital, pero podría acarrear una pérdida monetaria considerable.

Un ejemplo de riesgo de interrupción del funcionamiento es un grupo electrógeno de emergencia. Si no está firmemente abulonado o confinado, podría moverse, causando la rotura de las conexiones eléctricas y la interrupción de su funcionamiento. En ese caso no se produciría una pérdida, ya que el equipo en sí no sufriría averías, sino que simplemente se romperían los amarres y las conexiones. No constituiría un riesgo para la vida, al menos no directamente, pero casi todos los aparatos de los hospitales, incluidos los aparatos para mantener la vida de los pacientes graves, necesitan electricidad para funcionar. Por consiguiente, en algunos casos un artículo podría presentar dos o tres tipos de riesgo: riesgo para la vida, riesgo de pérdida o riesgo de interrupción del funcionamiento.

El siguiente formulario, preparado por la compañía Reitherman, de Half Moon Bay, California, facilita la tabulación de los tipos y grados de riesgo que presentan los objetos que se encuentran en los hospitales. No dude en reproducir y modificar este formulario a fin de adaptarlo a las necesidades del centro asistencial donde usted trabaja.

Figura 1. Evaluación del riesgo que presentan los componentes no estructurales de los hospitales.

Fotografía o croquis				
Indicar la sala, el lugar, o la instalación:				
COMPONENTE NO ESTRUCTURAL	RIESGO PARA LA VIDA +	PERDIDA DE PROPIEDAD \$	PERDIDA FUNCIONAL	COMENTARIOS
Señalar el grado de riesgo: B=bajo, M=moderado, A=alto				
Requisitos en materia de servicios auxiliares:				

En el espacio donde se debe indicar de qué sala, lugar o instalación se trata se puede escribir: habitación para pacientes, sala de radiología, sala de operaciones, sala de urgencia, oficina, laboratorio, pasillo, sala de suministros, sala de enfermeras, sala de recién nacidos, cocina cocheras, escaleras, etc. Entre los artículos que hay que tener en cuenta y clasificar cabe señalar las luces, paneles del cielo raso, aparatos colocados sobre masitas rodantes, archivos, aparatos especiales montados sobre soportes o paredes, estanterías, máquinas de escribir, macetas, televisores, ventanas, objetos de vidrio, soportes para dispositivos de infusión, tabiques, tuberías, sustancias químicas, etc.

Después de indicar un componente no estructural que podría constituir un peligro y de señalar si presenta un riesgo para la vida, un riesgo de pérdida o un riesgo de interrupción del funcionamiento, es necesario tomar medidas apropiadas para reducir o eliminar el riesgo. Existen varias medidas preventivas de aplicación general que dan resultado en la mayoría de los casos. En otros se necesita inventiva. A continuación figura una lista de procedimientos generales que se han usado muchas veces en distintos lugares y han resultado eficaces:

1. Quitar el objeto.
2. Colocarlo en otro lugar.
3. Restringir su movilidad.
4. Amarrarlo.
5. Usar acopladores flexibles.
6. Usar soportes.
7. Reemplazar el objeto.
8. Modificarlo.
9. Contar con un objeto de reserva.
10. Responder y repararlo rápidamente.

En algunos casos es preferible quitar el objeto. Por ejemplo, una sustancia peligrosa que podría derramarse se podría guardar fuera de las instalaciones. Otro ejemplo es un revestimiento muy pesado, de piedra o concreto, en el exterior del edificio o en algunos balcones, que se podría desprender fácilmente durante un terremoto y poner en peligro a cualquier persona sobre la que caiga. Una posible solución sería usar dispositivos de amarre o anclaje más firmes, pero lo más eficaz es reemplazar los objetos de ese tipo.

En algunos casos, colocar el objeto en otro lugar es suficiente para reducir el riesgo. Por ejemplo, si hay un objeto muy pesado en un estante alto, se podría caer y causar traumatismos graves, además de sufrir averías. Si se lo coloca en un estante bajo, no presentará ningún riesgo para la vida ni correrá el riesgo de pérdida. Asimismo, es mejor colocar las botellas con líquidos peligrosos en los estantes más bajos.

Restringir la movilidad de las botellas de gases y de los grupos electrógenos es una buena medida. No importa si las botellas se mueven un poco. Lo importante es que no se caigan y que las válvulas no se rompan, porque en ese caso se producirían fugas de gases a una presión elevada. En cuanto al grupo electrógeno de emergencia, es aconsejable colocarlo sobre resortes a fin de reducir el ruido y las vibraciones mientras funciona. Sin embargo, los resortes amplifican el efecto de los temblores. En consecuencia, alrededor de los resortes hay que colocar piezas de fijación o cadenas firmemente sujetas para evitar que el grupo electrógeno salte o se caiga.

Lo más común es el uso de dispositivos de anclaje. Es aconsejable abulonar, amarrar con cuerdas o con alambres, o sujetar firmemente por cualquier otro medio los objetos costosos o de gran tamaño que puedan caerse o deslizarse. Cuanto más pesado sea el objeto, mayor será la probabilidad de que se desplace debido a la inercia. Un buen ejemplo son los calentadores de agua (en los hospitales por lo general hay varios). Son pesados y se pueden caer fácilmente, causando la rotura de tuberías de agua y de conductos de electricidad o combustible, lo cual presenta un peligro de incendio o inundación. La solución más sencilla consiste en amarrar la parte superior y la parte inferior del calentador con tiras de metal a una pared firme o a otro soporte.

A veces se necesitan acopladores flexibles entre edificios y tanques exteriores, entre distintas secciones de un mismo edificio, y entre edificios, porque en un terremoto cada objeto se mueve en una dirección diferente. Algunos objetos se mueven rápido o a frecuencias elevadas, otros se mueven despacio o a frecuencias bajas. Si un tanque exterior está conectado a un edificio por medio de un caño rígido, éste se romperá durante un terremoto fuerte porque el movimiento del tanque diferirá del movimiento del edificio en frecuencia, dirección y amplitud. El uso de un caño flexible para conectar el tanque al edificio evitará las roturas de ese tipo.

En algunos casos conviene usar abrazaderas o colocar refuerzos. Por ejemplo, los cielos rasos colgantes generalmente cuelgan de alambres que resisten únicamente la fuerza de gravedad. Las múltiples fuerzas horizontales y de torsión de los terremotos los harán caer fácilmente. Aunque los paneles son livianos y por lo general no causan daños cuando se caen, en los cielos rasos colgantes a veces hay lámparas muy pesadas, que pueden lastimar seriamente a cualquier persona sobre la que caigan. Además, es posible que las conexiones eléctricas se desprendan, creando un peligro de incendio.

A veces es necesario reemplazar los objetos que podrían constituir un peligro en casos de terremoto con otros que no presenten ningún riesgo. Por ejemplo, un techo de tejas pesadas no sólo coloca un gran peso en la parte superior del edificio, haciéndolo más susceptible a los movimientos sísmicos del terreno, sino que además las tejas se podrían caer y lastimar a la gente o dañar objetos. La solución sería reemplazar ese techo con otro más liviano y seguro.

En algunos casos es posible modificar un objeto para que no presente riesgos si se produce un terremoto. Por ejemplo, cuando un edificio se tuerce y se contorsiona debido a un movimiento sísmico, los vidrios de las ventanas se hacen añicos, lanzando trozos puntiagudos hacia el interior del edificio, donde pueden lastimar a los ocupantes. En cambio, si en la cara interior de los vidrios se colocan láminas de plástico transparente, los trozos de vidrio no se esparcirán. Las láminas de plástico son invisibles, pero evitan la posibilidad de que una ventana cause daños.

Siempre es una buena idea contar con planes de reserva para situaciones de emergencia y con suministros adicionales de ciertos artículos bien guardados en cajas, en sitios donde permanezcan accesibles después de un terremoto.

La respuesta y reparación rápidas son un método de mitigación que se utiliza en las tuberías de largo recorrido. A veces es poco lo que se puede hacer para evitar que las tuberías se rompan en un lugar

determinado. Por esa razón se conservan a mano materiales para repararlas y se toman medidas para facilitar el rápido acceso al sitio en caso de que las tuberías se rompan durante un terremoto. En el hospital se deben tener a mano algunas piezas de plomería, electricidad, etc., así como herramientas apropiadas, a fin de reparar rápidamente los objetos averiados. Esta medida de mitigación constituye el último recurso, pero se puede iniciar antes del terremoto, mientras que el resto del plan se puede poner en práctica después. Por ejemplo, durante un terremoto se pueden romper algunos caños de agua. Tal vez no sea posible amarrar cada caño y tomar medidas para eliminar por completo este riesgo, pero sí es posible tener a mano herramientas para efectuar reparaciones rápidamente. Con la planificación previa a los terremotos, una inversión mínima en ciertos suministros y algunas medidas de precaución se pueden evitar los daños causados por el agua y ahorrar millones de dólares.

Estas diez medidas generales son aplicables a casi todas las situaciones. Sin embargo, en algunos casos deberá recurrir a su inventiva e idear otras medidas de mitigación.

Las fuerzas sísmicas

Para realizar la inspección y evaluación del riesgo de los componentes no estructurales, es necesario comprender algunos principios de la física. Los daños causados por terremotos se deben principalmente a las vibraciones del terreno. Los temblores ocasionan daños de dos maneras: 1) por efecto de la inercia y 2) por deformación. La inercia guarda relación con la masa o el peso del objeto. Cuanto más pesado sea el objeto, mayor será la inercia resultante de las fuerzas sísmicas. Por ejemplo, un aparato de laboratorio muy pesado tal vez esté apoyado sobre el piso, sin ningún dispositivo de amarre, debido a la creencia errónea de que si se produce un terremoto no se moverá porque es muy pesado. Durante un terremoto de intensidad suficiente como para dañar una parte del edificio, este aparato se moverá. Si es más pesado en la parte superior, se volcará. De lo contrario, se deslizará por el piso y podría aplastar a alguien, destruir otros objetos del laboratorio o bloquear una puerta. La fuerza de un terremoto es enorme. Es una de las fuerzas más poderosas de la naturaleza. Si un terremoto es capaz de levantar y desplazar un edificio o una ciudad completa, no cabe duda de que puede levantar y desplazar un aparato aunque pese varias toneladas.

Además de la inercia, el terremoto deforma edificios y objetos. Algunas cosas se doblan y se deforman sin romperse (por ej., los objetos de metal). Otras son quebradizas y se astillan cuando se doblan demasiado. Eso es lo que ocurre con los ladrillos, el hormigón y la mampostería cuando las fuerzas aplicadas son muy poderosas.

Al inspeccionar el hospital, especialmente los componentes mecánicos, arquitectónicos y de calefacción/ventilación, pregúntese si un objeto en particular es susceptible a la inercia o a las deformaciones pronunciadas o a ambas. Es necesario tener en cuenta esos aspectos a fin de tomar medidas preventivas apropiadas.

En muchos casos, cualquier persona puede reconocer, diagnosticar y prescribir las medidas necesarias para mitigar los efectos de los terremotos en los componentes no estructurales, y no se necesitan conocimientos o experiencia en el campo de la ingeniería. Por supuesto, se necesita sentido común y buen criterio, pero no una gran pericia técnica. Entre los componentes no estructurales que no requieren la intervención de expertos en la inspección y en la adopción de medidas de precaución se encuentran los siguientes:

Muebles pequeños

Aparatos pequeños apoyados en mesas o mostradores, especialmente si no son imprescindibles

Armarios

Archivos

Estanterías colgadas de la pared

Objetos apoyados sobre estantes

Calentadores (de tamaño similar a los de uso doméstico)

Lámparas

Láminas de plástico para evitar la dispersión de fragmentos de vidrio de las ventanas

Los objetos precedentes son algunos de los que cualquier persona puede reconocer y tomar precauciones al respecto. En otros casos, es mejor que el diagnóstico y las medidas de mitigación se lleven a la práctica bajo la supervisión de un ingeniero especialmente capacitado. Entre los componentes no estructurales para los cuales se aconseja la intervención de un ingeniero se encuentran los siguientes:

Aparatos mecánicos, como bombas, acondicionadores de aire, ventiladores, etc.
Aparatos eléctricos de gran tamaño, como transformadores o conmutadores
Aparatos grandes o pesados, como máquinas de rayos X o dispositivos de exploración
Paredes de las que cuelgan estanterías o aparatos pesados
Aparatos de importancia crítica debido al peligro que podrían presentar (por ej., radiactividad)
Aparatos de importancia crítica debido a su costo elevado (por ej., equipo de medicina nuclear)
Aparatos de importancia crítica debido a que desempeñan una función esencial (por ej., grupos electrógenos de emergencia)

En algunos casos, los códigos municipales o provinciales exigen que cualquier cambio que se realice sea aprobado por un inspector del gobierno. Esas normas podrían abarcar los siguientes componentes no estructurales:

Tabiques interiores
Cielos rasos
Armarios de más de un metro y medio de altura o que estén sujetos a las paredes o al cielo raso
Bastidores de más de un metro y medio de altura
Equipo de cocina
Ascensores o montaplatos
Ciertos aparatos mecánicos y eléctricos
Piezas de plomería y tuberías
Tanques de agua
Bombas y motores
Tuberías y rociadores para incendios
Grupos electrógenos, baterías y combustible
Conmutadores telefónicos
Botellas de gases de uso médico
Aparatos de uso médico sujetos al cielo raso
Aparatos de rayos X
Equipo de laboratorio

Hay que cerciorarse de que las medidas de mitigación que se adopten se ciñan a los reglamentos y códigos vigentes.

Medidas específicas de mitigación de los efectos en componentes estructurales

Primero abordaré brevemente las medidas de índole arquitectónica; después, las aplicables a componentes mecánicos y eléctricos, también en forma sucinta, y por último examinaré en detalle el contenido y los aparatos de uso médico especializados.

Consideraciones de índole arquitectónica

Las ventanas son peligrosas durante los terremotos. Están colocadas en marcos rectangulares que en un terremoto pueden tomar la forma de paralelogramos, haciendo añicos el vidrio y lanzando fragmentos puntiagudos hacia el interior del edificio. Se han encontrado trozos de vidrio clavados en pisos de madera y en muebles de madera a seis metros de la ventana. Si bien durante un terremoto es aconsejable alejarse de inmediato de cualquier objeto de vidrio, la mejor manera de protegerse es tomar medidas para evitar la dispersión de los fragmentos. Eso se puede lograr de dos formas: dejando suficiente espacio entre el vidrio y el marco al instalar las ventanas y rellenando el espacio con un producto de vidriado, para que el vidrio no se quiebre si el marco se deforma (hasta cierto punto), o recubriendo la cara interior del vidrio con una lámina de plástico resistente, que si bien no impide que el vidrio se rompa, evita la dispersión violenta de los fragmentos en el interior del edificio

Por razones arquitectónicas, algunos edificios tienen un revestimiento de piedra u hormigón. El revestimiento debe estar firmemente sujeto a los componentes estructurales del edificio a fin de que resista la fuerza del terremoto. De lo contrario, hay que quitarlo y reemplazarlo a fin de que no presente graves peligros para la gente y los objetos

El relleno de mampostería consiste en la colocación de ladrillos, piedra o bloques de cemento entre las columnas. Si durante un terremoto la mampostería se derrumba o sufre daños, no causará el derrumbe del

edificio ni daños estructurales, pero constituye un peligro porque podría lesionar a cualquier persona o arruinar cualquier objeto sobre el que caiga. Un ingeniero deberá evaluar las posibilidades de que eso ocurra.

Las salas y habitaciones grandes comúnmente están divididas por medio de tabiques, a los cuales a veces se adosan estanterías. Durante un terremoto, los tabiques se podrían caer y no sólo ocasionar lesiones, sino también bloquear las puertas, dificultando la evacuación y el desplazamiento en el edificio. Es necesario sujetar los tabiques tanto en la parte inferior como en la parte superior para evitar que se caigan.

Los cielos rasos y las lámparas son especialmente vulnerables a las vibraciones causadas por terremotos. Los cielos rasos colgantes se pueden derrumbar con un terremoto de intensidad moderada. Si en los cielos rasos hay lámparas, el peso adicional aumenta su vulnerabilidad. Los cielos rasos por lo general están colgados con alambres. Cerciórese de que haya suficientes alambres y que estén colocados en ángulos apropiados para evitar los movimientos laterales en cualquier dirección.

Se podrían tener en cuenta también otros factores arquitectónicos, pero las medidas más eficaces en función del costo que se pueden tomar en relación con componentes no estructurales son las aplicables a sistemas eléctricos y mecánicos, y en particular al contenido del edificio. Por esa razón me referiré en más detalle a esos aspectos.

Sistemas mecánicos y eléctricos

Los cielos rasos colgantes de las salas y pasillos de los hospitales ocultan un laberinto de tuberías, respiraderos y conductos para cables, que integran los sistemas de ventilación, abastecimiento de agua, comunicaciones, suministro de electricidad y otros servicios públicos fundamentales para el hospital. Detrás de las paredes y debajo del piso hay tuberías para aguas residuales y otros servicios esenciales. Además de las redes de distribución, hay cajas de conmutadores y terminales, bombas, compresores, motores, computadoras y otros mecanismos complejos y dispositivos electrónicos.

Todas las tuberías y respiraderos elevados deben estar firmemente anclados y especialmente reforzados en los empalmes o conexiones. En algunos casos es mejor usar conexiones flexibles; en otros se necesitan conexiones rígidas. Esa es una decisión de índole técnica.

Los calentadores son muy vulnerables y pueden presentar un gran peligro. Son pesados, de manera que si un temblor los sacude, están a merced de la inercia. Durante los movimientos sísmicos, tienden a volcarse fácilmente. Al caer, quiebran caños de agua, causando inundaciones y bloqueando los esfuerzos para combatir los incendios. También pueden causar incendios si cortan cables o caños de gas, según funcionen con electricidad o gas. Un terremoto de intensidad moderada que en sí no ocasionaría daños importantes puede resultar en la destrucción del edificio si el calentador se cae y provoca un incendio. Para evitar este posible desastre se puede tomar una medida sencilla y económica. Lo único que se necesita es sujetar el calentador a una pared sólida y firme o a otro soporte adecuado con tiras de metal resistente. No use clavos para sujetarlos a una pared, sino bulones directamente en los postes de tabique o en los soportes de la pared. No basta con amarrar la parte superior del calentador, porque con la fuerza del terremoto el piso se puede hundir, en cuyo caso el calentador podría soltarse del amarre superior y deslizarse. Por eso se necesitan amarres tanto en la parte superior como en la inferior.

A menudo, conforme a los reglamentos municipales los edificios deben estar dotados de rociadores para incendios. En algunos casos, un terremoto podría activarlos, anegando el edificio. Durante un terremoto en California, en un edificio que no había sufrido grandes daños se activó el sistema de rociadores, y el agua acarreó pérdidas de varios millones de dólares. Pídale a un ingeniero que examine esta posibilidad y que tome los recaudos pertinentes si parece haber un riesgo.

La cocina y el lavadero son dos sectores donde el agua caliente y el vapor podrían ser un peligro. Si hay una sala de calderas, un ingeniero debería inspeccionarla y determinar si las calderas y las tuberías están bien ancladas.

La mayoría de los aparatos que se usan en los hospitales deben estar conectados en forma temporaria o permanente a sistemas mecánicos y eléctricos. El técnico que realice la instalación deberá tener en cuenta el mantenimiento de las conexiones y hacerlas de manera tal que si se rompen durante un terremoto no presenten peligros. Aunque los aparatos estén bien sujetos, tal vez la diferencia entre el movimiento de los aparatos y el movimiento de las paredes o del cielo raso sea tan grande que las conexiones rígidas se corten. Las fugas de gas, vapor o agua caliente podrían ocasionar riesgos para la vida, así como peligro de shock o de incendio, o interrumpir el funcionamiento de aparatos esenciales. Algunas posibles soluciones son:

Gas, agua o vapor:

1. Conexiones con mangueras flexibles
2. Conexiones con uniones giratorias
3. Válvulas de cierre automático

Electricidad:

1. Conductos flexibles para los aparatos conectados permanentemente
2. Cables y conectores que no sean los que se traban con un movimiento giratorio, a fin de que los aparatos enchufables no se averíen si los cables sufren tirones. Es preferible que la mayoría de los aparatos se desenchufen fácilmente, en vez de que funcionen con el conector a tierra cortado.

Los grupos electrógenos de emergencia son esenciales para los hospitales. Se puede dar por sentado que con un terremoto se cortará la electricidad. Hasta un terremoto de intensidad moderada puede causar un corte de luz. Por lo tanto, es absolutamente necesario que el grupo electrógeno de emergencia resista los terremotos. Para ello debe cumplir los siguientes requisitos:

1. Debe estar sujeto firmemente o inmovilizado para que no se tumbe ni se desplace durante el terremoto.
2. Deberá usar un tipo de combustible que esté disponible después del temblor (diesel, gasolina, etc.).

Los grupos electrógenos son muy pesados y muy vulnerables a los efectos de la inercia durante los terremotos. Cuanto más pesado sea un grupo electrógeno, mayor será el riesgo de que se mueva durante el terremoto. Si al sujetarlo firmemente a un piso sólido vibra demasiado o hace mucho ruido, use resortes o dispositivos de anclaje flexibles y sujételo bien para que permanezca en su lugar. Los soportes de resorte amplifican los efectos de los terremotos, problema que hay que tener en cuenta al decidir qué mecanismo se empleará para inmovilizar el aparato. Si el grupo electrógeno se desplaza, podría bloquear una puerta, pero el mayor peligro es que se corten los cables de distribución de energía eléctrica o las tuberías del combustible. Con esas averías no puede funcionar ni distribuir electricidad. Por consiguiente, hay que prestar mucha atención a las conexiones, aunque el grupo electrógeno esté bien amarrado. Aun así es posible que la diferencia entre el movimiento del grupo electrógeno, las paredes y el piso sea tan grande que se corten las conexiones. Por esa razón, conviene usar conexiones flexibles. En cuanto a la disponibilidad de combustible para el grupo electrógeno, cerciórese de que no esté conectado a un caño de gas exterior. Si se produce un terremoto suficientemente intenso como para causar cortes de luz, es probable que el suministro de gas también se interrumpa. El grupo electrógeno debe usar un tipo de combustible que esté disponible a pesar de que el terremoto cause daños fuera del hospital.

Otro aspecto que hay que tener en cuenta es los bastidores para las baterías. Cerciórese de que las baterías estén montadas firmemente en bastidores que no puedan volcarse. Las baterías son pesadas y vulnerables a los efectos de la inercia. Los bastidores para baterías son pesados en la parte superior. Si no están bien sujetos a un componente estructural sólido, tanto en la parte superior como en la parte inferior, y si las baterías no están bien amarradas a los bastidores, éstos se caerán y se arruinarán durante el terremoto.

Las comunicaciones, tanto internas como con el exterior, son imprescindibles para un hospital. Parta de la base de que el sistema de telecomunicaciones públicas se cortará durante un terremoto; tenga a mano radios bidireccionales para comunicaciones tanto locales como de larga distancia con el exterior. Dentro del edificio, pídale a un ingeniero que inspeccione todos los componentes del sistema a fin de determinar los puntos expuestos a daños sísmicos y tomar las precauciones del caso. Con esas precauciones y con un grupo electrógeno de reserva que funcione, no tendrá ningún problema con las comunicaciones internas.

Efectos de los movimientos sísmicos en el contenido de los hospitales

El contenido (los muebles, los aparatos y los suministros) es lo más importante y lo más valioso de un hospital. Algunos de estos elementos pueden presentar riesgos para la vida durante un terremoto; otros pueden interrumpir procedimientos esenciales si se averían, y otros pueden acarrear pérdidas financieras. Comenzaré por los elementos que presentan riesgos. No voy a presentar una lista completa, sino varias sugerencias. Usted deberá preparar una lista apropiada para su hospital.

Objetos peligrosos: Los objetos peligrosos para la vida son los que podrían infligir traumatismos debilitadores o empeorar el estado de un paciente internado. La primera definición se aplica al personal. Una magulladura o una cortadura poco profunda es algo tolerable, pero una fractura o una laceración profunda no lo es, porque impide que el empleado desempeñe sus funciones.

Cabe destacar los siguientes peligros:

1. Impacto de objetos filosos o de vidrio.
2. Impacto de objetos sueltos que caen de gran altura.
3. Impacto de objetos que se deslizan o ruedan por el piso.
4. Contacto directo con contaminantes o sustancias tóxicas o inhalación de los mismos.
5. Desconexión o avería de sistemas para mantener la vida
6. Contacto con cables expuestos, vapor o gases de uso médico.
7. Imposibilidad de conseguir aparatos o suministros esenciales o de salir de un recinto peligroso o no esencial (en otras palabras, estar atrapado)

Piscinas y Tanques para Hidroterapia: Las salpicaduras de las piscinas cubiertas son inevitables, de manera que en su proximidad debe haber rejillas de desagüe apropiadas y los tanques deben estar bien sujetos al piso.

Aparatos para Rehabilitación: Algunos aparatos tienen contrapesos o el centro de gravedad elevado. Se deben tomar precauciones para evitar el movimiento descontrolado de los contrapesos, en tanto que los aparatos que estén parados deben estar sujetos al piso para que no se caigan.

Objetos colgados de las Paredes: Relojes, Cuadros, Carteles, Pizarras de Anuncios, Televisores: En las habitaciones de los pacientes, los pasillos y las oficinas administrativas abundan estos objetos. Deben estar ubicados en un lugar adecuado y bien sujetos. Los relojes, televisores y otros objetos pesados deben estar bien amarrados, y no se deben colocar sobre las camas de los pacientes ni sobre las puertas.

Lámparas de Cabecera: A menudo, al costado de las camas de los pacientes hay lámparas con un brazo articulado movable, fijas o portátiles, que deberían estar sujetas cuando no se las esté usando.

Bibliotecas: En las oficinas y otros lugares de trabajo hay numerosas bibliotecas modulares con puertas de vidrio. Los módulos deben estar bien sujetos entre sí, y para las puertas se podría usar otro material, en vez de vidrio (por ej., un plástico que no se astille). Se debe emplear algún método para impedir que los libros se caigan. Las estanterías deben estar firmemente sujetas a los soportes de las paredes, porque es muy fácil que se vuelquen con las vibraciones sísmicas. En una biblioteca donde haya varias hileras de estanterías altas alejadas de las paredes, es necesario abulonarlas al piso en la base y amarrarlas por la parte superior a tirantes que atraviesen la sala y que estén sujetos a una pared en ambos extremos. Si las estanterías no están amarradas tanto en la base como en la parte superior, se caerán.

Distribuidores Automáticos: Estas máquinas, que por lo general están ubicadas en las salas de espera o cerca de ellas, tienen un centro de gravedad elevado y son pesadas. Si se las coloca en un pasillo, pueden volcarse e impedir el paso a sectores críticos. Deben estar sujetas al piso y a las paredes, tanto en la base como en la parte superior, y las conexiones eléctricas deben estar protegidas contra desconexiones bruscas.

El sector destinado a medicina nuclear presenta riesgos especiales, entre los cuales cabe señalar los siguientes:

Mesas Rodantes para Colimadores: Cuando están cargadas de colimadores, que se usan con las cámaras gamma, estas mesas pueden pesar más de 700 kilos. Cuando no se usen para transportar aparatos, las mesas deberán estar bien amarradas.

Cámaras Gamma: Son muy parecidas a las máquinas de rayos X, pero son más pesadas, tienen ruedas y hay que usarlas con colimadores. Cuando no se las use, deberán estar en la posición más baja y bien sujetas.

Baño de Aceite: Se encuentra en la farmacia nuclear, y normalmente consiste en un recipiente abierto con aceite a 100 grados centígrados. El recipiente debe estar bien sujeto por la base y tener una cubierta apropiada a prueba de chapoteo.

Pantallas Protectoras: A menudo son de ladrillos de plomo. Los ladrillos deben estar trabados o conectados de manera tal que no se desplacen con las vibraciones.

Contador de Centelleo: Su peso, y no la radiactividad, es lo que constituye un peligro. Debe estar sujeto a un componente estructural suficientemente firme como para sostenerlo.

Materiales y desechos radiactivos: Los desechos radiactivos constituyen el principal peligro. Los suministros se deben guardar en un sitio del cual no se puedan caer ni estén expuestos al impacto de otros objetos. Los tambores de 200 litros que se usan para desechos radiactivos deben estar dotados de tapas de seguridad.

Balanzas: Las balanzas se encuentran en la sala de ingredientes. Debido a su peso y a que tienen un centro de gravedad relativamente alto, pueden rodar y volcarse. Deben estar bien amarradas a los carritos, preferiblemente a los proporcionados por el fabricante, y éstos deben estar sujetos a una pared con una cadena y cierre de resorte.

Recipientes portátiles y Fijos para Líquidos: En el comedor, los recipientes portátiles por lo general están montados en carritos, mientras que los fijos están emplazados sobre un mostrador. Se deben tener en cuenta también las máquinas que dispensan café y té. Los recipientes portátiles deben estar bien sujetos a los carritos, y éstos deben estar amarrados.

Reactivos y Productos Químicos: Algunos son esenciales, otros no. En ambos casos se deben tomar precauciones para que no se caigan de los estantes. Los productos esenciales deben estar separados de los demás.

Botellas de Gases: Están ubicados en las zonas de servicio. Contienen diversos gases, algunos tóxicos y otros inflamables. Hay que amarrarlas bien para evitar que causen lesiones a los pacientes o al personal y daños a elementos esenciales.

Talleres: Los departamentos de ingeniería, mantenimiento, investigaciones y prótesis tienen talleres. Allí hay máquinas pesadas paradas en el piso, como tornos, sierras radiales, prensas, etc. En las mesas de trabajo se usan taladros, lijadoras y numerosas herramientas de mano. Es necesario tomar precauciones para evitar que cualquiera de esos artículos se caiga.

Animales de Laboratorio: En ciertos proyectos de investigación se usan animales. Algunos pueden ser portadores de microorganismos patógenos o comportarse en forma impredecible en cautiverio. Hay que tener mucho cuidado con las jaulas, los carritos y los abrevaderos y comederos automáticos.

Acuarios: Estos tanques, que se usan principalmente para investigaciones, pueden contener entre 40 y 700 litros de agua. Es necesario tomar precauciones para evitar que se muevan y se vuelquen, y deben estar instalados en sitios con rejillas de desagüe.

Depósito de Materiales de Construcción y Reparaciones: En los talleres y depósitos se guarda madera, tuberías, conductos, piezas de plomería y otros suministros. Debido a su tamaño y a su peso, esos artículos deben estar bien amarrados a las estanterías, y éstas deben estar sujetas a las paredes, el cielo raso y el piso.

Artículos esenciales: Son los artículos necesarios para que el hospital continúe funcionando.

Instrumentos esenciales de diagnóstico: En los consultorios se usan termómetros, esfigmomanómetros, estetoscopios, otoscopios, oftalmoscopios, martillos de goma y linternas todo el tiempo. Se deben guardar juegos especiales cerca de los lugares donde se los vaya a necesitar después de un terremoto, a fin de que estén disponibles para los equipos de ordenación y clasificación de víctimas, el personal de enfermería y los equipos de las salas de operaciones.

Camas para Pacientes: La mayoría de las víctimas de los terremotos son pacientes no ambulatorios. Los requisitos normales de flexibilidad en cuanto a la posición de las camas no son compatibles con las medidas de seguridad para proteger las camas y los pacientes contra movimientos descontrolados durante un terremoto. Las camas y otros equipos deben estar dotados de mecanismos de desenganche rápido.

Mesitas Rodantes con Equipo de Emergencia: En todos los consultorios hay mesitas rodantes cargadas de equipo y suministros para crisis y emergencias. El equipo y los suministros deben estar bien sujetos a las mesitas, y éstas, cuando no se usen, deben estar amarradas a una pared o a un tabique.

Pulmotores y Dispositivos de Aspiración: A fin de evitar que el paciente se separe de estos aparatos, es necesario inmovilizar la cama, el pulmотор y el dispositivo de aspiración.

Sillas de Ruedas y Camillas con Ruedas: Estos artículos son esenciales. Deben estar dotados de frenos en todas las ruedas, deben funcionar con un solo dispositivo de control y tener un dispositivo de freno que se activa automáticamente cuando no estén en uso.

Monitores: Con frecuencia, los monitores están apilados en masitas rodantes o apoyados contra las paredes, sostenidos por soportes. Los módulos deben estar firmemente conectados entre sí y bien sujetos a los estantes o soportes.

Mesas de Cama: Estas mesas son esenciales para el personal de enfermería y para los pacientes. Deben estar bien sujetas para evitar los impactos y los vuelcos.

Soportes para los Dispositivos de Infusión: Estos soportes, que pueden tener ruedas o estar adosados a la cama, son esenciales para la atención del paciente. Cuando estén en uso, se deberán sujetar a la cama o a la mesa. Cuando no se usen, se deberán guardar en grupos, sujetos entre sí.

Mesa de Operaciones: La mesa de operaciones presenta un problema complejo. Los riesgos son menores si se sujeta al paciente a la mesa y si la mesa en sí está inmovilizada. Otros objetos auxiliares, como masitas rodantes con aparatos de anestesia, cauterios, instrumentos, etc., también deben estar sujetos a la mesa.

Mesita Rodante para el Aparato de Anestesia: Después de un terremoto, se usará mucho para los procedimientos que requieran anestesia. En estas masitas hay un aparato de anestesia, botellas de reserva, monitores y bandejas. Cuando estén en uso, se las deberá amarrar a la mesa de operaciones, y los aparatos y el instrumental deberán estar bien sujetos a las masitas rodantes.

Lámparas para Cirugía: Son esenciales después de los terremotos, tanto para examinar a los pacientes como para administrar tratamiento. El principal peligro que presentan es que podrían iniciar un vaivén violento y golpear a los pacientes, el personal u otros aparatos. Eso se puede evitar ajustando los puntos de articulación.

Archivos y Registros Médicos: Los archivos y registros médicos son importantes para la atención de los pacientes, pero podrían ser peligrosos si no están bien sujetos a las paredes y el piso. Los cajones de los archivos están montados sobre cojinetes de bolas y se deslizan fácilmente con las vibraciones de los terremotos, a menos que se cierren con trabas. Si todos los cajones se abren, el archivo se volcará, salvo que esté bien amarrado. Los archivos caídos dificultan o imposibilitan la evacuación, además de causar lesiones si se caen sobre alguien.

Computadoras: Hoy en día se almacenan muchos datos en las computadoras. A menos que estén sujetas a las mesas, podrían caerse y averiarse. Por lo general, con colocar un reborde alrededor de la mesa basta para evitar que se caigan. También se pueden usar tiras de Velcro para que no se deslicen. Las computadoras de gran tamaño presentan otro tipo de problema, ya que normalmente se encuentran en salas con piso hueco. Cerciórese de que estén bien ancladas.

Refrigeradoras de Bancos de Sangre: En estas refrigeradoras se debe mantener una temperatura constante que no exceda de tres grados centígrados. No sólo las refrigeradoras, sino también el termómetro y el sistema de alarma, deben estar conectados a una fuente de alimentación constante.

La lista de objetos es prácticamente infinita. En la mayoría de los casos, el sentido común dictará las medidas que se deban tomar para mitigar los daños que podrían ocasionar los terremotos. A continuación se mencionan más objetos. Algunos representan un riesgo para la vida o son peligrosos, otros son esenciales o pueden acarrear pérdidas financieras.

- Armazones para inmovilizar pacientes y camas giratorias
- Aparatos para tracción
- Máquinas para controlar la hipertermia y la hipotermia
- Botellas portátiles de oxígeno y de otros gases de uso médico
- Orinales y objetos para lavado e higiene
- Máquinas de hemodiálisis
- Dializadores Aparatos de desionización
- Teleautógrafos

Mesitas rodantes con medicamentos
 Campanas de humos portátiles
 Distribuidores automáticos
 Productos farmacéuticos y otros suministros
 Objetos de laboratorio hechos de vidrio, cajas de Petri, tubos de ensayo, pipetas, frascos, etc. Analizadores múltiples secuenciales
 Analizadores clínicos automáticos
 Analizadores de dos canales
 Incubadoras
 Lavadores y esterilizadores
 Hornos de secado
 Centrifugadoras
 Microscopios
 Máquinas de rayos X (fijas y portátiles)
 Damajuanas y recipientes de vidrio con agua destilada
 Formaldehído, alcohol, parafina, etc.
 Productos químicos para revelar placas y películas
 Iluminadores de películas
 Archivos de películas
 Teteras y marmitas de la cocina
 Hornos
 Licuadoras
 Carritos para transportar las bandejas para los pacientes
 Lavavajillas
 Estantes para ollas
 Extinguidores de incendios
 Refrigeradoras
 Escritorios
 Bancos y sillas
 Artículos de limpieza
 Carritos de suministros, distribución, limpieza, recolección de basura, etc.

De las listas precedentes se infiere que es imposible adoptar medidas exhaustivas para mitigar los daños causados por movimientos sísmicos. Tratar de hacerlo cuando no haya terremotos interferiría en el funcionamiento normal del hospital. No trate de hacerlo todo. Cualquier medida que tome, por limitada que sea, ayudará a reducir los daños, las pérdidas y los traumatismos. Haga todo lo que pueda y continúe agregando medidas de seguridad con el tiempo y si el presupuesto se lo permite. Establezca prioridades y tome primero las medidas más importantes. Eso es lo importante: establecer prioridades, porque es imposible hacer todo. Si puede tomar únicamente las medidas más importantes, con eso solo habrá reducido la gravedad del desastre y mantendrá al hospital en funcionamiento.

A continuación figuran algunas características generales recomendables de ciertas categorías de aparatos y muebles de hospitales:

Aparatos y muebles con ruedas: (si es posible, escoja los que tengan las siguientes características)

Amplia separación entre las ruedas
 Centro de gravedad bajo
 Ruedas de gran diámetro
 Dispositivos para inmovilizar las cuatro ruedas con un solo control
 Sistema de freno automático cuando no esté en uso

Bibliotecas, escritorios, archivos y otros muebles con cajones y puertas: (si es posible, especifique las siguientes características)

Trabas en todos los cajones

Trabas en las puertas corredizas para evitar el deslizamiento y para evitar que se salgan de los carriles debido al movimiento vertical

Tableros para herramientas: (especifique las siguientes características)

Ganchos, soportes, etc., que sujeten bien las herramientas, los dispositivos o suministros almacenados

Muebles: (si es posible, especifique las siguientes características)

Amplia separación entre las patas

Centro de gravedad bajo

Cajones con trabas

Esquinas y bordes redondeados

Patas sólidas o reforzadas para reducir el movimiento de la parte superior, debido al cual los objetos que estén apoyados sobre los muebles podrían deslizarse y caer

Suministros: (especificar lo siguiente, si es posible)

En cajas de cartón u otros envases que permitan usar los suministros directamente de la caja, evitando la necesidad de colocar artículos sueltos en estantes

En cajas de cartón u otros envases que se puedan disponer de manera tal que se inmovilicen entre sí para que no se caigan

Extinguidores de incendios:

Soportes que impidan el movimiento vertical y lateral

Estanterías: Tenga en cuenta lo siguiente:

La posibilidad de usar los estantes invertidos, a fin de contar con rebordes para evitar la caída de objetos sin ningún costo adicional

La posibilidad de inclinar las estanterías hacia la pared a fin de evitar que los aparatos y suministros se caigan hacia adelante

La posibilidad de interconectar varias secciones de estanterías para aumentar la estabilidad lateral inherente.

La lista precedente no es exhaustiva. Su propósito es dar algunas ideas a fin de fomentar la observación y el sentido común en relación con lo que se deba hacer. Indudablemente, a usted se le ocurrirán muchas cosas que no se han mencionado aquí.

El problema de la evacuación del edificio después de un terremoto

Para que un hospital pueda funcionar bien y sin riesgos, es preciso que los pasillos y corredores no estén bloqueados. Los componentes no estructurales dañados son los que probablemente obstaculizarán la salida. Si durante un terremoto los ocupantes de un edificio deben correr bajo una lluvia de lámparas y paneles de cielo raso, esquivar muebles que se desplazan y se caen, andar a tientas por pasillos sin luz y por escaleras que se están desmoronando, y encontrarse a la salida o en la calle con otra lluvia de vidrios, mampostería, trozos de revestimiento, secciones de la fachada, tejas, parapetos, etc., entonces el edificio es inseguro, a pesar de que su estructura haya resistido y no se haya derrumbado.

Al evaluar los riesgos y hacer la lista de componentes no estructurales que podrían sufrir daños, hay que tener siempre en cuenta el problema de la evacuación del edificio. En los hospitales a veces hay poco espacio y se acostumbra colocar archivos y otros objetos en los pasillos. Estas prácticas podrían resultar en el bloqueo total de un pasillo después de un terremoto. Como los ascensores estarán averiados o no se podrán usar hasta que un técnico los inspeccione, hay que prestar especial atención a las escaleras y su estado después de un terremoto, y preguntarse si estarán en condiciones de ser utilizadas.

Con frecuencia, las puertas se traban en los marcos durante los terremotos. Ello no sólo impediría el paso a ciertas secciones esenciales, sino que también podría atrapar gente en recintos peligrosos. Después del

terremoto de Coalinga, California, la puerta al garage para la ambulancia se trabó y el vehículo no se pudo usar.

Las bóvedas y los portales a la entrada de los hospitales y salas de urgencia son especialmente propensos a derrumbarse, bloqueando la entrada principal y tal vez aplastando vehículos, como ocurrió durante el terremoto de 1971 en el hospital de la Veterans Administration en San Fernando.

Otro aspecto del problema de la evacuación es que, por lo general, ni las visitas ni los pacientes conocen la disposición del hospital, aun en circunstancias normales. Después de un terremoto, es probable que se corte la luz, que los ascensores no funcionen y que haya escombros en los pasillos. Las escaleras a menudo sufren grandes daños debido a su estructura vulnerable a la fuerza de los terremotos. En algunos casos, están adosadas al exterior del edificio y se pueden caer, atrapando a los ocupantes en los pisos altos, como ocurrió en el Olive View Hospital de San Fernando durante el terremoto de 1971.

Por consiguiente, hay que tener en cuenta los problemas de la evacuación del edificio después del terremoto y tomar medidas apropiadas para proteger los componentes no estructurales y, si es necesario, los estructurales, a fin de evitar esos problemas.

Gestión de programas para proteger los componentes no estructurales contra los daños ocasionados por terremotos

- Adapte el programa a la organización y la modalidad de funcionamiento del hospital donde usted trabaje.
- Recuerde que las medidas que se tomen se deberán mantener en vigor indefinidamente. Algunas medidas son apropiadas si se mantienen en vigor durante un corto periodo, pero son impracticables durante períodos prolongados.
- Ponga en práctica un programa de inspecciones periódicas y control de la calidad. Sólo tras un terremoto sabrá si ha tomado medidas apropiadas, pero las inspecciones son útiles.
- Los altos directivos de la institución deben participar en el programa a fin de establecer directrices y asignar recursos presupuestarios. Se debe informar a todos los empleados que el programa cuenta con el apoyo de los altos directivos de la institución.
- Sea exacto en la evaluación de los posibles daños y en las estimaciones, a fin de que se puedan determinar correctamente los costos y eliminar cualquier oposición al plan.
- Formule una estrategia general y elija las opciones más apropiadas para alcanzar los objetivos al menor costo posible.
- Tenga en cuenta la importancia de la coordinación entre departamentos. Cerciórese de que las modificaciones que introduzca no sean molestas para los médicos y enfermeras ni entorpezcan su labor.
- Comience por las medidas cuyo éxito sea garantizado. Aborde primero los aspectos visibles, factibles y más eficaces en función del costo

Referencias

A continuación figuran algunas fuentes excelentes de información detallada sobre medidas para mitigar el efecto de los terremotos en los componentes no estructurales de los hospitales. Estos textos tienen cientos de páginas, cuyos detalles técnicos es imposible incluir en este artículo.

1. Robert Reitherman. Reducing the Risks of Nonstructural Earthquake Damage: A Practical Guide. Bay Area Earthquake Preparedness Project, San Francisco, CA, USA 1986
2. Chris Arnold et al. Seismic Considerations for Health Care Facilities. FEMA No. 150, EHRS 35. Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C., USA. 1987.
3. Autor anónimo. Seismic Protection Provisions for Furniture, Equipment, and Supplies for Veterans Administration Hospitals Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C., USA. 1987.

4. Autor anónimo. Instructor Guide for Nonstructural Earthquake Mitigation for Hospitals and other Health Care Facilities. Curso ofrecido por el Emergency Management Institute, Emmitsburg, Maryland, USA. 1988.

5 Autor anónimo. Student Manual for Nonstructural Earthquake Mitigation for Hospitals and Other Health Care Facilities. Curso ofrecido por el Emergency Management Institute, Emmitsburg, Maryland, USA. 1988.

Criterios de diseño de líneas vitales de hospitales en zonas sísmicas

Dr. Rafael Torres Cabrejos

Resumen

En este trabajo se presenta criterios para el desarrollo de diseño sísmico de sistemas de abastecimientos de agua en lo referente a las obras de almacenamiento como son: los reservorios, las torres de control y cisternas, y las redes de tuberías de distribución de agua. Además se desarrollan criterios a ser considerados en el diseño de líneas de distribución de energía en lo referente a diseño de estructuras soporte y equipo usado en subestaciones.

Se presenta un estudio de diseños de reservorios considerando las acciones de las presiones hidrodinámicas generadas por el sismo y un modelo simplificado de la estructura soporte de los tanques los cuales son comúnmente usados para abastecer de agua a los hospitales en particular y la población en general.

Se presenta la formulación usada en tuberías para considerar las presiones hidrodinámicas y el efecto de la deformación de los suelos en el diseño.

En referencia a las estructuras en redes de distribución eléctrica se da recomendaciones para el uso del método probabilístico y el análisis estructural mediante el método de elementos finitos considerando la fragilidad de los materiales aislantes.

Introducción

Los hospitales proveen uno de los servicios vitales a la comunidad particularmente durante la emergencia causada por la ocurrencia de un sismo severo. En un hospital moderno el abastecimiento de agua, el de energía eléctrica y de comunicaciones es esencial para ofrecer un servicio adecuado; por estas razones se deben tomar varias precauciones a fin de que las líneas vitales de abastecimiento no sean interrumpidas en los momentos de funcionamiento crítico.

En este trabajo se tiene por objetivo proponer criterios que puedan luego contribuir a un conocimiento mayor del diseño sísmico de las líneas vitales. Las líneas vitales comprenden un campo muy amplio de la ingeniería Sismo-resistente que sería imposible ser tratado en toda su extensión para el caso de los hospitales; por este motivo se presentan criterios de diseño de:

- reservorios elevados
- sistemas de tuberías
- estructuras soporte y equipo de distribución de energía.

Introducción al diseño sísmico de estructuras de abastecimiento de agua potable

El agua potable es esencial, de necesidad vital para la vida del ser humano; sin ella, ningún individuo o grupo en comunidad puede sobrevivir.

La función de las estructuras de abastecimiento es simple, solamente asegurar la conducción del líquido contenido en cantidad y calidad adecuada para su uso por los habitantes, en oficinas y en fábricas.

Un sistema de abastecimiento de agua es una gigantesca continuidad de estructuras e instalaciones conectadas con un gran número de tuberías de varios diámetros y longitudes. En general, un sistema está compuesto de un enorme y complicado conjunto de obras, desde las obras de captación, almacenamiento, purificación y transporte del agua hasta los trabajos y tuberías de distribución y de uso por los consumidores.

Las estructuras usadas en un sistema de abastecimiento de agua son de varias clases, así unas son usadas en el transporte como las tuberías o reservorios, otras son mecánicas ó eléctricas como los sistemas de bombeo y otras instalaciones son de acción química como los pozos de purificación.

Aquí trataremos sobre los reservorios y las tuberías. El diseño sísmico de estructuras usadas en el abastecimiento de agua exige un vasto conocimiento de variadas técnicas del diseño y la construcción.

Reservorios de agua

Los reservorios de agua son estructuras importantes, en especial en poblaciones situadas en zonas de alta sismicidad. Estos reservorios pueden ser enterrados, apoyados en la superficie o tanques elevados. El daño en estas estructuras puede afectar seriamente la capacidad de abastecimiento de agua para apagar incendios o satisfacer las necesidades en instalaciones hospitalarias, centros de emergencia y de los pobladores. Además, el colapso de un tanque podría causar pérdidas de vidas y daños en la propiedad debido a la falla de la estructura y a la repentina salida del agua. Daños en los sistemas de desagües pueden causar similares efectos.

Daños observados

En el Perú, daños de poca consideración se reportaron en reservorios elevados durante el sismo de Ancash de 1970. Sin embargo, considerable daño en reservorios han ocurrido debido a sismos en el pasado en otros lugares (1).

Fallas típicas de falla ocurrieron en el sismo de Alaska (1964), desde el colapso total, pandeo de las coberturas, fallas en las conexiones y fisuras en las estructuras cáscaras de los tanques. En el sismo de San Fernando, California (1971), los daños presentados fueron en las uniones soldadas o remachadas de los tanques metálicos, los cuales tenían de uno a 42 años de construidas. Los modos más frecuentes de daño se debieron al pandeo de la cáscara en la base, desplazamiento horizontal en su cimentación y rotura de las tuberías de abasto y salida, en especial en las conexiones.

El sismo de 1979 en el área de Los Angeles, California causó daños en tres tanques elevados. En uno de ellos, con 100,000 galones de capacidad construidos en 1962, el sistema de arriostamiento diagonal sufrió daños considerables. En el Centro, un reservorio construido en los años 30 y habiendo por tanto soportado el terremoto de 1940, experimentó graves alargamientos en las barras diagonales del nivel superior pandeo en los puntales y falla en los pernos de anclaje en las planchas de apoyo.

Al Sur de Brawley, un tanque metálico de 100,000 galones, construido en 1961, colapsó. Las fallas parecen haberse iniciado por combinación de pandeo de los arriostres horizontales, rasgaduras en las planchas del tanque de sus columnas y falla de las barras en los toques. En (2), se describe los mecanismos de colapso en tanques metálicos ocurridos en el sismo de 1952, en Kern County, California.

Los reservorios de agua constituyen parte de un sistema vital de abastecimiento y deben continuar funcionando después de la ocurrencia de un sismo severo. Debe por tanto, considerarse, en el planeamiento y diseño de un sistema de almacenamiento de agua, adecuadas medidas tales como las siguientes para mitigar los efectos de los sismos:

1. Localizar las estructuras en lo posible en las cercanías de los lugares donde el agua será usada, para reducir la posibilidad de pérdidas entre los tanques y el sistema de distribución.
2. Construir las instalaciones de almacenamiento fuera de zonas de deformación asociadas a fallas activas y lejos de los lugares de posible influencia de los deslizamientos de taludes o caídas de rocas.
3. Localizar las estructuras fuera de las áreas de suelos inestables tales como rellenos o áreas con vacíos subterráneos naturales o construidas por el hombre, zonas de alta posibilidad de licuefacción o de suelos colapsables. La geología de la zona debe ser estudiada a fin de no construir las estructuras en zonas de fallas o de alforamiento rocosas falladas.
4. Proveer al sistema con adecuadas zonas de drenaje y de emergencia en caso de derrame.

5. Diseñar los tanques con un sistema de detección de pérdidas o fugas de agua, en especial en estructuras enterradas para evitar fallas en las cimentaciones por saturación en los suelos.
6. Proteger las estructuras metálicas de la corrosión.
7. Proyectar un sistema adicional de bombeo para casos de emergencia para mantener el abastecimiento con la presión requerida en las tuberías cuando ocurran incendios causados por los sismos.

Comportamiento sísmico de un reservorio y criterios de diseño

Los reservorios elevados son generalmente recipientes de forma cilíndrica o elipsoidal y están apoyados sobre una estructura la parte aperturada y arriostada. La estructura es comúnmente construida de acero, en el Perú la mayoría de reservorios son de concreto armado o postensado. Los reservorios elevados son estructuras que soportan gran peso en la parte superior, es decir que una gran porción de la carga está concentrada a gran altura en relación a su base. Por ésta, los elementos críticos de la estructura los constituyen las columnas y las vigas de amarre y diagonales a través de los cuales las cargas son transmitidas a la cimentación. En el Perú se usa como estructura soporte de los tanques, fustes cilíndricos de concreto armado. Los reservorios podrían fallar también por ruptura del tanque o falta de cimentación, sin embargo el modo de falla más común es la ruptura de la estructura soporte.

El recipiente del agua en sí se comporta como un cuerpo rígido fijado al tope de la estructura–soporte y tiene por lo general una alta frecuencia de vibración. Esto hace que no exista un apreciable movimiento relativo del tanque respecto de la estructura portante. Por tanto el tanque en si no está sujeto a grandes esfuerzos inducidos por la vibración de la estructura soporte. Sin embargo, sus paredes y fondo deben ser diseñadas para soportar, además de las presiones hidroestáticas, las causadas por el movimiento "impulsivo" y "convectivo" del agua contenida. Estas presiones hidrodinámicas son generadas en el agua por el movimiento vibratorio de la estructura soporte.

Las presiones impulsivas son causadas por el impacto del agua contra las paredes del tanque, cuando este es acelerado por el movimiento sísmico. Las presiones convectivas, en cambio, son debidas a las oscilaciones del líquido contenido. En la mayoría de los casos, las magnitudes de estas presiones son una fracción de las presiones hidrostáticas para las cuales el tanque es, en general, diseñado. Por estas razones, no existe una exigencia para tomar precauciones especiales en el diseño de las paredes y fondo de la estructura del recipiente por causa de las presiones hidrodinámicas originadas por el sismo, aunque su determinación es importante.

Para el análisis estructural de un reservorio y estructuras similares en un sistema de abastecimiento de agua, existen algunos métodos de cálculo, los cuales pueden resumirse en los siguientes, de acuerdo a (3) estos pueden aplicarse y verificarse los resultados por el 4.

1. Método del coeficiente sísmico.
2. Método del coeficiente sísmico modificado.
3. Método de la deformación sísmica.
4. Análisis dinámico.

• *El método del coeficiente sísmico* es recomendable aplicarlo en estructuras de reservorios relativamente rígida, con período antural igual o menor de 0.5 segs. La fuerza inercial causada por el sismo puede ser obtenido multiplicando el propio peso y la carga del agua por el coeficiente de diseño. Este coeficiente de diseño es el producto de cuatro factores, el primero es el coeficiente de diseño estándar para fuerzas horizontales que se fija en 0.2 o mayor. El segundo es el coeficiente correctivo que depende de las condiciones del suelo, este varía entre 0.9 para suelos del terciario hasta 1.2 para depósitos de suelos aluviales realtivamente sueltos. El tercer factor es determinado por los datos de la sismicidad regional. El último es fijado en 1, pero dependiendo del material de la estructura y método de construcción y experiencias pasadas puede reducirse a 0.5. En todo caso el coeficiente sísmico de diseño no debe ser menor de 0.1 y el coeficiente para fuerzas verticales será evaluado como 0.5 veces el coeficiente sísmico para fuerzas horizontales.

• *El método del coeficiente sísmico modificado* es aplicado en el cálculo de reservorios o similares de relativa flexibilidad, con período natural de 0.5 segs. o mayor. La fuerza inercial causada por el sismo es evaluado multiplicando el peso propio y el peso de agua por el coeficiente sísmico de diseño horizontal.

Este coeficiente de la fuerza horizontal, K_h , es obtenido en forma análoga que en el caso anterior, excepto por los dos últimos factores, C_4 y C_5 . Así, K_h , se obtiene por:

$$K_h = C_1 C_2 C_4 C_5 K_0.$$

Aquí, K_0 , C_1 y C_2 : ya se han definido anteriormente. El factor de corrección C , es decidido en base a la clase de suelo donde se proyecta la construcción y el período de vibración de la estructura. El factor C_5 es fijado igual a 1, pero puede modificarse considerando la resistencia última y la aceleración límite del sismo del lugar.

- La aplicación y cálculo del método de la deformación sísmica es recomendada para estructuras de reservorios, tuberías y otras similares que se encuentran enterradas o cuando el comportamiento es principalmente gobernado por el suelo que las rodea. Este, durante la ocurrencia de un terremoto, sufre desplazamientos, los cuales ocasionan deformaciones en el suelo y en base a estos se deben determinar las fuerzas en las secciones transversales y los esfuerzos generados en las estructuras.
- El método de análisis dinámico considera uno de los dos siguientes procesos:
 - el uso del espectro de respuesta promedio.
 - el uso de records de vibración sísmico del suelo.

El análisis dinámico presupone el conocimiento de las características del movimiento sísmico del suelo donde se proyecta la construcción, así como características de la actividad sísmica de una gran área de terreno comparativamente mucho mayor y que incluye el lugar del proyecto.

Las ondas sísmicas usadas en este método deben ser las obtenidos en sismos severos ocurridos en la zona. Los valores espectrales son los obtenidos en base a los records de los sismos en la zona de estudio.

Dependiendo del material usado en el diseño de un reservorio elevado existen dos sistemas estructurales. En el caso de los tanques metálicos los elementos están esencialmente sujetos a fuerzas axiales siendo la carga vertical soportada por las columnas a compresión y las fuerzas horizontales son resistidas por los miembros diagonales sujetos a tracción.

En el caso de reservorios de concreto armado difundido en el Perú y países latinos debido principalmente a su menor costo, las columnas y los amarres (vigas horizontales) actúan como una estructura aporticada tipo Vierendeel transmitiendo cargas axiales, por flexión, corte y torsión. Las columnas están principalmente sujetas compresión debido a las cargas verticales. Los arriostres horizontales están sujetas momentos, tanques y fuerzas cortantes causadas por las fuerzas sísmicas horizontales. Las columnas de un reservorio de concreto armado pueden ser asumidas que se comportan como un sistema de resortes en paralelo entre dos niveles de arriostres sucesivos, pero además cada columna en si misma se comporta como resortes verticales en serie y conectados en los niveles de arriostre.

Debido a que los reservorios elevados sostienen su mayor peso en la parte superior, el sistema de soporte podría ser aproximado a un sistema de un grado de libertad sin perder exactitud apreciable. Una parte del peso de la estructura soporte (1/3) puede ser considerada concentrada en el tope y las columnas modeladas como resortes sin masa para simplificar el análisis.

Los reservorios pueden fallar debido a un diseño de su cimentación. Los cimientos están sujetos a cargas verticales del peso de la estructura y momentos generados por las fuerzas horizontales. Para lograr una adecuada fundación es recomendable conectar las zapatas con vigas. Otras soluciones constituyen el diseño de plateas o anillos de cimentación. Si el suelo es poco resistente, la platea puede apoyarse sobre pilotes para evitar asentamientos diferenciales bajo las columnas. El diseño del cimiento depende de la naturaleza del suelo, la altura y el tamaño de la torre del reservorio.

Un aspecto importante en el diseño es decidir el estado de cargas o esfuerzos que se considere seguro para la superposición con las fuerzas sísmicas. La acción del viento se acepta generalmente que no ocurre simultáneamente con el sismo y por tanto una de estas acciones puede ser considerada en el diseño por separado. En tanques elevados, el viento puede ser la acción que controla el diseño.

Un criterio sería diseñar los reservorios para que bajo el efecto de un sismo de moderadas violencia, los esfuerzos generados se mantengan en el estado elástico. De otro lado, en el diseño se consideraría que bajo el efecto de un sismo severo, el cual se espera ocurra una sola vez en la existencia de la obra, el sistema

estructural genera esfuerzos que alcancen un rango plástico. Bajo estos conceptos, es recomendable proveer de elementos diagonales de amarre en el reservorio de concreto.

Un procedimiento de diseño es el siguiente:

Durante el estado elástico, los amarres diagonales son estirados relativamente poco debido a las pequeñas deformaciones, y las fuerzas horizontales podrían considerarse que son absorbidas por las columnas y las vigas de amarre horizontal desarrollando momentos.

En el estado plástico, cuando las deformaciones son grandes, las fuerzas horizontales se asumen ser soportadas por los elementos diagonales en tracción. Por esto, el diseño de las conexiones de columnas y diagonales debe ser capaz de desarrollar rotaciones plásticas y permitir grandes deformaciones en las diagonales. Es recomendable que los refuerzos en columnas y vigas debe ser en espiral y confirmar adecuadamente, en una distancia de un cuarto de su longitud cada extremo, para asegurar la fluencia del refuerzo desarrollando su ductilidad.

En las normas de diseño del Perú (4), se establece que la fuerza horizontal o cortante total en la base es:

$$H = \frac{ZUSC}{Rd} P$$

Donde Z, U, S representan los factores de zonificación, de importancia de la estructura y de condición del suelo respectivamente. El valor de P es obtenido de las cargas para el caso de tanques es la adición del peso total de la estructura y del agua. El valor de C en el cociente de la aceleración espectral y de la gravedad, $C = Sa/g$. Finalmente Rd es representativo de la ductilidad global de la estructura.

En el diseño elástico se obtendrá la fuerza horizontal sísmica, H en base a esta formulación, pero en el estado plástico, cuando se admite que el esfuerzo está en fluencia y que las diagonales absorberán la energía cinética, $0.5 MSv^2$,

donde:
$$S_v = \frac{S_A \cdot T}{2\pi}$$

con T el período natural de vibración de la estructura y Sv la velocidad espectral en el rango plástico; en este estado la fuerza sísmica es: $H = ZUSC * P$.

Para el diseño de la cimentación debe verificarse las condiciones críticas de volteo y amarrarse las columnas con vigas anulares o plataforma de cimentación de acuerdo a las condiciones del suelo.

Presiones Hidrodinámicas

El movimiento vibratorio genera presiones impulsivas y convectivas en el fluido. Las presiones impulsivas están asociadas con las fuerzas inerciales producidas por movimientos impulsivos de las paredes del recipiente y resulta proporcional a la aceleración de las paredes del tanque. Las presiones convectivas son producidas por oscilaciones del agua y por consiguiente son consecuencia de las presiones impulsivas.

Varios investigadores (5, 6, 7) han tratado las vibraciones de un líquido en un tanque existiendo un consumo, asumiendo la incompresibilidad del agua y considerar que:

- Las presiones impulsivas sean simuladas por una masa M_i , rígida fijada a las paredes del recipiente y las presiones convectivas por una masa M_c , montado sobre un resorte conectado al tanque. La formulación para obtener las presiones hidrodinámicas por el método desarrollado en (5) para recipientes cilíndricos y rectangulares es como sigue:

Reservorio Cilíndrico	Reservorio Rectangular
Presión Impulsiva	
1. $M_i = M (\tan H B)$	$M_i = M (\tan h B) / B$
2. $B = 1.73 R/H$	$B = 1.73 L/H$
3. $h_i = \frac{H}{8} \left(4 \frac{M}{M_i} - 1 \right)$	$h_i = \frac{H}{8} \left(4 \frac{M}{M_i} - 1 \right)$

M = Mi cuando solo presiones sobre las paredes son consideradas.	
M = M cuando presiones en el fondo también son consideradas.	
4. $P_i = a_i M_i$	$P_i = a_i M_i$
Presión Convectiva	
5. $M_c = 0.585 (M \tan h B)/B$	$M_c = 5/6 (M \tan h B)/B$
6. $B = 1.84 H/R$	$B = 1.58 H/L$
7. $h_c = H \left(1 - \frac{\text{Cosh} B - C}{B \text{Sen} h B} \right)$	$h_c = H \left(1 - \frac{\text{Cosh} B - C}{B \text{Sen} H B} \right)$
c = 1.0, cuando solo se consideran presiones en las paredes.	
c = 2.0, cuando también se consideren presiones en el fondo.	
8. $P^2 = \frac{g}{H} B \tanh B$	$P^2 = \frac{g}{H} B \tanh B$
9. $\Theta = \frac{A_1}{1.2H} B \tanh B$	$\Theta = \frac{A_1}{H} B \tanh B$
10. $P_c = 1.2 M_c g \Theta \text{sen. pt}$	$P_c = M_c g \Theta \text{sen. pt}$
11. $d_m = \frac{0.408R}{\left(\frac{g}{p^2 \Theta} R - 1 \right) \tanh B}$	$d_m = \frac{0.527L}{\left(\frac{g}{p^2 \Theta R} - 1 \right) \tanh B}$

En el caso de presiones impulsivas en tanques con H/L, 6, H/R 1.5, asumir que el agua debajo de 1.5 L (6 1.5 R) no influye. En las expresiones dadas, M, H, L, R son la masa total, profundidad del agua, mitad del ancho y radio del tanque. Al, al, p, hi y hc representan el máximo desplazamiento, aceleración impulsiva del tanque, la frecuencia del agua y las alturas de las presiones impulsiva y conectiva respectivamente. Estas presiones son Pi y Pc. Finalmente, dm es la amplitud de la ola de agua, debe considerarse para evitar el derrame y funcionamiento del sistema sanitario.

En el análisis modal desarrollado en (8,9) para reservorios con fuste cilíndrico como soporte, se concluye que el primer modo corresponde a la masa móvil de agua y a un pequeño desplazamiento del agua. Los otros modos corresponden a un movimiento de la estructura similar al del reservorio vacío. El período de vibración del segundo modo es similar al primer período correspondiente a un reservorio vacío. En un estudio de 360 reservorios de diversos tamaños se presenta una formulación simplificada del período.

Tuberías de Agua

Antecedentes de Daño por Efecto Sísmico

Los sismos ocurridos en el Perú en las últimas décadas, 1966 en Huacho, 1970 en Ancash y 1974 en Lima han causado extensos daños en los sistemas de tuberías de agua y desagüe La ciudad de Chimbote se vió privada de agua por largo tiempo causando su falta o contaminación innumerables pérdidas de vidas.

En (10) se refiere que el terremoto de San Francisco en 1906 causó la casi total destrucción del sistema. Practicamente, no hubo agua suficiente para combatir los incendios generados inmediatamente después del sismo, pues además de la rotura de las líneas de agua, las tuberías del gas se rompieron extendiéndose rápidamente las fuentes del incendio. Se perdieron casi 490 manzanas con un valor entonces de 500 millones de dólares y las pérdidas de hogares de más de 200,000 personas. Un total de 11 Km² fueron consumidos y el incendio duró sin poder apagarse varios días. Extensos daños, aunque sin ser catastróficos, causó el sismo de San Fernando en 1971 en las tuberías de agua y desagüe, considerable deterioro en las instalaciones de almacenajes, plantas de bombeo, contaminación del agua por las aguas servidas. Se puede afirmar que los sismos han causado graves daños en los sistemas de tuberías sobretodo cuando estas son instaladas en suelos sueltos y húmedos.

En el Japón, se refiere en (11) los graves daños que el terremoto de Niigata en 1964 causó en las redes de agua. En especial, en las zonas donde ocurrió la licuefacción de los suelos, las tuberías de acero se rompieron en gran extensión: en la rotura se presentó por pandeo y flexión deslizando en las conexiones. Actualmente, se han instalado estaciones de observación del comportamiento sísmico de los sistemas de abastecimiento de agua diseñados considerando los efectos y experiencias de sismos pasados. Estas son

particularmente importantes en Hachinohe.

Los daños en sistemas de abastecimiento de agua han tenido tres principales efectos. Primero, en el servicio de agua potable en hogares y esencialmente en hospitales, centros de operaciones de emergencias, policía y otros. Segundo, en el servicio de bomberos para combatir incendios y tercero, para abastecer las industrias, las alimentarias principalmente.

En el terremoto de México de 1985, causó intenso daño en las tuberías enterradas, los daños en los desagües no fueron determinados. Los daños en las tuberías parecen deberse a la propagación de las ondas, las fallas más comunes se presentaron en las conexiones.

Procedimiento de Diseño Sísmico de Tuberías

Durante la ocurrencia de un sismo severo, el suelo experimenta de formaciones causadas por las ondas sísmicas y por tanto las tuberías enterradas pueden pandear o sufrir roturas.

Las observaciones, experiencias y análisis del comportamiento de tuberías durante sismos indican que:

- a) Las tuberías enterradas tienen una rigidez mayor pero densidad menor que la del suelo, por tanto el comportamiento de una tubería enterrada durante un sismo es mayormente confinada por el suelo que la rodea y forzada a moverse de acuerdo al movimiento de este.
- b) La deformación longitudinal de una tubería es ligeramente mayor que la de su fricción transversal durante el movimiento sísmico.

Por estas razones para el análisis sísmico de un sistema debe tenerse en cuenta las deformaciones del suelo principalmente y dar a la tubería la expansión y contracción libres y la flexibilidad suficiente para mitigar la fuerza sísmica.

Las tuberías de acero son fuertes y flexibles en sus juntas y permiten la expansión y contracción así que pueden generalmente adecuarse fácilmente a la deformación del suelo. Además muchas poseen la capacidad de absorber deslizamientos lo suficientemente grandes que puedan ocurrir en suelos blandos.

Las tuberías de concreto en general pueden absorber sin uniones adecuadamente diseñadas, las deformaciones de los suelos causadas por sismos severos. El método de diseño para tuberías llamado de la deformación sísmica, considera un máximo desplazamiento cuya amplitud es dada por:

$$u_s = \frac{TC^2}{4^2} A \cos \frac{x}{2H}$$

aquí, A es la aceleración sísmica de diseño del suelo, x la profundidad del centro de la tubería, H es el espesor del estrato, TC representa el periodo natural predominante del suelo obtenido generalmente por la medida de microtemblores. La amplitud máxima del desplazamiento del suelo es estimada asumiendo que el estrato inferior le transmite la propagación de ondas de corte desde suelo firme a rocoso.

La propagación de las ondas sísmicas de corte son asumidas en forma sinusoidal con la velocidad de corte en sentido oblicuo a la tubería. Estas ondas causan deformación relativa del suelo a lo largo de la tubería la cual se transmite a través de un modelo de resortes elásticos entre la tubería y el suelo. Esta tubería permite calcular los esfuerzos y las deformaciones en la tubería modelándola como una viga ó barra sobre un medio elástico.

En (11) se da presente la formulación de los esfuerzos, los cuales son dados por:

$$S_L = C_1 K_1 \frac{U_h}{L} E$$

$$S_B = C_2 K_2 \frac{2^2 \cdot D \cdot Dh}{L^2} E$$

$$S_x = n \cdot S_L^2 + S_B^2$$

donde S_L Y S_B representan el esfuerzo axial causado por la deformación axial y flexión durante el sismo (Kg / cm^2)

S_x el esfuerzo combinado en la tubería, O es el diámetro externo de la tubería y n constante del módulo de onda = 3.12.

C_1 , C_2 , K_1 , K_2 , y L representan factores dados por:

$$C_1 = \frac{I}{I + \left(\frac{2}{m_1 L^1}\right)^2}$$

$$C_2 = \frac{I}{I + \left(\frac{2}{m_2 L}\right)^4}$$

$$m_1 = \frac{K_{g1}}{E \cdot A_0} \text{ (I / cm)}$$

$$m_2 = 4 \frac{K_{g2}}{E \cdot I} \text{ (I / cm)}$$

Aquí L es la longitud de onda, L^1 es $2L$, I es momento de inercia de la tubería. A_0 es el área de la sección de la tubería, K_{g1} y K_{g2} módulos de rigidez del suelo m densidad del suelo húmedo alrededor de la tubería.

El método de la deformación sísmica presupone que la superficie del suelo en cada estrado es uniforme, que la onda sísmica se propaga hacia la superficie con un ángulo de inclinación y que allí causa diferencia de fases de la onda entre dos puntos arbitrarios distantes en la tubería. Este es el fundamento que origina la deformación del suelo y de las deformaciones unitarias inducidas en la tubería por el sismo.

Por consiguiente, el método de la deformación sísmica no es aplicable en casos en que la superficie de contacto de los estratos no es uniforme en forma y suelo o que la tubería no es recta. En estos casos, el método de la respuesta dinámica es el indicado para ser usado. En este método de análisis, el suelo circundante a la tubería es representado por un sistema discreto de resortes.

Presión hidrodinámica por efecto sísmico en tubería

Un sistema de tuberías tiene cambios de sección, conexiones y accesorios de diversas formas y tamaños. Las porciones rectas rara vez experimentan presiones por efecto sísmico, las conexiones y cambios sí. Para determinar las presiones en las más usados cambios se presentan la formulación siguiente:

a) Presión hidrodinámica en una extremo cerrado o final, en caso de sismo:

$$S_m = \frac{K_s \cdot T_G}{2\pi} \frac{gKw}{I + 2 \frac{Kv}{eE}}$$

Aquí:

S_m es la presión máxima (T/m^2), K_s es el coeficiente sísmico (S_a/g), T_G es el periodo predominante del suelo, K es el módulo del agua, w es la densidad = 1 del agua, y v , e y E son el radio, espesor y módulo de la tubería.

b) Presión hidrodinámica en un cambio o inclinación de la tubería.

$$S_m^I = S_m \sin \frac{\Theta}{2} \sin \left(\Theta_2 + \frac{\Theta}{2} \right)$$

c) Presión hidrodinámica en una Te:

$$S_m^{II} = \frac{A_2 / AI}{2 + \frac{A_2}{AI}} S_m$$

d) Presión hidrodinámica en una reducción de sección

$$S_m^{III} = \frac{I - \frac{A_2}{AI}}{I + \frac{A_2}{AI}} S_m$$

Para el diseño de las conexiones de expansión – contracción es necesario considerar en el diseño la separación dada por:

$$e = e^I I, y, e^I = \frac{T_g \cdot A}{2\pi V_s}$$

donde: T_g es el periodo del suelo, A la aceleración de diseño y V_s la velocidad de la onda de corte. Siendo I la longitud entre conexiones de la tubería.

Criterios de diseño sísmico de un sistema de distribución de energía eléctrica

Introducción

Los daños ocasionados por los últimos sismos en las redes de distribución y transmisión de energía han puesto en evidencia la creciente necesidad de diseñar las estructuras usadas y el equipo eléctrico más resistentes a las acciones de los sismos severos, debido a la importancia de asegurar la continua operación del sistema eléctrico durante e inmediatamente después de la ocurrencia de un terremoto.

En el Perú no se cuenta con normas de diseño para estructuras usadas en la distribución de energía.

Efectos de los Sismos en Sistemas de Energía

En las últimas décadas la ocurrencia de sismos han ocasionado graves daños en los sistemas eléctricos; en el sismo de San Fernando en 1971 colapsaron múltiples estructuras que soportaban equipo eléctrico, en (12) se requiere la falla de líneas de transmisión de alto voltaje, el volteo de grandes transformadores, el colapso de grandes capacitadores, la destrucción de sistemas de corto circuitos de aire comprimido, equipos de pararrayos, equipos de seguridad y otros que conformaban parte importante de las sub-estaciones que distribuían la energía eléctrica al área en mención incluyendo la ciudad de Los Angeles.

En (13) se reporta que en el sismo de Morgan Hill, California de 1984, ocurrió considerable daño en cortos circuitos y en equipo eléctrico. Quizás el daño más serio para las consecuencias que produjo fué el colapso de los apoyos de las unidades de generación de energía en el Olive View Hospital para veteranos. Esto condujo a que los hospitales deben tener sus instalaciones de líneas vitales con capacidad sismorresistente.

Aspectos del Diseño Sísmico

Para el diseño de un sistema de energía es, necesario definir el espectro a ser usado. En principio, es necesario efectuar un estudio de la sismicidad y determinar los niveles de riesgo sísmico en la zona, y estudiar la atenuación de los sismos que se generan y afectan el lugar elegido para la construcción de un sistema de distribución de energía. Estos conceptos suele resumirse como sigue:

- a. Estudiar la historia sísmica de la región considerando las estructuras tectónicas para determinar el sismo de máxima magnitud que puede racionalmente ser esperado que ocurra en cada área mediante un estudio estadístico de las diferentes magnitudes.
- b. Estudiar la atenuación de los sismos desde las fallas que la generan hasta los lugares de interés trazando las curvas isosistas; este estudio determina el mapa de regionalización para máximas intensidades.
- c. Determinar los espectros de respuesta normalizada para cada zona en base a los records de aceleraciones de sismos ocurridos para cada perfil de suelos.
- d. Estudiar las relaciones básicas de probabilidad de la ocurrencia de grandes sismos.

Conceptos de diseño de equipo eléctrico y estructura soporte

En la distribución de energía eléctrica a menudo se usa estructuras para apoyo o soporte de equipo eléctrico. La práctica corriente del diseño establece seguir las normas usuales de diseño de estructuras metálicas de conformidad con los códigos vigentes para un nivel de aceleración en concordancia con los espectros de respuesta correspondiente al nivel de la instalación de equipo tanto en el suelo como en las edificaciones. En las construcciones hospitalarias es práctica la construcción de una subestación adyacente al hospital, desde la cual se distribuye la energía eléctrica.

Sin embargo, la conducción de energía eléctrica exige un aislamiento con equipo de material frágil como la porcelana o cerámica. Estas partes estructurales tienen propiedades mecánicas diferentes de los materiales metálicos. Las instalaciones modernas requieren el uso de grandes voltajes debido a la creciente necesidad, lo que hace que éstas frágiles estructuras soporten equipo pesado, resultando su diseño inadecuado debido al incremento de su tamaño. El carácter de estas estructuras compuestas de varios materiales dúctiles y frágiles hacen que su diseño sea controlado por la resistencia de los materiales frágiles.

Para el diseño de estas estructuras es necesario desarrollar un modelo estadístico (14) considerando los esfuerzos extremos o críticos en el material frágil. Mediante este método se obtiene para el nivel de aceleración dada por los espectros de respuesta, la probabilidad de falla en el material de porcelana aislante la cual deberá ser de un nivel confiabilidad establecido para el diseño.

Complejidad del análisis sísmico de las líneas tanto en las redes principales de agua ó energía, así como de las de estructuras de tratamiento, almacenamiento de agua o de generación, distribución y transmisión de energía, plantea la necesidad de realizar una urgente tarea de investigación, sobre todo de medición de experiencias en las estructuras en el laboratorio y en el campo y de manera especial en las instalaciones hospitalarias.

Referencias

1. Le Val Lund, "Water Storage Facilities", Abatement of Seismic Hazard Lifelines: Proceedings of a workshop on Development of An Action Plan, – BSSC – July 1987, USA.
2. Steinbrugge, Karl V., "Earthquake Damage and Structural Performance in the United States" – Earthquake Engineering; – Practice Hall, Inc. 1970, USA.
3. Earthquake Engineering Committee, The Japon Society of Civil Engineers. "Earthquake Resistant Design for Civil Engineers Structures in Japan" – 1988.
4. Normas de Diseño Sismo-resistente, – RNCC-77, OIN, Ministerio de Vivienda y Construcción, Lima-Perú.
5. Housner, George W., "The Dynamic Behavior of Water Tanks", Bull, Seismolo Sec. Am. 53(2), 381-87, 1963, USA.
6. Newmark, N.M. and Rosenblueth, E., "Fundamentals of Earthquake Engineering"; pags. 197-200; Prentice-Hall, Inc., 1971, USA.
7. Toda, J.; "Earthquake Resistant Design of Waterworks Structures"; IISEE lectura note, BRI, Min. of Construcción; Japan.

8. Rivera, Julio, y Torres C., Rafael; "Comportamiento Hidrodinámico de Reservorios Elevados". Ponencia, V Congreso Nacional de Ingeniería Civil; Nor. 1984, Tacna, Perú.
9. Rivera F., Julio "Método Estático Simplificado para Análisis Sísmico de Reservorios Elevados de Concreto Armado con Estructura Cilíndrica de Soporte"; Ponencias V Congreso Nacional de Ingeniería Civil Nov. 1984, Tacna, Perú.
10. Trautmann, Charles H., "Seismic Risk to Water and Sewage Lifelines Systems"; Proceedings of a workshop on Development of An Action; July 1987, USA.
11. "Earthquake – Proof Design of Buried Pipelines". Kubota, October, 1981, Japan.
12. Steinhardt, Otto W.; "On-going Activities in Abatement of Seismic Hazard in Electric power Systems". Proceedings of or workshop on Development on Action Plan –, July 1987; USA.
13. Schiff, Anshel J. and Yao, James T.P.; "Response of Power Systems to the San Fernando Valley Earthquake of 9 February 1971"; Purdue University, Enero 1972, USA.
14. Schiff, Anshel J., Torres – Cabrejos, Rafael y Yao, James T.P.; – "Evaluating the Seismic Reliability of Electrical Equipment containing Ceramic Structural members".; The Journal of the International Association of Earthquake Engineering, Vol. 77, No 1 – En–Feb., 1979, USA.

Consideraciones sobre seguridad en el diseño sísmico de hospitales

Dr. Yuji Ishiyama

Resumen

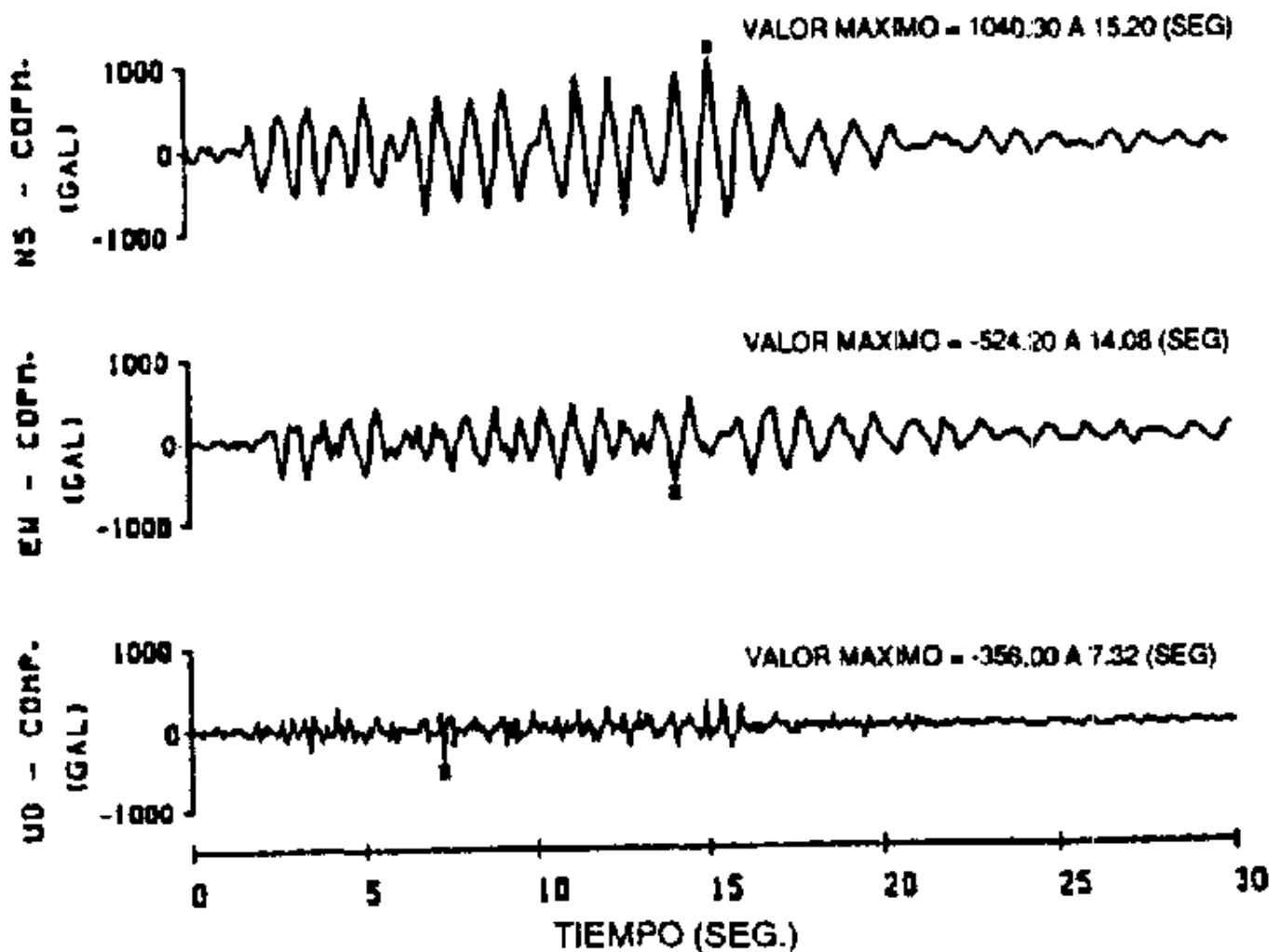
El objetivo de este artículo es presentar consideraciones para proteger el funcionamiento de hospitales durante y después de terremotos. Para facilitar el entendimiento de estas consideraciones, son explicados el comportamiento de edificios y de cuerpos rígidos durante sismos. Finalmente, consideraciones sobre edificios de hospitales y equipos médicos son recopilados, es decir, selección del lugar, configuración estructural del edificio, resistencia, rigidez y ductilidad adecuadas de los elementos estructurales y sus conexiones, ventajas del sótano, conexiones de tuberías al edificio, localización de los ambientes importantes, prevención al volteo de cuerpos, fijación de las ruedas de muebles y adopción de bases de aislamiento.

Introducción

Para proteger el funcionamiento de un hospital durante y después de terremotos, la resistencia sísmica de edificios para hospitales y equipos médicos son esenciales. Sin embargo, los pacientes y los ocupantes deben ser protegidos contra daños y evacuaciones obstruidas debido al volteo o deslizamiento de muebles o equipos. Este artículo presenta el comportamiento de edificios y cuerpos rígidos durante terremotos así como consideraciones para proteger el funcionamiento de hospitales en caso de sismos.

Comportamiento de edificios en terremotos

Cuando un edificio está sujeto a movimientos sísmicos, éste vibra con el período natural del edificio. La Figura 1 indica que el 90 piso experimenta una aceleración cuatro veces mayor que la del nivel del terreno en la dirección N–S, 2.6 veces mayor en la dirección E–O y 2.3 veces mayor en la dirección arriba–abajo.



a. Récord en el noveno piso

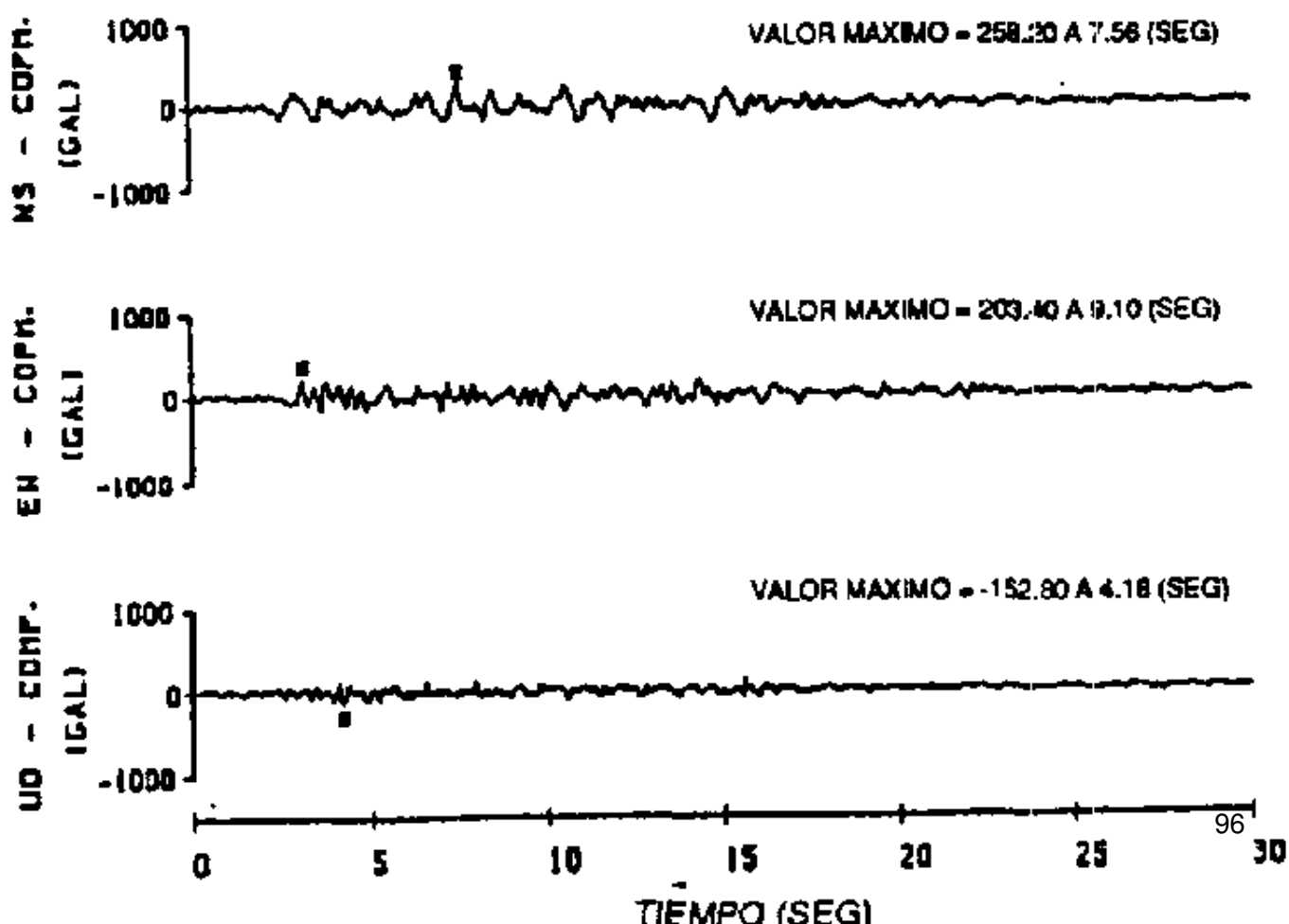


Figura 1. Registros de movimientos sísmicos terremoto de Miyagiken-oki, 12 de junio 1978.

En algunos casos la parte media del edificio puede tener menores vibraciones que las otras partes (ver Figura 2C).

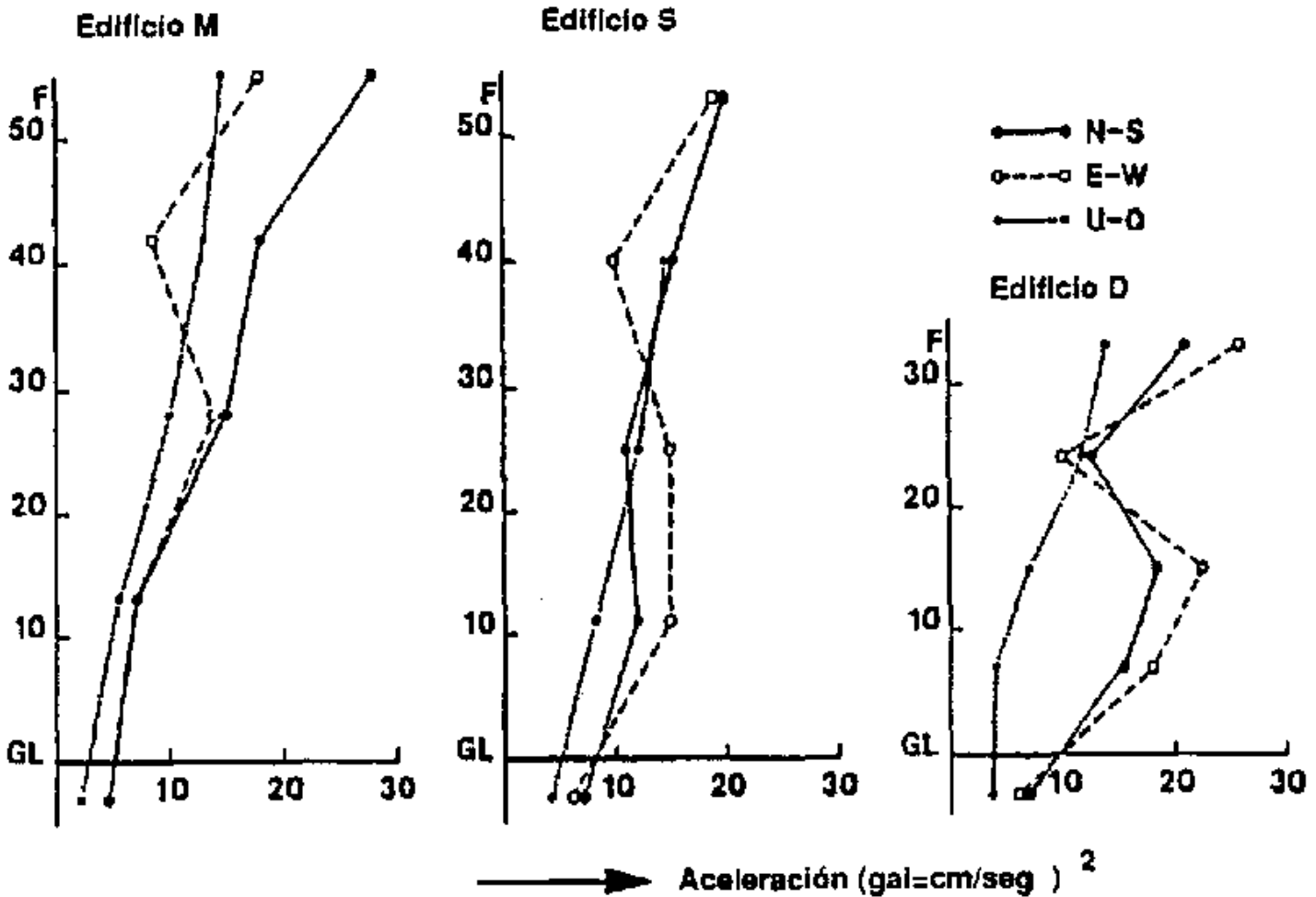


Figura 2. Distribución de máximas aceleraciones en edificios terremoto de Izuoshima-kikai 14 de enero 1978

La magnitud de la vibración depende de la magnitud del sismo, distancia del epicentro, condiciones de suelo, etc.

La magnitud M indica el tamaño del sismo. Una fórmula empírica que da una relación entre la energía liberada E (ergios) y la magnitud M es:

$$\log E = 11.8 + 1.5 M$$

Se debe notar que cada unidad de incremento en la magnitud origina 32 veces el incremento de la energía y dos unidades de crecimiento en la magnitud origina 1000 veces el incremento de la energía. Esta relación muestra que miles de pequeños sismos de $M < 6$ tienen que ocurrir para liberar la energía de un sismo de $M=8$.

La severidad de los movimientos sísmicos observada en algún punto se llama *intensidad* del sismo. En Japón, la escala que usa la agencia meteorológica del Japón (JMA) tiene 8 puntos de rango desde O (no sensación) hasta VII (desastroso) (ver Tabla 1). En los Estados Unidos, y en muchos otros países, se usa la escala de Mercalli Modificada, la cual tiene un rango desde I (no sentido) hasta XII (total destrucción) (ver Tabla 2). Desde que la escala de intensidad no es un único valor, podemos poner atención a qué escala es usada para estimar la real intensidad en el lugar.

Tabla 1. Escala de la Agencia Meteorológica de Japón (JMA)

	Escala JMA	Descripción	Max. aceleración del terreno (gal)
0	No sentido	Registrado por sismógrafos pero no perceptible por humanos	bajo 0.8
I	Ligero	Sentida por personas en reposo o personas especialmente sensitivas a terremotos	0.8 – 2.5
II	Débil	Sentida por la mayoría de personas, ligero ruido de puertas y deslizamiento de puertas enrejadas, de paneles al estilo japonés (shoji)	2.5 – 8.0
III	Algo	Vibración de casas y edificios, fuertes ruidos de puertas y "shoji", balanceo de candelabros (arañas) y otros objetos colgantes, movimiento de líquidos.	8.0 – 25
IV	Fuerte	Movimientos fuertes de casas y edificios, volcadura de objetos inestables, derramamiento de líquidos de las vasijas llenas hasta los 4/5.	25 – 80
V	Muy fuerte	Fisuras en los morteros de las paredes, fuerte volcaduras de lápidas y linternas de piedra, daños en chimeneas de mampostería y almacenes revestidos con barro.	80 – 250
VI	Desastroso	Demolición de un 30% de casas de madera japonesas, numerosos deslizamientos de tierra y fallas de terraplenes, fisuras en terrenos planos.	250 – 400
VII	Ruinoso	Demolición de más del 30% de casas de madera japonesas.	sobre 400

Tabla 2. Escala Mercalli Modificada (MM).

Escala MM	Descripción	Max. aceleración del terreno (gal)
I	No sentida, excepto por unos pocos en condiciones especialmente favorables.	Bajo 1
II	Sentido solo por personas en reposo en lugares tales como los pisos superiores de edificios. Balanceo de objetos delicadamente suspendidos.	1 – 2
III	Sentido por muchas personas en lugares tales como los pisos superiores de edificios, pero de un grado tal que muchas personas no lo reconocen como un sismo. Automóviles estacionados pueden mecerse ligeramente como si fuera causado por vibraciones de un camión medida que pasa. La duración puede ser	2 – 5
IV	En el día, sentido por muchos en interiores, pero por pocos en el exterior. Disturbaciones de vasijas, ventanas, puertas y crujido de paredes. Sensación como si un pesado camión golpease al edificio. Automóviles estacionados se mecen considerablemente.	5 – 10
V	Sentido por todos, muchos son despertados, algunas vasijas y vidrios de ventanas se rompen, el mortero de la pared se puede romper, volcadura de objetos inestables. A veces se notan disturbancia de polos del teléfono, árboles y otros objetos altos, relojes de péndulo paran.	10 – 21
VI	La gente se asusta y corren al exterior. Pesados muebles pueden moverse, en algunos lugares cae el mortero, caída de chimeneas, daños ligeros.	21 – 44
VII	Todos corren fuera de la casa. Daños insignificantes en edificios de buena construcción y diseño, ligeros a moderados en estructuras comunes, y considerables en edificaciones malas o mal diseñadas estructuralmente, rotura de chimeneas, sentido en autos en movimiento.	44 – 94
VIII	Algunos daños en edificios de buena construcción y diseño, considerables daños en construcciones comunes con algunos colapsos, grandes daños en edificaciones pobremente construidas. Muros de diafragma son sacados fuera de la estructura aporcada, caída de chimeneas de fábricas y casas, columnas, monumentos y paredes. Volcadura de muebles pesados. Arena y lodo es lanzado en pequeñas cantidades. Cambios de pozos de agua. Molestias en el manejo de automóviles.	94 – 202
IX	Considerables daños en edificios de buen diseño 202 – 432y construcción. Estructuras son sacadas de su alineamiento con las cimentaciones, rajaduras visibles en el suelo. Daños en tuberías enterradas.	

X	Casas de madera de buen diseño y construcción colapsan. Muchas de las estructuras de albañilería y aporticadas son destruidas con cimentaciones. Fisuras en el suelo originan daños, durmientes de rieles, pendientes y terraplenes se deslizan. Elevación del nivel de agua.	Sobre 432
XI	Casi todas las estructuras de albañilería colapan. Puentes destruidos. Fisuras sobre todo la superficie del suelo. Tuberías bajo el terreno son completamente puestas fuera de servicio. Asentamiento de tierras y deslizamiento de suelos blandos. Prominentes de durmientes de rieles.	Sobre 432
XII	Total daño. Las ondas son transmitidas a la superficie del terreno. Cambios en la topografía. Objetos vuelan por el aire.	Sobre 432

Comportamiento de cuerpos antisísmos

Cuando un cuerpo sobre un piso es sujeto a excitaciones sísmicas, el cuerpo podría permanecer en reposo mientras las excitaciones no son grandes. Cuando las excitaciones llegan a ser lo suficientemente grandes, el cuerpo puede rotar, deslizarse, saltar o tener una combinación de esos movimientos.

El autor ha desarrollado programas de computo para tratar algún movimiento plano de un cuerpo rígido sobre el piso sujeto a excitaciones verticales y horizontales. (1)

Para estudiar los movimientos de los cuerpos y las condiciones para el volteo de éstos, fueron realizadas simulaciones usando los programas de cómputo desarrollados así como experimentos en mesa vibratoria en pruebas con extensión de frecuencias. En las pruebas con extensiones de frecuencia, la aceleración, velocidad o amplitud de desplazamiento fueron mantenidas constantes, cambiando gradualmente la frecuencia fueron medidas las condiciones de volteo del cuerpo.

Resultados típicos de experimentos del volteo de cuerpos en la prueba con extensión de frecuencias se muestra en la Figura 3.

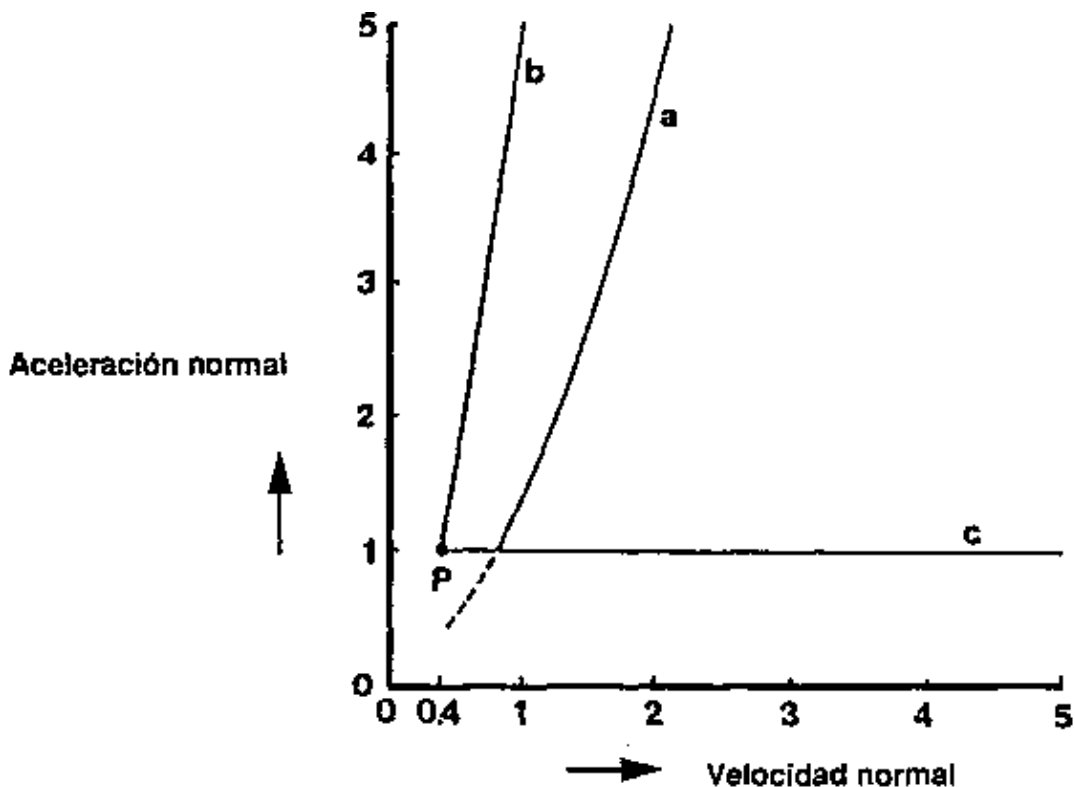


Figura 3. Límites inferiores de volcadura en pruebas de extensión de frecuencia

En la figura la ordenada representa la aceleración normalizada, la cual es definida como la amplitud de la aceleración horizontal "a" necesaria para iniciar el movimiento de rotación del cuerpo, esto es:

$$a = \frac{b}{h} g \quad : \text{Fórmula de West (2)}$$

donde b/h es la relación ancho–altura (ver Figura 4) y g es la aceleración de la gravedad, y la obsisa es la velocidad normalizada la cual es definida como la amplitud de la velocidad dividida entre la velocidad v necesaria para el volteo de un cuerpo por un simple golpe (choque) horizontal, esto es:

$$v = \frac{2g}{r} (i^2 + r^2) \frac{1 - \cos \alpha}{\cos^2 \alpha}$$

donde α es el ángulo entre la vertical y la línea desde O hasta G del cuerpo en reposo, i es el radio de giro del cuerpo respecto a G y r es la distancia desde O hasta G (ver Figura 4).

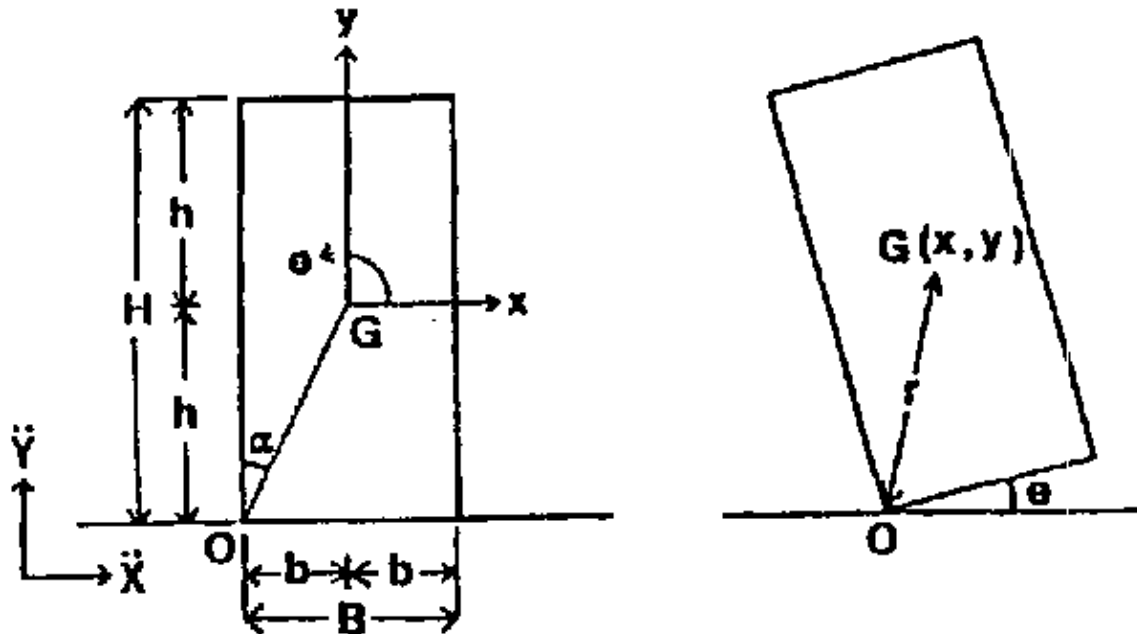


Figura 4. Cuerpo en movimiento.

Se encontró que los resultados en la figura 3 no fueron muy afectados por los materiales componentes del cuerpo y del peso, y de los parámetros implicados: es decir, tamaño del cuerpo b/h , coeficiente de fricción, coeficiente de restricción, magnitud de la excitación vertical y la fase entre las excitaciones verticales y horizontales.

En la figura 3 hay tres tipos de volteos (ver Figura 5) en el caso de pruebas con extensiones de frecuencia de aceleración constantes, el cuerpo usualmente inicia el movimiento de rotación en la fase inversa y el volteo desde esta rotación de fase inversa (ver Figura 6a) ocurre cuando la excitación de ingreso alcanza la curva "a" en la figura 3, pero si el cuerpo inicia un movimiento de giro sub–armónico, el volteo de giro subarmónico ocurre (ver Figura 7b) en la curva b de la Figura 3. Es difícil decir las condiciones que hacen que el cuerpo llegue a la fase inversa o a la prueba con extensiones de amplitudes de desplazamiento, el cuerpo repite esto "en fase" un movimiento de rotación solo unas pocas veces y el volteo en fase de rotación ocurre (ver Figura 6C) en la línea C de la figura 3.

De los resultados de esas simulaciones y experimentos, se encontró que los límites inferiores de aceleración normalizada y la velocidad necesaria para el volteo del cuerpo (punto P en la Figura 4) no están muy afectadas por los parámetros componentes. Sin embargo podemos estimar el criterio de volteo de un cuerpo como sigue: la amplitud de la aceleración a_0 , la cual es el límite inferior de la aceleración horizontal máxima para el volteo del cuerpo, es aproximadamente igual a la aceleración normalizada.

$$a_0 = \frac{b}{h} g = \frac{B}{H} g \quad (5)$$

donde B y H son el ancho y la altura respectivamente de un cuerpo rectangular.

La amplitud de la velocidad V_0 , la cual es el límite inferior de la velocidad máxima para el volteo del cuerpo, es aproximadamente 0.4 veces la velocidad normalizada.

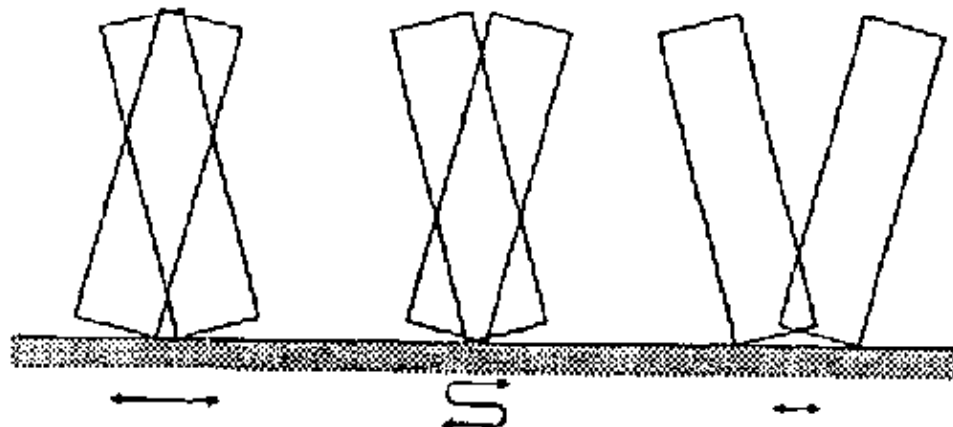
$$V_0 = 0.4 \frac{2g}{r} (i^2 + r^2) \frac{1 - \cos \alpha}{\cos^2 \alpha}$$

en el caso de un cuerpo rectangular:

$$V_0 = 0.4 \frac{8gr}{3} (i^2 + r^2) \frac{1 - \cos \alpha}{\cos^2 \alpha} \quad (7)$$

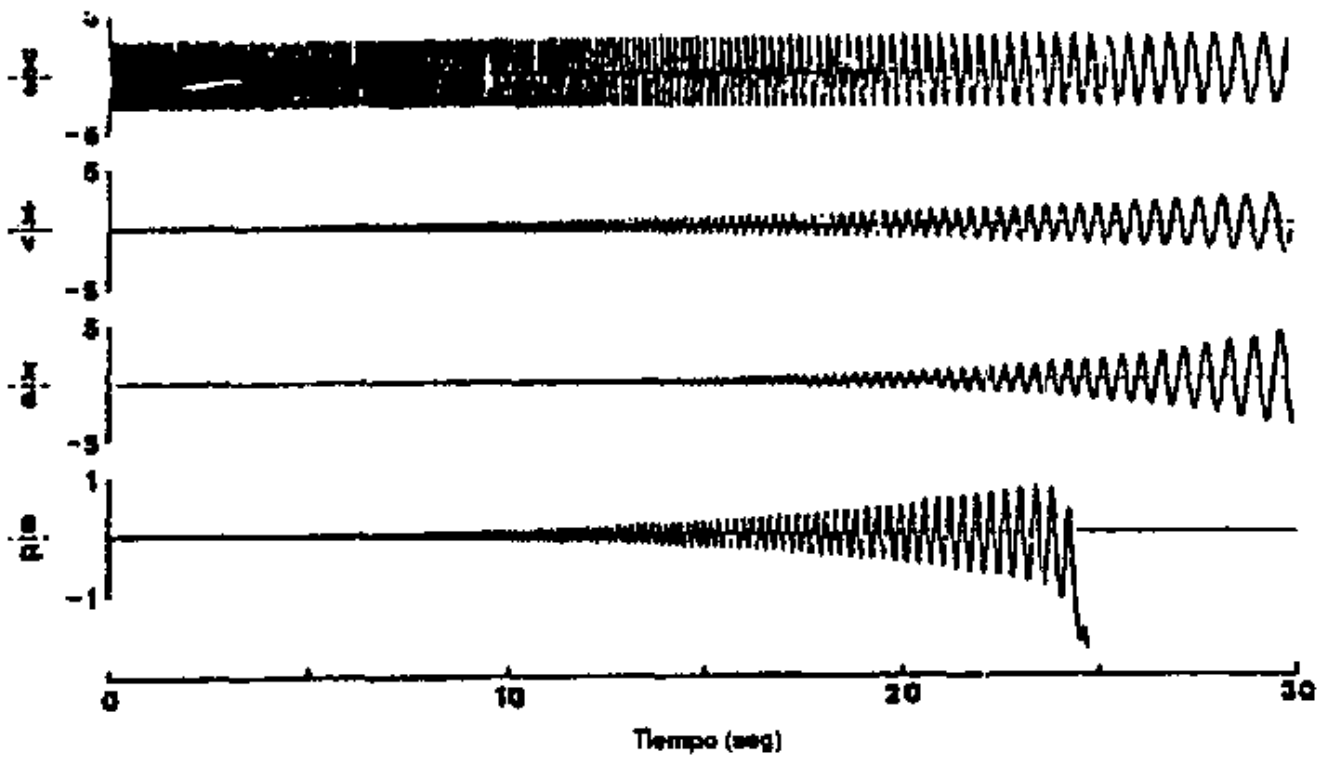
Si α es pequeño

$$V_0 = 0.4 \frac{4gb}{3} \alpha = 10 \frac{B}{H}$$

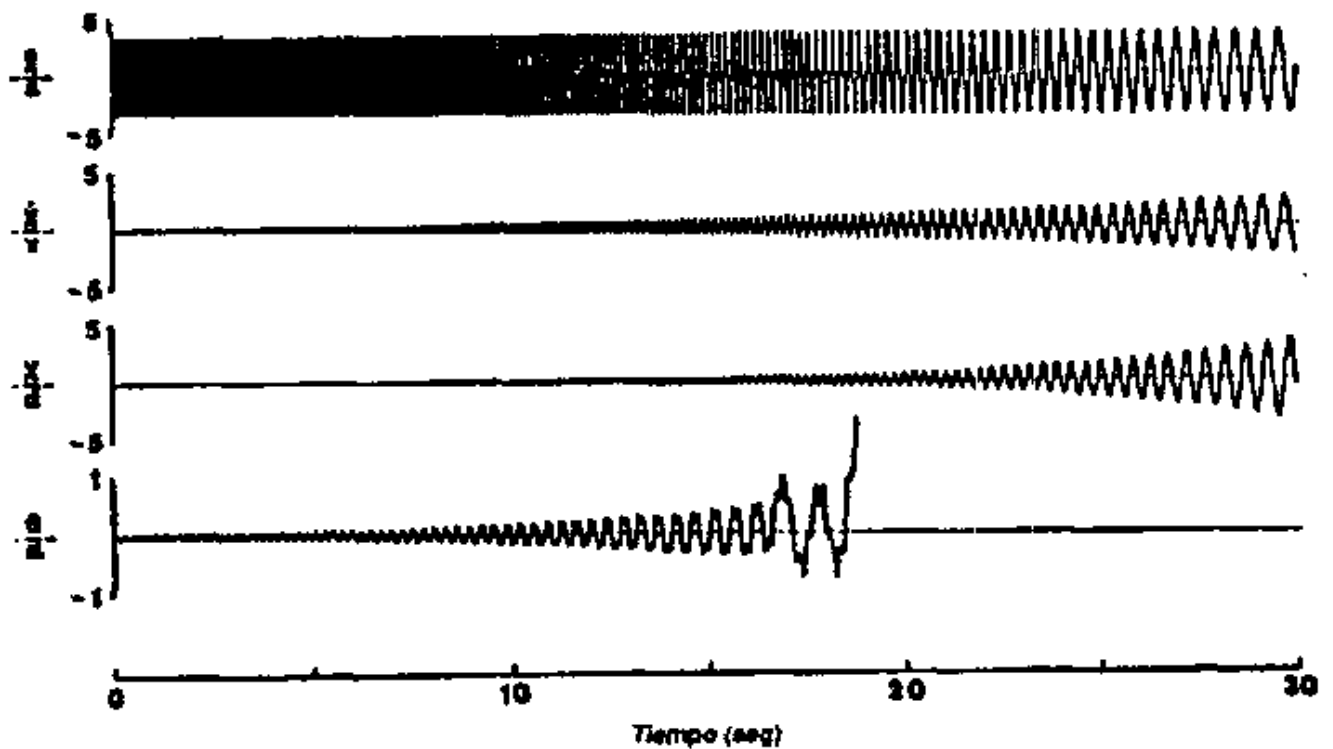


a. Movimiento de rotación en fase inversa b. movimiento de giro submónico c. movimiento en fase

Figura 5. Tres tipos de movimiento de rotación antes del volteo.



a. Volcadura de fase de rotación inversa



b. Volcadura de rotación subarmónica

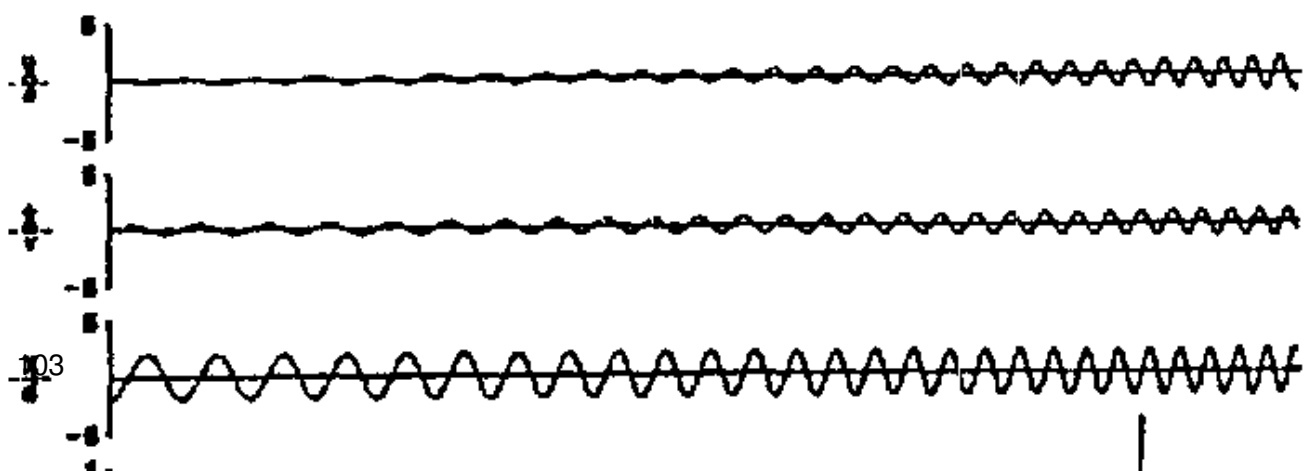


Figura 6 Aceleraciones, velocidad y desplazamiento del palo y desplazamiento angular del cuerpo

Considerando la amplitud del desplazamiento, ésta es mayor que el valor que hace la aceleración normalizada igual a 1.0 y la velocidad normalizada igual a 0.4. Luego usando la relación $V_0^2 = a_0 d_0$, la amplitud del desplazamiento d_0 , la cual es el límite inferior del máximo desplazamiento necesario para el volteo del cuerpo, esta dado por:

$$d_0 = \frac{V_0}{a_0} \quad (9)$$

en el caso de un cuerpo rectangular y si θ es pequeño

$$d_0 = \frac{B}{10} \quad (10)$$

Usando el criterio de volteo de un cuerpo dado por las ecuaciones (5) (7), (9), el diagrama para estimar los límites inferiores de las máximas aceleraciones, velocidad y desplazamiento del tamaño de un cuerpo rectangular homogéneo volteado, puede ser realizado como se muestra en la Figura 8. Se puede notar que la aceleración no es solamente el factor de volteo sino también la velocidad es tan importante como la aceleración consecuentemente el desplazamiento llega a ser tan importante como esos dos factores.

Simulaciones de excitaciones sísmicas actuales muestran que el criterio es también aplicable a excitaciones sísmicas. Por consiguiente, podemos estimar los límites inferiores de la máxima aceleración horizontal y la velocidad de excitaciones inducidas del tamaño del cuerpo volteado, o la posibilidad de volteo del cuerpo si se da las dimensiones de éste, y la máxima aceleración y velocidad de excitación de la Figura 7.

Si la posibilidad de volteo es marcada, el cuerpo deberá ser fijado a una parte estable del edificio. Dos métodos son considerados para fijar un cuerpo. Uno es fijar la base del cuerpo al piso y otro es fijar la parte superior de este a la pared. Por ejemplo, consideremos el caso de fijar el estante de la figura 8, cuando éste se fija al piso (ver figura 8a) la fuerza F aplicada a la base es más de dos veces el peso del estante, sustituyendo el coeficiente sísmico horizontal $Kh = 1/5$ y $p = 2b$.

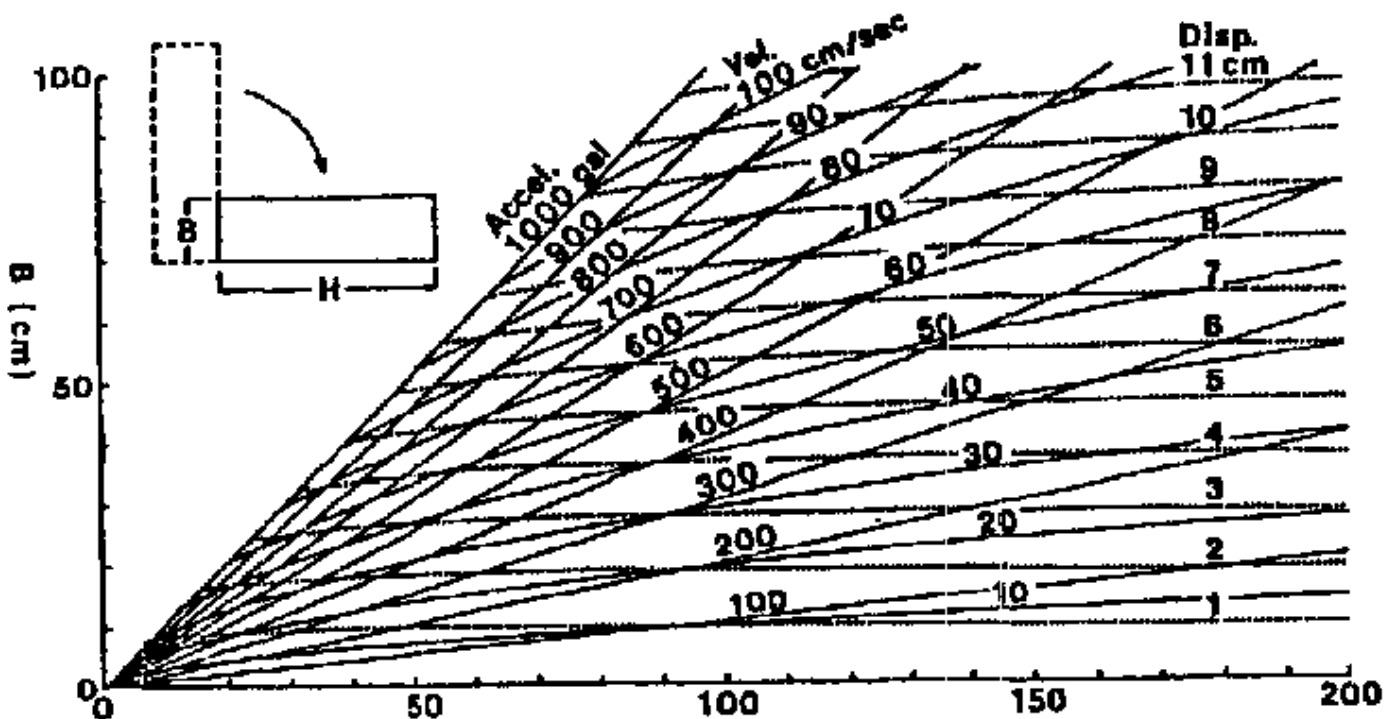


Figura 7. Límites inferiores; de aceleración, velocidad y desplazamiento para la volcadura de cuerpos homogéneos rectangulares

construcción. El sótano será especialmente efectivo cuando el edificio va a ser construido en suelo blando.

- *Conexiones de tuberías en los edificios:* Las conexiones de tuberías en el edificio son vulnerables a los daños causados por terremotos los cuales pueden empeorar completamente las funciones del hospital. Las conexiones deben ser protegidas de las dislocaciones entre el piso y el edificio.

- *Ubicación de ambientes importantes:* Los ambientes importantes como sala de operaciones, etc. deberán estar en la parte baja del edificio para evitar las grandes vibraciones durante terremotos.

- *Prevención de volcadura de cuerpos:* Estantes y repisas para instalar medicinas, etc. deberán ser sujetos a paredes fijas para prevenir su volteo. La posibilidad de volteo puede ser estimada por la Figura 8. Las puertas de los estantes deberán cerrarse con llave de manera que no se abran durante el movimiento..

- *Bloqueo de ruedas de muebles:* Los equipos médicos con ruedas son susceptibles a chocar y bloquear las evacuaciones, por esto las ruedas deben ser bloqueadas. Pruebas en mesa vibratoria indican la efectividad de bloqueo de ruedas diagonalmente. (3)

- *Adopción de base de aislamiento:* Para proteger las partes más importantes, se recomienda la adopción de una base de aislamiento del edificio, desde que la base de aislamiento de todo el edificio es muy costoso y no es aplicable a edificios existentes, aplicaciones del aislamiento de vibraciones del piso serán muy prácticas.

Conclusiones

Para proteger hospitales contra terremotos, numerosas consideraciones deberán tomarse en cuenta, alguna de ellas son: selección de lugar, construcción y configuración estructural, adecuada resistencia, rigidez y ductilidad, ventaja de sótano, conexiones de tuberías al edificio, ubicación de ambientes importantes, prevención de volcadura de cuerpos, bloqueo de ruedas de muebles y adopción de base de aislamiento.

Referencias

(1) ISHIMAYA, Y. "Criterio para el volteo de cuerpos rígidos ante excitaciones sísmicas y sinusoidales", Proc de 8 SCEE, Agosto (1984)

(2) "Bases para diseño de Estructuras – Acciones sísmicas en estructuras", ISO 3010, Organización Internacional para Normalización, julio (1988).

(3) MIZUNO, H. "Comportamiento sísmico y evaluación de riesgo de equipos médicos con ruedas", Proc. de GWCEE, agosto (1988).

(* WCEE – Conferencia Mundial de Ingeniería Antisísmica)

Prevención de los incendios en hospitales

Arq. Humberto del Busto

Introducción

La capacitación del personal del hospital a todo nivel, con el objetivo primario de crear en él conciencia sobre la importancia de que se adopten medidas de prevención, es fundamental para que la respuesta del mismo en caso de desastre sea pronta y eficiente.

Para tal propósito, la tarea de interesar a un personal multidisciplinario e involucrar en forma organizada su participación en un objetivo común y capacitarlo en aspectos muchas veces alejados de su propia disciplina, es indispensable para la obtención de resultados adecuados.

Es ese el objetivo primordial de la siguiente presentación, en donde se plantea la metodología que permite integrar al personal del hospital en forma organizada, en la elaboración del Plan de Seguridad del mismo y a la vez presenta un listado de posibles riesgos que acorde a la propia realidad del hospital dicho plan debe contemplar, ofreciendo a la vez una guía de posibles acciones a optar de acuerdo a las posibilidades de infraestructura de cada hospital.

Ante la peligrosidad de que ocurra un desastre, las medidas adoptadas para mitigar sus efectos podrán restarle magnitud al riesgo. Existe diferencia entre la *peligrosidad* y el *riesgo* de los desastres.

La peligrosidad o amenaza de que ocurra un desastre es una condición natural, generalmente no controlada por el hombre, a quien únicamente le queda enfocar sus esfuerzos para tratar de predecir la ocurrencia del mismo.

El riesgo del desastre depende de la vulnerabilidad de las obras hechas por el hombre y su magnitud dependerá únicamente de las medidas de prevención que se hayan tomado con anterioridad para mitigar sus consecuencias. Así, mientras la peligrosidad del desastre existe como condición natural, el riesgo del mismo es creado por el hombre y puede ser a veces incrementado por él, al descuidar en sus obras los aspectos de prevención.

Seguridad en el hospital

La seguridad del hospital es responsabilidad de todos. Cada persona que desempeña un cargo dentro del hospital es indispensable para garantizar la adecuada prestación de los servicios y la seguridad en caso de desastres.

- El comité de seguridad recomienda la política y su eficiencia se refleja en los programas de seguridad.
- El ejecutivo de seguridad trabaja con el personal para desarrollar y mantener un alto nivel de seguridad. Esta persona es la que más sabe y entiende de métodos y sistemas de seguridad.
- El personal de mantenimiento es responsable por la seguridad de la infraestructura y equipos y trabaja para lograr un adecuado plan de mantenimiento del edificio, equipos e instalaciones
- El personal médico puede brindar un aporte muy importante a la seguridad del hospital, identificando situaciones críticas y brindando sugerencias para el mejoramiento de la seguridad del hospital. Los médicos juegan un papel esencial en situaciones de seguridad específica en el plan de emergencia.
- El personal de enfermería es diariamente responsable de la seguridad de los pacientes y adquiere importancia vital en la evacuación de pacientes y visitantes en un desastre.
- El trabajo diario del personal de apoyo y de servicios, como lavandería, cocina, cuarto de máquinas, bodegas, etc., es indispensable para el sostenimiento de los servicios, y juega un papel muy importante en la prevención de desastres.

Pasos para iniciar el plan de seguridad del hospital: Para iniciar el plan de seguridad del hospital, deberá organizarse primero el comité de seguridad del hospital. Este comité debe ser integrado por miembros de la dirección del hospital, representantes de todos los servicios, personal de enfermería, contabilidad y suministros, personal de mantenimiento y transportes y la oficina de seguridad.

Si el hospital no cuenta con una oficina de seguridad, el comité deberá crearla, nombrando al ejecutivo de seguridad, quien será el encargado y responsable de todos los aspectos de seguridad y prevención de riesgos en el mismo.

La primera tarea del comité de seguridad será realizar una evaluación de los riesgos y la vulnerabilidad del hospital a los mismos, en relación a su infraestructura y su capacidad real de respuesta a los efectos de los desastres, y establecer prioridades de acuerdo a los resultados de la misma.

Esta evaluación supone que al analizar la posibilidad del desastre por incendio por ejemplo, debe evaluarse la peligrosidad y el riesgo de los ambientes, la capacidad del edificio para proteger a sus ocupantes, las vías de evacuación, los sistemas de detección, alarma y combate de incendios, el entrenamiento del personal, etc., identificando las deficiencias y debilidades del hospital para responder adecuadamente ante el riesgo, y adoptar las medidas correctivas para superarlas.

Contacto y coordinación con entidades de apoyo: El ejecutivo de seguridad deberá establecer contactos y coordinaciones con el cuerpo de bomberos, seguridad pública, empresas eléctricas, empresa de suministro de agua, y entidades afines, con el propósito de establecer planes conjuntos de auxilio con cada entidad para solventar necesidades específicas del hospital, de acuerdo a las necesidades y capacidad de respuesta del mismo ante los desastres.

- Al cuerpo de bomberos deberá solicitársele asesoría en los aspectos de seguridad contra incendio en el hospital, evaluación del edificio hospitalario, entrenamiento del personal en el manejo de equipos de combate, prevención de incendios, evacuación, simulacros conjuntos y abastecimiento de agua.
- A la seguridad pública deberá solicitársele asesoría y establecer planes operativos para distintos tipos de desastres.
- Se deberá coordinar con la empresa eléctrica las fuentes alternas de electricidad, en caso de falla la conexión común.
- El apoyo de la empresa de agua será invaluable en caso de falla prolongada del suministro de agua, para establecer formas alternas de abastecimiento y purificación de la misma.
- Se deberá coordinar con otras entidades afines como hospitales, servicios de rescate, etc., la colaboración para el apoyo en caso de evacuación del hospital y el traslado de sus pacientes.

Identificación de fallas de seguridad en el edificio, equipo e instalaciones: El proceso de identificar las fallas en el edificio, equipo e instalaciones, es un aspecto importante para el desarrollo del plan de seguridad. Se necesitará en esta etapa la anuencia de todos los miembros del comité de seguridad, del personal médico, de enfermería, de apoyo, y de mantenimiento, etc., quienes con el conocimiento exacto de sus áreas de trabajo, podrán detectar y descubrir aspectos inseguros y sugerir la mejor forma de corrección de los mismos.

Es indispensable también, contar con la asesoría técnica de expertos en todos los campos, los que además de brindar soluciones adecuadas a los problemas detectados, podrán descubrir otras deficiencias que solamente una persona entrenada puede detectar.

El ejecutivo de seguridad es el responsable de la realización de esta etapa. Deberá planificar las inspecciones de todos los ambientes, sistemas y equipos del hospital, coordinar la asesoría técnica y motivar al personal, e informar al comité de seguridad de los resultados de las mismas y los aspectos a corregir.

La identificación de fallas de seguridad en edificios, equipos e instalaciones es un proceso de retroalimentación sin fin, ya que con la inspección periódica de edificios y los sistemas, se detectarán nuevos aspectos peligrosos que deberán corregirse, o incluso modificar el sistema.

Organización de las brigadas de seguridad del hospital: Paralelamente a la fase de identificación de fallas de seguridad en el edificio, equipo e instalaciones, el ejecutivo de seguridad deberá proceder a organizar la brigada de seguridad del hospital.

Debe de escogerse, para conformar las brigadas de seguridad, personal de todos los sectores de trabajo en el hospital, con el propósito de contar en cualquier momento con personal entrenado para poder hacerle frente a cualquier contingencia. Los primeros candidatos para integrar las brigadas de seguridad, serán los de todos los turnos de trabajo.

Los principales propósitos de las brigadas de seguridad del hospital son:

- Ser la primera fuerza de acción con que cuenta el hospital para enfrentarse a los efectos de los desastres internos, antes de que llegue el auxilio especializado del exterior. La brigada será especialmente útil como primera instancia en el combate de incendios, alarma de

bomba, inundaciones, evacuación del hospital, falta de energía eléctrica y agua potable, fugas de materiales peligrosos o radioactivas.

- Colaborar con el ejecutivo de seguridad para la inspección de riesgos en el edificio, y sugerir correcciones a las deficiencias observadas.
- Colaborar con el ejecutivo de seguridad en los programas de prevención de riesgos, concientización y orientación de todo el personal del hospital en los aspectos de seguridad.
- Colaborar en la elaboración y evaluación de simulacros periódicos.

Entrenamiento de las brigadas de seguridad: Los integrantes de las brigadas de seguridad del hospital, deberán recibir un entrenamiento y capacitación especial en la prevención de riesgos y en el combate de los mismos. Aunque deberán establecerse programas para capacitar y orientar a todo el personal del hospital, el entrenamiento de las brigadas de seguridad deberá ser más intenso y especializado. Todo el entrenamiento deberá efectuarse en forma teórica y práctica, programándose además simulacros periódicos.

Deberá centrarse la atención en el entrenamiento de las brigadas de seguridad en los siguientes aspectos:

- Uso y mantenimiento del equipo de detección y combate de incendios.
- Procedimientos de operación en caso de amenaza de bomba.
- Procedimientos de operación en caso de inundación en el hospital.
- Procedimientos para la evacuación de pacientes y visitantes.
- Procedimientos en caso de fallas en el suministro de energía eléctrica y agua potable, de acuerdo a lo establecido en el plan de seguridad.
- Procedimientos para el control y prevención de escapes o derrames de gases o líquidos tóxicos, inflamables o radioactivos

Los miembros de la brigada de seguridad deberán actuar ante sus compañeros de trabajo como monitores en la prevención de desastres en el trabajo diario.

Desarrollar el manual de seguridad del hospital: Deberá elaborarse el manual de seguridad del hospital, como guía operativa, que indique la actuación de todo el personal en caso de desastre. Dicho manual deberá elaborarlo el comité de seguridad del hospital, como resultado del estudio de identificación de los tipos de desastre a los cuales el hospital es vulnerable.

El propósito del manual de seguridad será el de establecer los procedimientos de actuación del personal en caso de desastre, debiendo ser un documento muy claro y específico en su contenido y de difusión general al personal del hospital involucrado en el mismo.

Deberá incluir como lineamientos generales, los siguientes aspectos para cada tipo de desastre:

- Establecer la jerarquía de mandos y responsabilidades entre los miembros del hospital.
- Definir claramente la actuación de la persona que descubra un percance o reciba la llamada de alarma.
- Establecer claramente los procedimientos de actuación de la persona responsable en el hospital y del ejecutivo de seguridad, al ser notificados de la ocurrencia de un desastre.
- Establecer las circunstancias para la intervención de la brigada de seguridad y los procedimientos de su actuación.
- Establecer las circunstancias que hagan imperativa la evacuación parcial o total del hospital y los procedimientos para efectuarla.

- Si debe darse la alarma general al personal del hospital, establecer los procedimientos para efectuarla.
- Definir claramente la actuación de cada empleado del hospital al escuchar la alarma general.
- Establecer los procedimientos para decidir y comunicar a todo el personal sobre la finalización de la situación de alarma.

Este documento, deberá ser revisado y actualizado periódicamente, conforme se descubran fallas o defectos en el mismo, como consecuencia de las inspecciones periódicas de medidas de seguridad, evaluación de simulacros e investigaciones de accidentes.

Incendios en hospitales

El edificio debe proteger a sus ocupantes en caso de incendio: Ante las condiciones de alta temperatura, atmósfera hostil por los gases tóxicos e irritantes y oscurecimiento del ambiente por los humos, la supervivencia y el escape de los ocupantes dependen únicamente de la protección y las facilidades que el edificio les brinde.

El diseño de un edificio que proteja a sus ocupantes, es muy similar al de un barco, que está dividido en compartimientos estancos para evitar la inundación consecutiva de los ambientes vecinos y el hundimiento del mismo. De igual forma, un edificio debe también lograr que su estructura, muros, puertas y ventanas, formen barreras a la transmisión de las llamas, humos y gases, tanto horizontal como verticalmente, para evitar que un incendio generado en un ambiente se extienda a los vecinos y atente innecesariamente contra sus ocupantes.

Esto es específicamente necesario en el hospital, donde por las condiciones de poca movilidad de los pacientes, una evacuación puede resultar en el agravamiento de la salud de los mismos, además de consumir esfuerzos enormes del personal.

El criterio de formar compartimientos con las divisiones del hospital, debe aplicarse a todos sus ambientes, procurando la instalación de cerramientos incombustibles de piso a techo, principalmente en la unidad de cuidados intensivos, quirófanos, urgencia, vías de evacuación, ductos de escaleras, encamamientos, laboratorios y en los sectores de apoyo y depósitos de material combustible. Es necesario contar con asesoría especializada para lograr un adecuado nivel de protección.

Elementos indispensables para que se produzca fuego: Para que el fuego se produzca, tienen necesariamente que concurrir tres condicionantes al mismo tiempo. Es necesario un elemento que produzca alta temperatura, debe de existir material combustible y el oxígeno del aire. De la misma forma, para extinguir el fuego bastará con suprimir uno de los elementos citados, ya sea enfriando el sector quemado, retirando físicamente el material combustible o sofocando el fuego con la aplicación de agentes extintores como el dióxido de carbono (CO₂), halón o agua de presión.

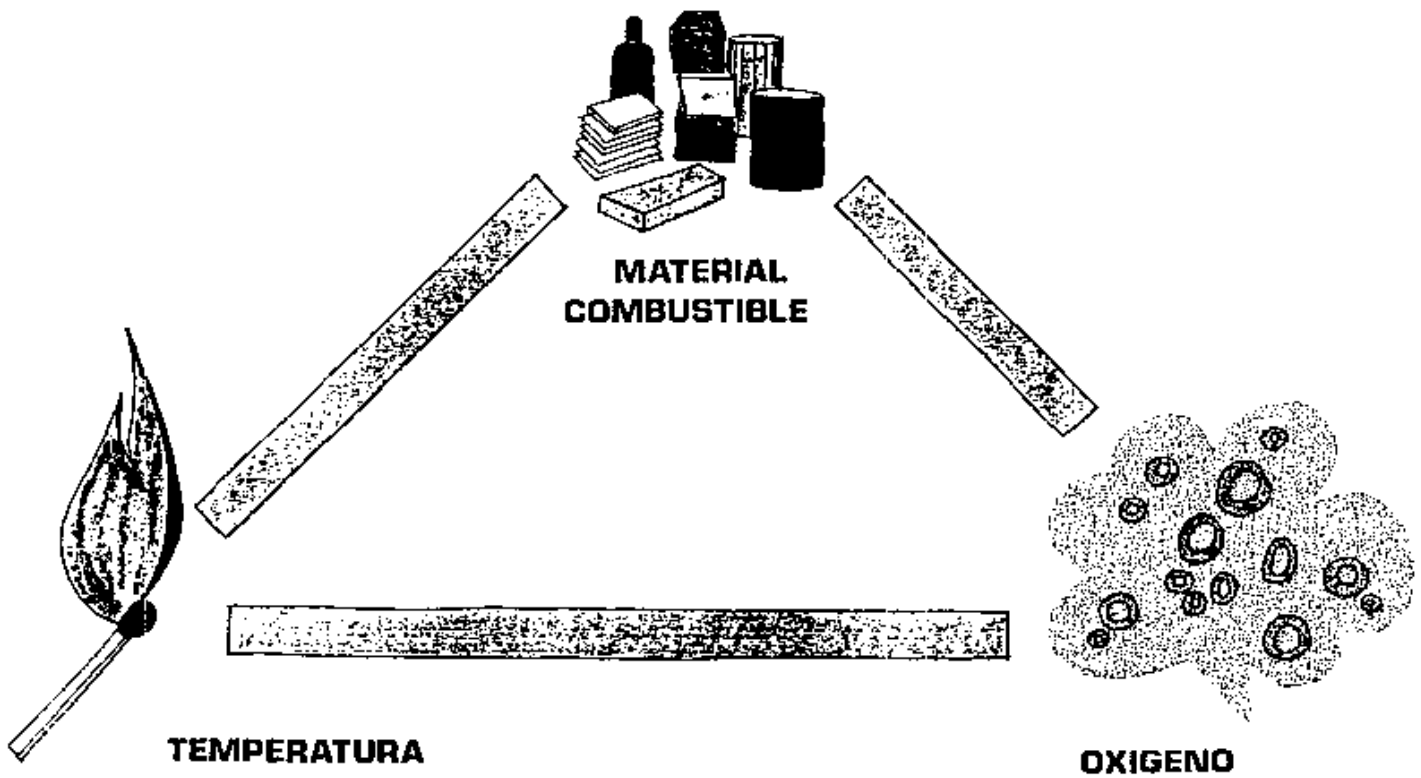


Figura 1. Elementos indispensables para que se produzca. fuego.

Respuesta humana a altas temperaturas: En un incendio, se desarrollan altas temperaturas casi desde su inicio, y si el fuego no se controla pueden llegar éstas a niveles sumamente altos.

En la Figura 2 se describe la respuesta humana ante la temperatura marcada en el termómetro, y a la izquierda, el tiempo probable necesario para que esa temperatura sea alcanzada en un incendio normal. La vulnerabilidad humana ante las altas temperaturas es evidente, puesto que las temperaturas que pueden causar graves daños e incluso la muerte, se producen al inicio del fuego, el que si no se controla podrá superar los 900°C en 45 minutos

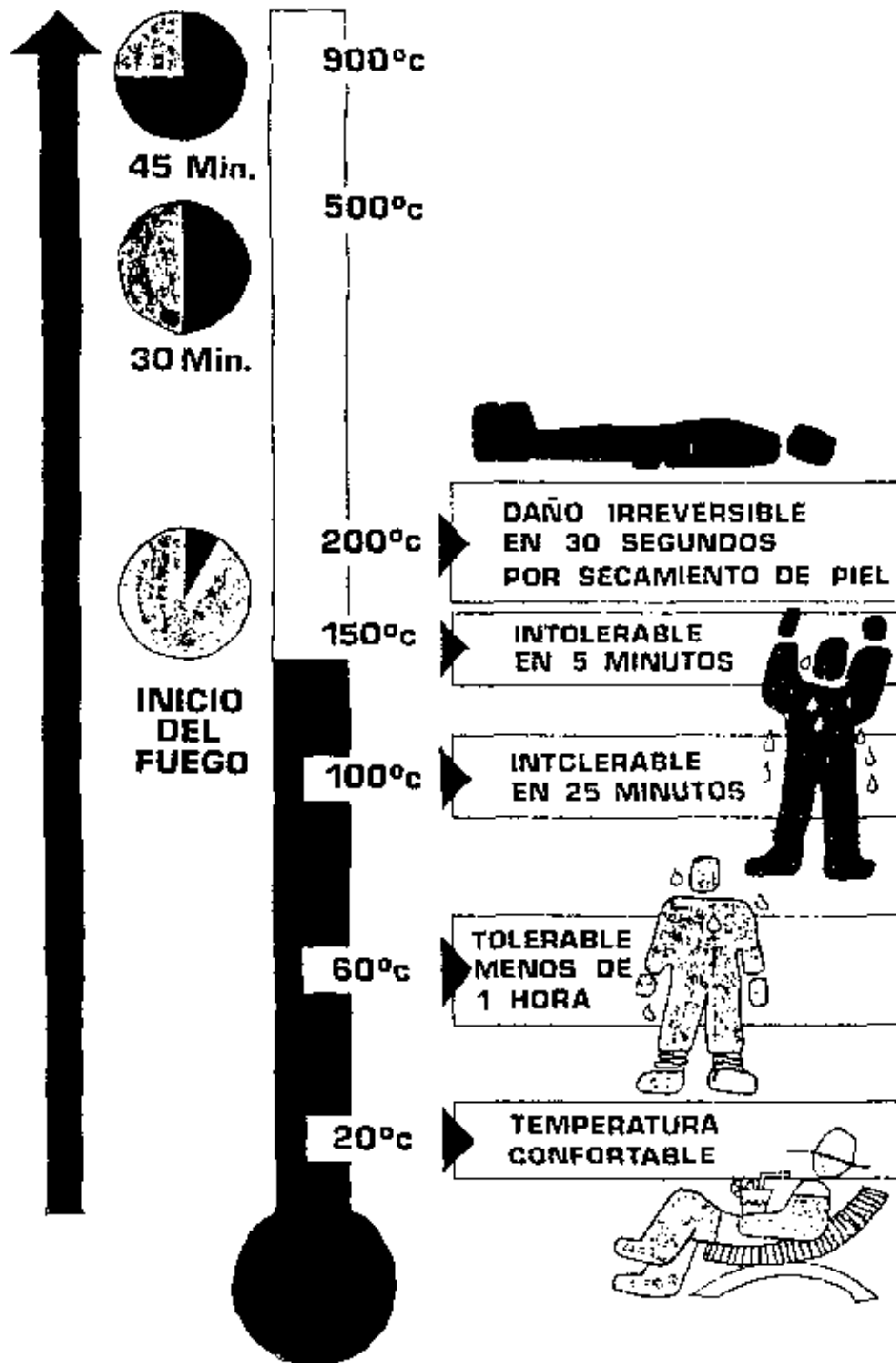


Figura 2. Respuesta humana a altas temperaturas

La producción de humos en un incendio reduce la visibilidad: Los humos que acompañan al fuego, son producto de la combustión incompleta de los materiales, y su cantidad, concentración y toxicidad depende directamente del material que se quema. En la gráfica se ilustra la comparación entre la cantidad de humos producidos por la combustión de materiales naturales como madera, a la izquierda, y materiales artificiales como plásticos, a la derecha. A diferencia de la madera, los plásticos, caucho, cuero, etc., producen a los pocos minutos de iniciada la combustión una gran cantidad de humos y gases tóxicos e irritantes al arder, los que oscurecen el ambiente haciendo difícil encontrar la salida aunque se este familiarizado con su localización. Es esta una de las razones por la que las vías de evacuación, deben señalizarse preferiblemente con rótulos luminosos.

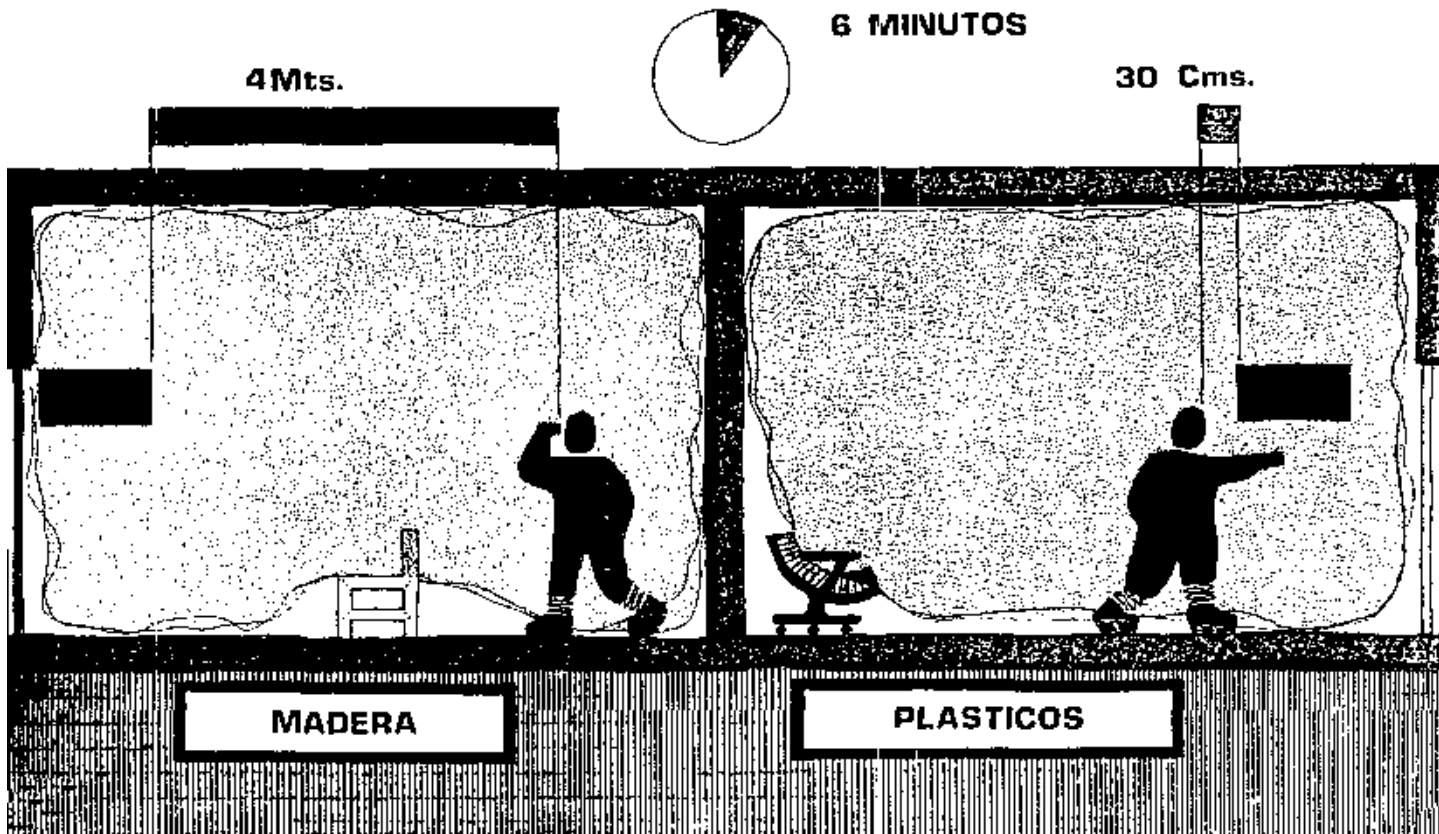


Figura 3. La producción de humos en un incendio reduce la visibilidad.

Gases tóxicos e irritantes producidos en un incendio: Más que las altas temperaturas desarrolladas en un incendio, el principal factor causante de víctimas mortales, son los humos y los gases tóxicos producidos por la combustión principalmente de plásticos, caucho, lana y cuero. Estos materiales indispensables para el desarrollo de las actividades del hospital se convierten al quemarse en productores de gases tóxicos, asfixiantes e irritantes, que pueden causar graves trastornos o la muerte en cortos períodos de exposición. Los gases irritantes atacan las vías respiratorias y los ojos, dificultando la respiración y la visibilidad, entorpeciendo los movimientos y la capacidad de reacción, más difícil o imposible la evacuación. El cloruro de hidrogeno en bajas concentraciones produce tos, sofocamiento e irritación de los ojos y en altas concentraciones puede dañar las vías respiratorias, causando asfixia o la muerte. En el corto lapso de 3 minutos de combustión, una muestra de vinil-uretano produce concentraciones peligrosas de cloruro de hidrógeno.

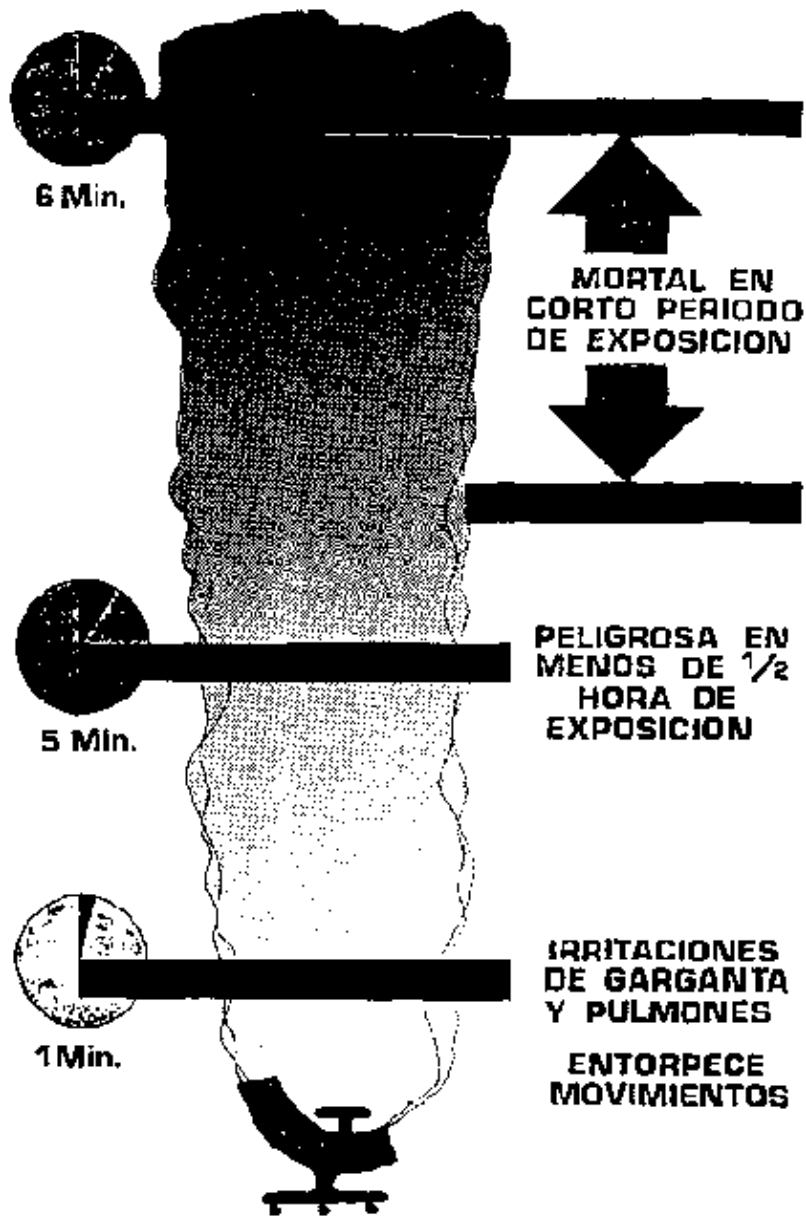


Figura 4. Gases tóxicos e irritantes producidos en un incendio.

Tiempo estimado de duración de un incendio: La duración de un incendio depende directamente de la cantidad de material combustible con que cuente el fuego para desarrollarse. La Figura 5 nos indica el tiempo probable de duración de un incendio desarrollado en distintos ambientes, dependiendo de la cantidad de material combustible que usualmente guardan éstos. Si la estructura o los recubrimientos del edificio, como el techo falso, tabiques, pisos, enlucidos, etc., son a su vez combustibles, deberá sumarse el aporte de los mismos, incrementando el tiempo de duración del incendio.

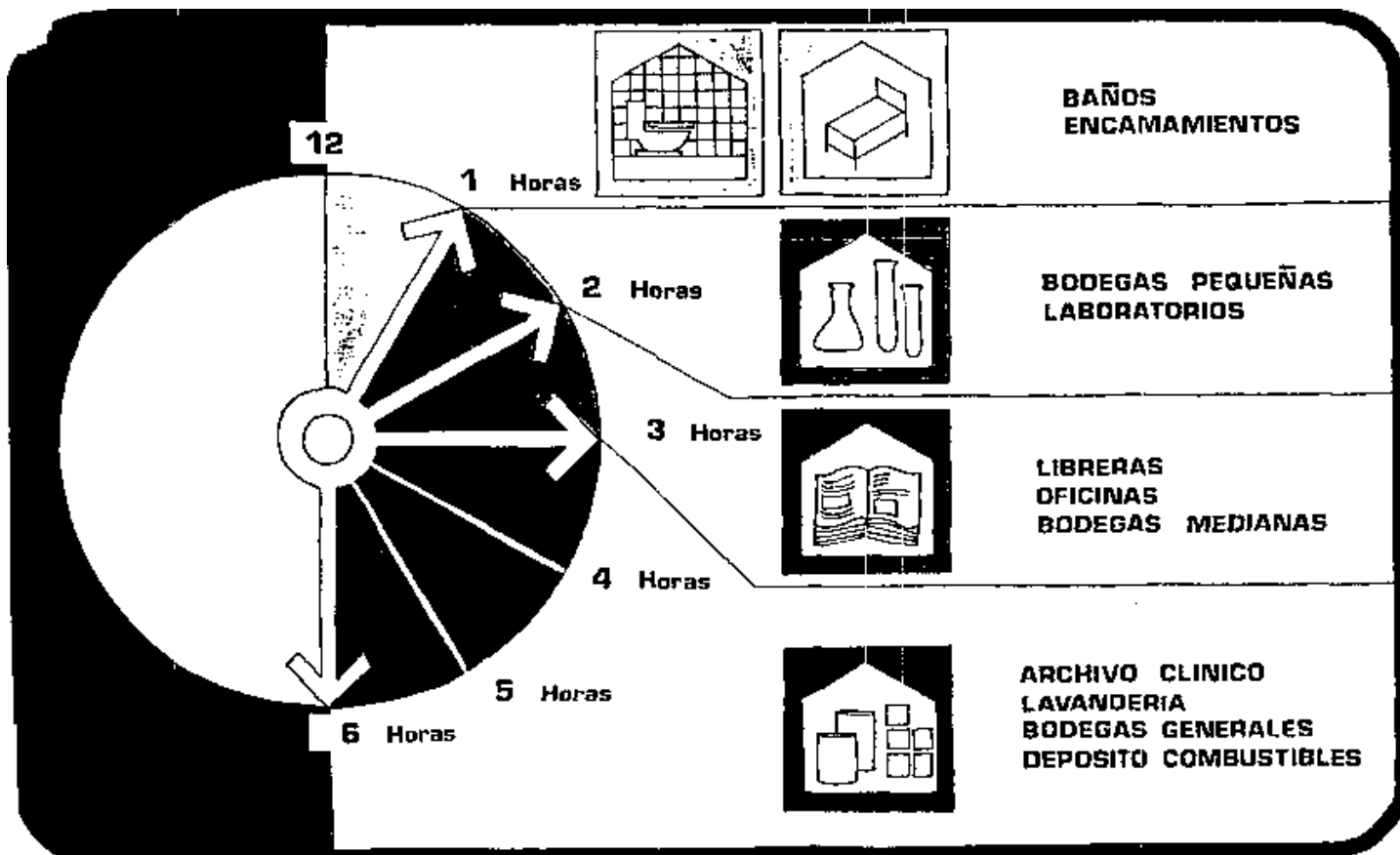


Figura 5. Tiempo estimado de duración de un incendio.

Un pronto y eficaz combate del incendio limitará el tiempo de duración del mismo y la magnitud de los daños. Podrá también reducirse considerablemente el tiempo de duración de un incendio, almacenando los materiales combustibles dentro de muebles protectores, como armarios y archivos metálicos.

Propagación horizontal y vertical del fuego en edificaciones desprotegidas: El fuego tiende a propagarse en espacios cerrados, en forma horizontal al ras del techo, y en forma vertical por medio de ductos de gradas, de basura, ropa sucia, instalaciones, elevadores y ventanas exteriores sin protección. Al propagarse, sobrecalienta el ambiente y propicia el inicio de focos de fuego distantes, incrementando su magnitud y destrucción.

Los humos y gases calientes producidos por la combustión, se propagarán en el nivel del fuego y a los pisos superiores antes que las llamas, e inundarán todos los ambientes a su alcance, obstruyendo las escaleras, pasillos y espacios que no ofrezcan ninguna barrera a su avance.

Estas condiciones podrán imposibilitar el escape y la evacuación de los ocupantes del edificio, ya que por los efectos de los humos calientes y los gases tóxicos e inflamables, no será posible el uso de las escaleras, único medio seguro de evacuación.

Los elevadores no deben utilizarse en un incendio, ya que el fuego puede inutilizar o en su trayecto abrir automáticamente las puertas en niveles incendiados. La evacuación por medio de autoescalas del cuerpo de bomberos o helicópteros, es sumamente peligrosa, lenta, necesita entrenamiento y lugares adecuados para realizarse, y no puede ser utilizada por pacientes incapacitados, por lo que deberá evitarse, utilizándose únicamente como última alternativa.

En un incendio, un edificio que no opone ninguna barrera contra el fuego, permite el avance de llamas y humos y no protege a sus ocupantes, los atraparán en su interior, convirtiéndose en una trampa mortal para los mismos, ya que no les permitirá escapar hacia un lugar seguro.

La prevención del fuego separando el combustible de la llama: Existen dentro del hospital un sinnúmero de ambientes que almacenan grandes cantidades de material combustible; también se encuentran en el mismo actividades que por su propia naturaleza producen llama. La prevención de incendios en el hospital debe de

iniciarse controlando las actividades que produzcan llama, separándolas de los locales que contengan materiales combustibles o inflamables.

Estadísticamente se cuenta el fumar como el principal motivo de incendios en los hospitales, lo que obliga a regular drásticamente el fumar dentro del hospital, tanto a pacientes, como a visitantes y empleados, permitiendo que se fume únicamente en locales asignados para tal propósito.

Una instalación eléctrica mal elaborada o sobrecargada, constituye un peligro constante de generación de chispas y alta temperatura, que podrá provocar un incendio en cualquier momento o lugar.

La cocina por su propia naturaleza producirá temperaturas capaces de iniciar un incendio. El adecuado mantenimiento de los equipos, la separación y protección de materiales combustibles e inflamables y la implantación de hábitos de limpieza y orden en el trabajo del personal, coadyuvará a reducir su peligrosidad.

El manejo descuidado de productos químicos, como reactivos químicos, jabones concentrados, ácidos, etc., pueden generar combustiones espontáneas o corroer depósitos de almacenaje de materiales peligrosos y generar un incendio. La separación de materiales peligrosos su almacenamiento en depósitos protegidos, un adecuado plan de estibamiento y la orientación al personal de bodegas, ayudará a disminuir este riesgo.

Los trabajos de reparación y mantenimiento muchas veces generan chispas o llama que al alcanzar material combustible o inflamable, producen incendios.

Tipos de detectores de incendios: Es posible controlar y extinguir fácilmente cualquier fuego en su etapa inicial, pero si éste no se detecta a tiempo y se generaliza, podrá constituir un peligro mortal para los pacientes y el personal, forzar a una evacuación general, además de extender su destrucción y causar pérdidas de materiales y equipo valioso. Es indispensable por esa razón, contar con sistemas confiables de detección y alarma de incendios.

Conforman el sistema de detección de incendios, equipos cuyo fin es el de descubrir las manifestaciones del fuego, como temperatura anormal, humo y luz y transmitir señales de alarma. Las primeras manifestaciones del fuego dependen del material combustible que lo inicie y pueden ser desde una llama viva sin humo, hasta gran cantidad de humo sin llama. Por esta razón, es imprescindible contar con un sistema de acuerdo al fuego que pueda generar el material combustible o inflamable y las características del ambiente donde se encuentre. Además del pulsador manual de alarma, que es accionado por cualquier persona que descubra el fuego existen varios tipos de equipos automáticos de incendio, entre los que se encuentran los siguientes:

- El detector jónico detecta la presencia de humo en la atmósfera y es adecuado para ambientes cerrados que contienen combustibles sólidos, como papel, cartón, madera, caucho etc.
- El detector térmico es sensible a cualquier elevación de temperatura en el ambiente, y puede ser de temperatura fija, que da la alarma cuando la temperatura del ambiente alcanza el límite de temperatura prefijado, o termo-velocimétrico, que reacciona a cualquier variación brusca de temperatura, aunque no haya alcanzado ésta un alto nivel; los detectores térmicos son adecuados para instalarse en ambientes cerrados que contengan líquidos inflamables, como gasolina, alcoholes, etc.
- El detector óptico reacciona ante la luminosidad de la llama y es adecuado para detectar fuego de combustibles sólidos en ambientes abiertos o de líquidos inflamables en ambientes abiertos o cerrados. También existen detectores ópticos que detectan la distorsión que produce el humo en la atmósfera (detectores de humos), y que son adecuados para instalarse en ambientes muy altos que contengan materiales combustibles sólidos.

La señal de alarma de los detectores automáticos de incendio puede darse por medio de una bocina instalada en cada uno, pero generalmente se acoplan todos los detectores en un sistema general, que da la alarma en un tablero instalado en la oficina de seguridad del hospital, o en su defecto, en la planta telefónica del hospital, donde se cuenta con personal las 24 horas del día.

Además de la buena selección de los equipos, la eficiencia del sistema de detección de incendios depende de un adecuado y constante mantenimiento.

Condiciones para la operación de los extintores portátiles de incendio: Existen varias condicionantes, que de no cumplirse cualquiera de ellas, convertirá en inútil el sistema de extintores portátiles de incendios.

Si no se cuenta con el agente extintor, capaz de extinguir el fuego producido por el material combustible contenido en el local, o se posee poca cantidad o mala localización de los equipos, o se encuentran éstos sin presurizar e inoperables por mal mantenimiento, no será posible su utilización.

Debe considerarse a los extintores portátiles de incendio, como un medio adecuado para combatir conatos de incendio y atacar al fuego en su etapa de inicio, ya que por su limitada capacidad, son totalmente inútiles para combatir incendios generalizados. Por esa razón, es indispensable contar con un eficiente sistema de detección automática de incendios y contar con personal entrenado en su operación las 24 horas del día.

Estas condicionantes para la operación de los extintores portátiles de incendios, semejan los eslabones de una cadena, que necesitan continuidad ya que al fallar alguno, aunque los otros se encuentren en buen estado, serán inútiles.

Diferentes tipos de extintores portátiles de incendios: Los extintores portátiles de incendio se dividen en varios tipos, dependiendo del agente extintor que contengan. De igual manera, cada tipo de extintor portátil será adecuado para combatir tipos distintos de fuego e inadecuado o contraindicando en otros.

- *Los extintores portátiles de agua* son excelentes para ser utilizados en fuegos de combustibles sólidos como papel, cartón, madera, etc., ya que actúan principalmente por enfriamiento, pero son contraindicados en fuegos producidos por líquidos inflamables como gasolina y alcoholes, ya que los propagan. No deben utilizarse en presencia de equipo eléctrico en tensión, porque el agua es un excelente conductor eléctrico y puede electrocutar al operario, además de que deteriora el equipo electrónico. Produce reacciones violentas en fuegos de sodio.
- *Los extinguidores portátiles de espuma* son básicamente iguales a los de agua, solamente que ésta lleva mezclado un químico que al expandirse produce espuma, que los hace especialmente adecuados para sofocar fuegos de combustibles sólidos y líquidos inflamables como gasolina, kerosene, etc. Con químicos productores de espuma especiales son muy eficaces para extinguir fuegos de alcoholes, solventes químicos, éter, etc. Al igual que los extinguidores de agua, son peligrosos para el operario en presencia de equipo eléctrico en tensión, y deteriora el equipo electrónico. Produce reacciones violentas en fuego de sodio.
- *Los extinguidores portátiles de anhídrido carbónico (CO₂)* son especialmente adecuados para fuegos de líquidos inflamables, pueden operarse en presencia de equipo eléctrico con tensión y no deterioran el equipo electrónico porque no dejan residuos. Son ineficaces en fuegos de madera, cartón papel, caucho, reactivos químicos, celulosa, etc. Por ser el agente extintor un gas que extingue el fuego por sofocamiento, en forma muy similar a cuando se apaga una candela soplándola, su empleo al aire libre resta mucho a su eficiencia. Deberá cuidarse su empleo en altas cantidades en ambientes cerrados, puesto que el anhídrido carbónico es asfixiante.
- *Los extinguidores portátiles de agentes halogenados (Halón 1211 o 1301)* son muy adecuados para cualquier tipo de fuego y en especial para fuegos en presencia de equipo eléctrico y electrónico en tensión, ya que protegen al operario y no deterioran el equipo. Deben utilizarse con reserva al aire libre, ya que siendo el agente un gas que actúa al alcanzar ciertos niveles de concentración en el aire, pierde eficiencia al aplicarse al aire libre con viento. Deberá cuidarse su empleo masivo en ambientes cerrados, ya que en altas concentraciones y larga exposición, el gas puede resultar tóxico. Producen reacciones violentas en fuegos de magnesio.
- *Los extinguidores de polvo químico seco* pueden catalogarse en dos grupos, según el tipo de fuego que combatan. Los que tienen marcado en su etiqueta las letras ABC, son adecuados para cualquier tipo de fuego, menos el fuego de metales combustibles como magnesio, sodio, potasio, etc. Los que su etiqueta indica únicamente las letras BC no son adecuados para el fuego producido por combustibles sólidos como papel, cartón, madera, etc., ni para el fuego de metales combustibles. Ambos tipos deterioran el equipo eléctrico, ya que dejan una gran cantidad de residuos corrosivos y no son adecuados para fuegos de celulosa.

Los polvos especiales son agentes extintores especialmente diseñados para combatir fuegos de metales combustibles, como magnesio, sodio, potasio, titanio, litio, hafnio, torio, uranio, plutonio, etc.

Los equipos de manguera para el combate de incendios: Es frecuente encontrar instalados en el interior de los hospitales equipos de manguera para el combate de incendios. Estos equipos se encuentran conectados al equipo de bombeo de incendio del edificio, y constan de una válvula de control, una manguera enrollada en un carrete o colgada de soportes especiales y un pitón

Para operarlos, es necesario extender la manguera y abrir la válvula de control que se encuentra en la esquina superior del gabinete. El pitón en la punta de la manguera puede ser de tipo liso y aplicar únicamente un chorro concentrado de agua, o concentrado hasta la formación de neblina. Antes de operarlos, deberá interrumpirse la energía eléctrica en el sector, ya que nunca debe aplicarse agua a equipo eléctrico en tensión.

Es muy importante considerar al utilizarlos, que al igual que algunos tipos de extintores portátiles de incendios, la aplicación de agua en presencia de equipo electrónico puede deteriorarlo irremediablemente, perdiendo el hospital equipo valioso y a veces vital para la prestación de los servicios.

Después de la utilización de la manguera, es necesario desacoplar ésta de la válvula, extenderla, desaguarla y dejarla secar para evitar su deterioro.

Otros sistemas de combate de incendios: Además de los extinguidores portátiles de incendios y los hidrantes interiores con manguera acoplada, existen otros sistemas fijos para el combate de incendios, los que por sus características necesitan un diseño cuidadoso y mantenimiento especial.

El sistema de rociadores automáticos consiste en canalizaciones de tubería de agua presurizadas, localizadas dentro de los ambientes a proteger, que distribuyen uniformemente cabezas de rociadores selladas por fusibles térmicos. Al elevarse la temperatura en el ambiente a causa de un incendio y llegar ésta a la temperatura de rompimiento del fusible, permite éste la salida del agua, que cae sobre el material en combustión en forma de neblina, ayudando a sofocarlo, a la vez que acciona una alarma sonora.

El sistema de rociadores automáticos de incendios bien mantenido, es el mejor sistema de combate de incendios, ya que cuenta con una eficiencia superior al 95% en algunos países.

Los sistemas fijos de detección y combate de incendios con gases extintores son sistemas especializados que se utilizan generalmente para proteger áreas de estufas en cocinas, depósitos de líquidos inflamables peligrosos, equipos electrónicos y archivos de gran valor, que se deteriorarían al aplicárseles otro agente extintor al combatir un incendio. Para la instalación de este tipo de sistemas, deberá realizarse un estudio cuidadoso de cada caso en particular para diseñar el sistema adecuado al mismo, ya que no pueden intercambiarse los equipos.

Estos consisten de uno o varios cilindros conteniendo gas a presión controlados por una electroválvula, que al ser accionada por la señal de uno o más detectores automáticos de incendios, libera el gas dentro del ambiente.

Los gases extintores de incendio utilizados generalmente en estos sistemas, son el anhídrido carbónico y el halón 0, los que necesitan una concentración superior al 8% en el aire para sofocar el fuego. Estas concentraciones pueden resultar peligrosas para el hombre, por lo que generalmente se incluye en el sistema una alarma sonora, para alertar a los ocupantes a evacuar el ambiente cuando inicia la operación.

Almacenaje seguro de líquidos inflamables: Los líquidos inflamables como gasolina, alcoholes, éter, etc., son un riesgo potencial de incendio y explosión, si no se toman las medidas adecuadas en su almacenamiento y manejo.

El almacenaje de grandes cantidades de líquidos inflamables, al no contarse con un depósito de almacenamiento especial para los mismos, deberá realizarse en un local alejado del hospital y sus servicios, construido para evitar la transmisión del fuego.

Este local, deberá contar con una instalación eléctrica especial que no produzca chispas (a prueba de explosión), sistema de detección de incendios que de alarma sonora en el lugar y en el tablero general de alarma, además de que para prevenir la concentración a niveles peligrosos de gases explosivos, deberá contar con buena ventilación o poseer en climas cálidos sistema de acondicionamiento de aire a prueba de

explosión.

Para el combate de incendios, deberá protegerse el local con un sistema de rociadores automáticos de incendio de descarga total (tipo diluvio) capaz de rociar espuma, el número necesario de extintores portátiles de incendio de polvo químico seco ABC y espuma, y colocar inmediato al local un hidrante con manguera.

El almacenaje de los líquidos inflamables deberá realizarse en bidones metálicos especiales, los que deberán siempre mantenerse cerrados E; traslado de líquidos inflamables debe hacerse con equipo especial para evitar los derrames y chispas, debiendo efectuarse el trabajo en forma ordenada y limpia, para evitar la creación y almacenamiento de basuras.

Debe prohibirse terminantemente el fumar en el depósito de combustibles, así como el de realizarse en su interior, cualquier actividad que produzca chispas, llama o temperatura, como la operación de maquinaria eléctrica común, soldadura, cocinar, usar esmeriles, etc.

En el depósito de combustibles deberán instalarse rótulos claramente visibles que indiquen:

TERMINAMENTE PROHIBIDO FUMAR y PELIGRO, DEPOSITO DE LIQUIDOS INFLAMABLES.

Evacuación

La evacuación del hospital, el último recurso de seguridad: Toda evacuación parcial o total de los pacientes, visitantes y empleados del hospital, además de representar un esfuerzo enorme, será imposible realizarla con completa seguridad para los mismos, debido a las condiciones de salud y poca movilidad de los enfermos internados.

La evacuación implica sacar súbitamente a un paciente de su ambiente cómodo y protegido, suspenderle bruscamente los cuidados médicos que necesita, obligarlo a recorrer una gran distancia en condiciones peligrosas, de tensión emocional y a veces de pánico, para trasladarlo hacia un sector generalmente al aire libre, sin protección contra las inclemencias del tiempo, sin comodidad, y sin cuidados ni atención médica. Estas condiciones que son traumatizantes para cualquier persona sana, podrán en un enfermo agravar su salud, o incluso causarle la muerte, especialmente a los pacientes reclusos en terapia intensiva. Por estas razones, la evacuación del hospital deberá llevarse a cabo únicamente como el último recurso en caso de desastre.

Para disponer la evacuación, la autoridad responsable de decidirla deberá considerar detenidamente si el riesgo que atenta contra los pacientes y visitantes, es mayor que las consecuencias del riesgo de sacarlos del hospital.

El manual de seguridad, deberá definir los procedimientos de actuación de todo el personal en caso de ordenarse la evacuación parcial o total del hospital.

Selección de la ruta y de los sitios seguros ate destino para evacuar: Como consecuencia de los trabajos de identificación de riesgos e inspecciones en el edificio llevadas a cabo antes de su elaboración, el manual de seguridad deberá identificar las vías de evacuación de cada local y brindar instrucciones precisas para todo el personal encargado de llevar a cabo la evacuación.

Secuencia de la evacuación: La evacuación de los pacientes y visitantes del hospital deberá ser realizada en forma calmada y ordenada por el personal del hospital. El manual de seguridad deberá asignar tareas específicas a cada miembro del hospital, debiendo disponer personal para que realice las siguientes:

- Propugnar por que se mantenga la calma en todo momento.
- Establecer la jerarquía de mando.
- De acuerdo al número de pacientes a evacuar, asignar suficiente personal de enfermería y apoyo, si es necesario, trasladando a personal de otros sectores del hospital para que colaboren con la evacuación.
- Los pacientes y visitantes que puedan caminar por sus propios medios, deberán ser guiados por personal del hospital hasta los sitios seguros preestablecidos.

- Los pacientes que no puedan movilizarse por sus propios medios, deberán ser transportados hacia el exterior, utilizando cualquiera de las técnicas de movilización de pacientes incapacitados, de acuerdo al personal disponible y a las características de la dolencia del paciente.
- Asignar personal médico, para que disponga la secuencia de evacuación de los pacientes sin capacidad de propia movilización, de acuerdo a su gravedad y las consecuencias de la suspensión del tratamiento.
- Asignar al personal para que realice el conteo, identificación y elaboración del listado de los pacientes evacuados.
- Asignar personal para que prepare y traslade al sitio seguro, los equipos médicos y medicamentos preestablecidos en el manual de seguridad y los que dispongan los médicos a cargo, por ser indispensables para el tratamiento de urgencia de los pacientes evacuados al sitio seguro.
- Solicitar la asistencia de las fuerzas de seguridad para mantener el orden en las áreas exteriores, evitar el ingreso de familiares y curiosos, y mantener libres las vías de acceso al hospital.
- Si fuera necesario, deberá solicitarse el traslado de los pacientes evacuados a otros hospitales, para lo cual se establecieron los contactos anteriores con los mismos y con las entidades encargadas del transporte de heridos. Deberá asignar personal que elabore listados indicando el destino de los pacientes trasladados.

Las vías de evacuación: La etapa de inspección del edificio debe iniciarse por un reconocimiento de las vías de evacuación del mismo, las cuales incluyen todos los pasillos, escaleras y vestíbulos por los que se tenga que transitar hasta llegar a un sitio exterior seguro.

Las vías de evacuación deben ser amplias y siempre estar expeditas y libres de obstáculos que impidan su uso. Debe evitarse en ellas, especialmente en las escaleras, el almacenamiento de mobiliario y equipo.

Las puertas en su recorrido no deben poseer cerradura que permita bloquearlas; deben abrir en el sentido de la salida.

Todos los ambientes susceptibles de ser ocupados por una gran cantidad de personas deberán contar con dos vías de evacuación, amplias, separadas y opuestas.

El uso de las vías de evacuación es necesario ante la ocurrencia de la mayoría de los desastres, cuando por desperfectos o por tornarse peligrosos no pueden utilizarse los elevadores; son vitales en caso de incendio.

El comité de seguridad deberá conocer y aprobar todo diseño de nuevas construcciones, modificaciones y ampliaciones, para establecer los requerimientos de seguridad de las mismas.

Señalización de las vías de evacuación: Las vías de evacuación deben señalizarse e iluminarse en todo su trayecto, con rótulos luminosos perfectamente visibles, conectados a la red eléctrica de emergencia, con el propósito de poder transitarlas de noche durante un apagón, o cuando están oscurecidas por el humo de un incendio.

Para que personas poco familiarizadas con el hospital puedan orientarse en una emergencia, deben colocarse regularmente rótulos que muestren el recorrido por la vía de evacuación hasta la salida, indicando también la localización del equipo de combate de incendios y los pulsadores manuales de alarma de incendios.

Las escaleras de emergencia son el único medio de escape en un incendio. La circulación vertical del hospital depende principalmente de los elevadores, pero éstos pueden verse inutilizados (en condiciones normales) por fallas mecánicas o falta de energía eléctrica, o puede ser peligroso su uso en casos de desastres. Deben siempre de mantenerse accesibles y libres de obstáculos.

En un incendio, la transmisión del fuego hacia los pisos superiores suele producirse por medio de los ductos verticales y escaleras no protegidas, ya que por su configuración éstas actúan en forma igual que una

chimenea, succionando las llamas y los humos hacia los niveles superiores. Si el incendio alcanza las escaleras, llegarán a éstas las altas temperaturas, humos, gases tóxicos e irritantes, anegándolas totalmente, impidiendo la evacuación. Por esa razón, las escaleras deben aislarse de todos los ambientes a quienes sirven, por medio de puertas y ventanas capaces de impedir el ingreso de altas temperaturas, humos y gases. Las puertas de ingreso a las escaleras en todos los niveles deben siempre mantenerse cerradas pero sin bloqueos ni cerraduras. Es necesario también proveer de iluminación y señalización adecuada, conectada al circuito eléctrico de emergencia, todo el trayecto de las escaleras.

Adiestramiento

Entrenar y orientar a todo el personal del hospital: La capacitación y entrenamiento de todo el personal del hospital en los aspectos básicos de seguridad es indispensable para obtener resultados positivos en la implantación del plan de seguridad del hospital.

El ejecutivo de seguridad, deberá elaborar y ejecutar programas de capacitación y entrenamiento general, con el objetivo primario de concientizar a todo el personal sobre la importancia de la seguridad en el hospital.

Estos programas deberán ser establecidos en el hospital en forma permanente, continuada, y con cobertura general a todo el personal del mismo. Deberán ser diseñados para que sean didácticos, interesantes y motivadores, organizando cursillos, charlas, entrenamientos prácticos, simulacros y utilizando afiches y avisos pegados en las paredes.

Para lograr el propósito de tener cobertura general en la instrucción, el ejecutivo de seguridad deberá planificar las actividades para que sean accesibles a todos los turnos de trabajo, procurando que éstas no se disloquen con la llegada de nuevos empleados, para quienes deberá elaborarse un plan especial de entrenamiento.

Organizar simulacros periódicos y evaluarlos: El ejecutivo de seguridad, conjuntamente con los miembros del comité de seguridad del hospital, deberá organizar la realización de simulacros periódicos para poner en práctica las medidas de seguridad adoptadas en el manual de seguridad, y evaluar sus resultados y la capacidad de respuesta del hospital en un desastre. Solamente por medio de la realización de simulacros periódicos, podrá conocerse el grado de capacitación y coordinación del personal del hospital en caso de desastres.

Los simulacros deben realizarse periódicamente: Los simulacros deberán realizarse por lo menos dos veces al año, y deberán planificarse y montarse para que su desarrollo sea lo más cercano posible a las condiciones reales.

Durante la realización de los simulacros, deberá asignarse personal entrenado para observar y calificar la actuación del personal del hospital, y efectuar posteriormente una evaluación conjunta de los resultados del mismo. Esta evaluación deberá comunicarse a todo el personal que participó en el simulacro en sesiones de trabajo, haciéndole ver los aciertos y errores de su actuación.

El informe final de la evaluación del simulacro, deberá ser presentado por el ejecutivo de seguridad al comité de seguridad, quien deberá a su vez, revisar el manual de seguridad del hospital, para modificarlo en caso necesario.

Métodos de análisis para determinar la resistencia sísmica

Prof. Hugo Scaletti

Introducción

Al diseñar una estructura deben satisfacerse diversos criterios de seguridad, funcionamiento adecuado y factibilidad. La seguridad es sin lugar a dudas la primera preocupación del ingeniero estructural, ya que el colapso de la edificación podría significar no sólo grandes pérdidas económicas sino también la pérdida de vidas. Sin embargo, esto no es suficiente: la estructura debe soportar las cargas propias del uso de la edificación y del medio en que se ubica sin que se produzcan deformaciones excesivas u otros efectos indeseables que dificultarían su uso. Por otro lado, para que la estructura pueda ser una realidad el diseño

debe ser factible, no sólo desde el punto de vista constructivo sino también desde un punto de vista económico. Para encontrar un equilibrio adecuado entre estos diversos requerimientos se necesita un conocimiento lo más preciso posible de los efectos internos que se originarán en las diversas componentes de la estructura como resultado de las acciones externas. Este es justamente el propósito del análisis estructural.

Como en otras disciplinas, los métodos de análisis estructural que hoy se consideran adecuados no son necesariamente aquellos que en el pasado eran el "estado del arte". El análisis de estructuras aperticadas puede servir para ilustrar este punto. Cuando H. Cross y otros propusieron sus métodos de distribución de momentos, las herramientas disponibles (e incluso las estructuras analizadas) eran muy distintas de las actuales. No podía pensarse en un proceso de solución de las ecuaciones por eliminación directa, sobre todo por el enorme riesgo de errores de aritmética. Los procesos de relajación resultaban más convenientes, particularmente al expresarse en un lenguaje "ingenieril", como es el caso del método de Cross. Sin embargo, tales procesos tienen una serie de limitaciones. Por ejemplo, su convergencia es muy pobre —prácticamente no se observa— cuando se tienen pórticos con placas sometidos a cargas laterales, situación que es hoy muy frecuente, en contraste con la práctica de hace 50 años, en que predominaban vigas de mayor rigidez que la de los elementos verticales.

La evolución de los métodos de análisis ha sido particularmente notoria en las últimas décadas, con el uso cada vez más frecuente de las computadoras digitales. Actualmente estas herramientas se consideran indispensables para un análisis sísmico apropiado, no tanto por la posibilidad de efectuar los cálculos más rápidamente cuanto porque, al poder considerar mejores modelos, se logran estructuras más eficientes y confiables. Sin embargo, debe reconocerse que por las incertidumbres en las acciones sísmicas e incluso en las propiedades de los materiales, así como por las numerosas hipótesis simplificadoras previas al análisis, los resultados del mejor programa de cómputo son sólo una descripción aproximada de la realidad. Finalmente, es importante recordar que "el análisis es un medio para un fin —no un fin en sí— ya que el objetivo primario del ingeniero es diseñar, no analizar" [18].

Alternativas para el análisis

La mayor parte de los códigos de diseño sismo-resistente permiten, por lo menos para edificios de poca altura, realizar un análisis con fuerzas estáticas "equivalentes". La magnitud de estas fuerzas es función del período fundamental, que se estima con fórmulas empíricas. La distribución de fuerzas en altura se considera lineal. Esto sería correcto si sólo fuera significativo el primer modo, teniendo éste una forma lineal, y si además las masas fueran uniformemente distribuidas. Eventualmente, se considera parcialmente el efecto de los otros modos al concentrar una parte del cortante total en la parte superior. Tales hipótesis resultan extremadamente pobres, particularmente para la determinación de esfuerzos en los diversos elementos. Por otro lado, un análisis dinámico lineal es relativamente simple y económico con las actuales computadoras, disponiéndose además de programas que son de dominio público [27]. Por ello los comentarios siguientes se refieren exclusivamente al análisis dinámico, considerándose también la posibilidad de incluir diversas no-linealidades en el comportamiento.

Desde el punto de vista matemático, el análisis sísmico puede ser considerado como el planteamiento y la solución de un sistema de ecuaciones diferenciales parciales. El problema se simplifica al considerar para la estructura un modelo discreto, es decir con un número finito de grados de libertad, como es habitual en el análisis de estructuras aperticadas. En tal caso, para una estructura cuyo comportamiento se supone lineal:

$$[M] \{\ddot{u}\} + [C] \{\dot{u}\} + [K] \{u\} = \{O\}$$

$$\{u\} = \{x\} + \{1\} u_s$$

$$[M] \{x\} + [C] \{\dot{x}\} + [K] \{x\} = -[M] \{1\} \ddot{u}_s = \{f(t)\}$$

En estas expresiones $\{u\}$ es un vector de desplazamientos absolutos, $\{x\}$ es un vector de desplazamientos relativos y $\{1\}$ representa los desplazamientos de cuerpo rígido correspondientes a un desplazamiento unitario del terreno en la dirección considerada. \ddot{u}_s denota la aceleración del terreno. $[M]$ y $[K]$ son respectivamente matrices de masa y de rigidez. $[C]$ es una matriz de amortiguamiento viscoso; ésta tiene poca relación con la situación real, en la que el amortiguamiento es más bien de tipo histerético, pero es una forma matemáticamente simple de incluir disipación en las ecuaciones diferenciales.

El análisis puede ser enfrentado en diversas formas. Tratándose de un modelo con comportamiento lineal, el método numérico más eficiente consiste en realizar previamente una descomposición modal (véase por ejemplo la referencia [4]):

$$[K] \{x\} = w^2 [M] \{x\}$$

$$\{x(t)\} = \sum c_j(t) \{x_j\}$$

resolviendo luego separadamente las ecuaciones diferenciales desacopladas [7,26]:

$$c_i(t) + 2\zeta_i \dot{c}_i(t) + \omega_i^2 c_i(t) = \eta_i \ddot{u}_S$$

En esta expresión η_i es el factor de participación del modo i para la componente sísmica considerada, $\{x_j\}^T [M] \{x_j\}$

Una integración directa de las ecuaciones diferenciales en su forma original demanda muchas más operaciones, aunque es más fácil de programar. Por ejemplo, refiriéndose al conocido método de Newmark [4] se consideran las aproximaciones:

$$\{x\}_{n+1} = \{x\}_n + [(1-a)\dot{x}_n + a\dot{x}_{n+1}] \Delta t$$

$$\{x\}_{n+1} = \{x\}_n + \Delta t \dot{x}_n + [(1/2-\beta)\dot{x}_n + \beta\dot{x}_{n+1}] (\Delta t)^2$$

con $a > 1/2$ y $\beta \geq 1/4$ ($1/2 + a$)² (habitualmente $a = 1/2$ $\beta = 1/4$). En este caso los subíndices denotan el tiempo, siendo $\{x\}_n$ la aproximación numérica de $x(n \cdot \Delta t)$. Sustituyendo estas expresiones en:

$[M] \{x\}_{n+1} = [C] \dot{\{x\}}_{n+1} = [K] \{x\}_{n+1} = \{f\}_{n+1}$ puede obtenerse la información correspondiente al instante $n+1$ a partir de aquella en el instante n .

También se ha propuesto [28] la integración directa del sistema de ecuaciones diferenciales proyectado en un sub-espacio definido por vectores de Ritz. Estos se obtienen por recursión:

$$[K] \{x_i\} = \{f_i\}$$

$$[K] \{y_i\} = [M] \{x_{i-1}\}$$

siendo los vectores $\{x_i\}$ obtenidos a partir de los $\{y_i\}$ al eliminar las componentes según los vectores previamente determinados y normalizar el resultado con relación a la matriz de masas:

$$c_i = (\{y_i\}^T [M] \{x_i\}) / (\{x_i\}^T [M] \{x_i\})$$

$$\{x_i\} = \{y_i\} - c_i \{x_i\}$$

Eventualmente pueden determinarse valores y vectores característicos del sistema proyectado, que normalmente será de dimensión mucho menor que la del sistema original:

$$([X]^T [K] [X]) \{z\} = \omega_i^2 ([X]^T [M] [X]) \{z\}$$

$$\eta_i = [X] \{z\}$$

En estas últimas expresiones $[X]$ es una matriz cuyas columnas son los vectores de Ritz, $\{z\}$ son las proyecciones de los vectores característicos en el subespacio definido por los vectores $\{x_i\}$.

Cabe también la posibilidad de resolver las ecuaciones en el dominio de frecuencias:

$$(-\omega^2 [M] + i\omega [C] + [K]) \{u\} = \{f\}$$

En esta expresión $\{u\}$ y $\{f\}$ denotan las transformadas de los correspondientes vectores. A pesar de los eficientes algoritmos para realizar transformadas de Fourier discretas (FFT) [8] esta alternativa es costosa y está limitada a situaciones para las que puede ser ventajoso realizar un análisis dinámico con subestructuras [24]. Como excepción puede mencionarse la determinación de la respuesta estacionaria a una excitación armónica, situación que puede presentarse al estudiar experimentalmente la respuesta de un edificio y en la que la única frecuencia a considerar es aquella de la excitación:

$$(-\omega^2 [M] + i\omega [C] + [K]) \{u\} = \{f_0\}$$

Por otro lado, si se plantea un modelo con comportamiento no-lineal el único camino posible es la integración directa de las ecuaciones diferenciales de equilibrio. Para ello pueden usarse una diversidad de

métodos; para sistemas de orden grande los procesos más simples –como el de la diferencia central–aún siendo condicionalmente estables resulta más eficientes. Refiriéndose a este proceso (no incluyendo amortiguamiento viscoso):

$$[M] \{x\}_n = \{f(t_n)\} - \{f\}_n$$

$$\{X\}_{n+1/2} = \{X\}_{n-1/2} + \text{ot } \{x\}_n$$

$$\{X\}_{n+1} = \{x\}_n + \text{ot } \{x\}_{n+1/2}$$

donde $\{f\}_n$ denota las fuerzas que están en equilibrio con los esfuerzos que resultan del estado de desplazamiento $\{x\}_n$ (que en el análisis lineal serían $[K] \{x\}_n$).

Análisis dinámico lineal

Como se mencionó, el análisis dinámico lineal puede ser realizado con mayor eficiencia si se determinan previamente las frecuencias naturales y modos de vibración. Luego de utilizar esos resultados para obtener las ecuaciones diferenciales desacopladas, caben dos posibilidades:

Análisis "tiempo–historia".

A partir del registro (de una o más componentes) de un sismo específico pueden integrarse las ecuaciones diferenciales desacopladas [16] para obtener las componentes correspondientes a cada modo, en función del tiempo, $c_i(t)$. Combinando apropiadamente tales componentes se obtienen historias para los desplazamientos asociados a cada grado de libertad del modelo:

$$\{x(t)\} = \sum c_i(t) \phi_i$$

y a partir de estos resultados se determinan otros efectos, como fuerzas cortantes en los entresijos, momentos flectores en los elementos, etc. Este procedimiento es en general costoso, ya que demanda muchas operaciones y una capacidad de memoria para almacenar resultados intermedios que fácilmente excede la memoria directa de la computadora. Además, para obtener valores suficientemente conservadores, debería repetirse para una colección de posibles registros de aceleraciones del terreno. En consecuencia, esta alternativa no es práctica para el trabajo de oficina. Sin embargo, puede ser indispensable para establecer una base de comparación con otros procesos más simples o bien para efectuar un análisis preliminar —lineal y elástico— de los efectos de un sismo dado sobre una estructura que debe evaluarse.

Análisis espectral

Resolviendo las ecuaciones diferenciales desacopladas pueden obtenerse los máximos valores de las componentes $c_i(t)$. Estos máximos también pueden expresarse en la forma:

$C_{i\text{máx}} = \sum S_d = \sum S_a / \omega_i^2$ donde S_d y S_a son respectivamente los valores de los espectros de desplazamientos y de pseudo-aceleraciones obtenidos de \ddot{u}_s para el correspondiente período, $T_i = 2\pi/\omega_i$. A partir de estos resultados se calculan desplazamientos, fuerzas cortantes, momentos u otros efectos para cada modo; por ejemplo:

$$\{X_{ij}\} = \sum S_d \{\phi_{ij}\}$$

Los efectos máximos obtenidos para cada modo no ocurren simultáneamente; por otro lado, no se tiene información sobre la diferencia de fase entre los modos. Por lo tanto, los resultados previamente obtenidos deben combinarse con hipótesis conservadoras para estimar los máximos efectos de cada tipo. Para la combinación modal el criterio más frecuente es el de la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de los valores modales. Otros procedimientos han sido también utilizados [2, 15, 17, 21].

Como herramienta de análisis en una oficina de diseño esta segunda alternativa es mejor, no solamente por requerir mucho menos operaciones, sino sobre todo por permitir la consideración de un espectro de diseño conservador, sin los picos y valles típicos del espectro para un sismo específico.

Modelos seudo–tridimensionales

El planteamiento de un modelo apropiado es fundamental. Por un lado, el modelo debe considerar todas las características de la estructura que influyen significativamente en la respuesta. De otro lado, debe permitir determinar los efectos de interés. Aún con los mejores programas se requiere cierto criterio ingenieril para hacer aproximaciones razonables, que permitan adaptarse a las hipótesis del programa sin sacrificar lo esencial.

Para la mayor parte de las estructuras de hospitales pueden plantearse modelos compuestos por vigas y columnas (o placas) de eje recto y de sección constante. Al realizar análisis estáticos para cargas verticales es frecuente suponer que las vigas y columnas conforman pórticos planos, que son analizados en forma independiente. Tal simplificación no es factible al considerar la distribución de fuerzas sísmicas entre los distintos pórticos, aún cuando éstas se traten como acciones estáticas. Estrictamente, se requeriría analizar la estructura como un pórtico espacial. Sin embargo las deformaciones axiales son poco importantes, es práctica habitual realizar el análisis con un modelo seudo-tridimensional, como se describe a continuación.

En el modelo seudo-tridimensional se supone a la estructura como un ensamble de pórticos planos. Las rigideces de cada pórtico en su plano son mucho mayores que aquellas en la dirección transversal, que se consideran despreciables. Igualmente se desprecian las rigideces torsionales de todos los elementos. Los pórticos se suponen interconectados solamente por las losas de entrepiso, que actúan como diafragmas infinitamente rígidos en su plano. Como consecuencia, no se consideran deformaciones axiales en las vigas, es decir se supone que en cada pórtico todos los mides de un piso tienen el mismo desplazamiento horizontal. Es también habitual despreciar las deformaciones de corte en las vigas, en contraste con los elementos verticales (columnas o placas), para los que se consideran deformaciones de flexión, axiales y de corte. Las fuerzas de inercia se consideran concentradas en los niveles que corresponden a las losas de entrepiso. Con estas hipótesis puede plantearse un modelo numérico con tres grados de libertad por piso [22, 27].

La formulación más común corresponde al método de rigideces. Para cada pórtico se suponen como incógnitas primarias los desplazamientos horizontales de cada nivel y los giros y desplazamientos verticales de cada nudo. A partir de la matriz de rigidez, ensamblada en la forma habitual, se obtiene la matriz de rigidez lateral, condensando estáticamente todos los grados de libertad no asociados a desplazamientos horizontales. Llamando $\{v\}$ a un vector que incluye los desplazamientos verticales y giros y $\{u\}$ a los desplazamientos horizontales.

$$[K_{vv}] \{v\} + [K_{vu}] \{u\} = \{O\}$$

$$[K_{uv}] \{v\} + [K_{uu}] \{u\} = \{f\} \text{ y formalmente:}$$

$$\{v\} = [K_{vv}]^{-1} [K_{vu}] \{u\}$$

$$([K_{uu} - [K_{uv}] [K_{vv}]^{-1} [K_{vu}]) \{u\} = \{f\}$$

$$[K_L] = [K_{uu}] - [K_{uv}] [K_{vv}]^{-1} [K_{vu}]$$

En lo anterior está implícito que sólo se consideran las fuerzas de inercia en dirección horizontal.

La hipótesis de losas infinitamente rígidas en su plano determina una relación geométrica entre los desplazamientos de todos sus puntos, que es la base para efectuar una condensación cinemática de las matrices de rigidez lateral ya obtenidas. Así, para el desplazamiento horizontal del pórtico i en el nivel j puede escribirse:

$$u_{ij} = U_{oj} \cos \alpha_i + V_{oj} \sin \alpha_i + r_{ij}$$

donde U_{oj} y V_{oj} son las componentes de desplazamiento del centro de masas (u otro punto de referencia) en el nivel j al define la orientación del pórtico con referencia al eje X y r_{ij} es la distancia del punto de referencia (X_{oj}, Y_{oj}) a un punto en el alineamiento del pórtico (x_i, y_i) :

$$r_{ij} = (X_i - X_{oj}) \sin \alpha_i - (y_i - y_{oj}) \cos \alpha_i$$

Grupando las expresiones correspondientes a cada nivel del pórtico i se obtiene:

$$\{u_i\} = [G_i] \{U_{0i}\}$$

donde $\{u_i\}$ es el vector de desplazamientos laterales del pórtico i , $\{U_0\}$ agrupa los desplazamientos de los centros de masa. Por otro lado, las fuerzas aplicadas por la losa sobre cada pórtico pueden ser sustituidas por otras, estáticamente equivalentes, aplicadas en el centro de masas:

$$\begin{aligned} \{f\} &= ? ([G_i]^T \{f_i\}) \\ &=? [G_i] [K_{L_i}] \{U_i\} \\ &=? ([G_i] [K_{L_i}] [G_i]) \{U_0\} \end{aligned}$$

de donde:

$[K]= ? ([G_i]^T [k_{L_i}] [G_i])$ es la matriz de rigidez del modelo (seudo-tridimensional) con tres grados de libertad por piso.

Por otro lado, si las componentes de desplazamiento $\{U_0\}$ se refieren a los centros de masa, es apropiado considerar una matriz de masa diagonal. Asociadas a los grados de libertad traslacionales se tienen las masas m_j del nivel; para el otro grado de libertad de cada nivel debe considerarse el correspondiente momento de inercia. Habitualmente se concentran en cada piso las masas de las losas y una fracción de la sobrecarga, así como la mitad de las masas de muros, columnas y placas en los dos niveles adyacentes. Puede anotarse que el utilizar matrices de masa diagonales no es estrictamente consistente con las aproximaciones implicadas en la determinación de las rigideces; sin embargo, los resultados son similares a los que se obtendrían con aproximaciones consistentes y el esfuerzo de cómputo es mucho menor.

Finalmente, no es en este caso conveniente formar la matriz de amortiguamiento $[C]$, ya que resulta más simple introducir directamente la disipación en las ecuaciones diferenciales desacopladas.

Un defecto del análisis seudo-tridimensional está en la incompatibilidad de los desplazamientos axiales obtenidos para las columnas. Como los grados de libertad asociados a estos desplazamientos se condensan estáticamente en forma independiente para cada pórtico, se obtienen resultados distintos para dos pórticos que comparten una misma columna. Este defecto es particularmente notorio en estructuras muy esbeltas, poco frecuentes en hospitales, en las que deformaciones axiales que se producen por las acciones sísmicas pueden ser muy importantes. Si tal fuera el caso, sería necesario plantear inicialmente un modelo con seis grados de libertad por nudo, efectuando luego condensaciones cinemáticas para expresar los desplazamientos horizontales en términos de aquellos de los centros de masa y posteriormente condensaciones estáticas de los grados de libertad a los que se asocian fuerzas de inercia poco significativas. Algunos programas multipropósito permiten realizar un análisis de este tipo [3], pero a un costo mucho mayor que con el modelo seudo-tridimensional.

Por otro lado, en el análisis dinámico es muy frecuente despreciar los efectos rigidizantes de la tabiquería. Esto conduce a la determinación de un periodo fundamental mucho mayor que el real; los periodos correspondientes a los modos superiores son comparativamente menos afectados [19]. En los códigos se intenta corregir este defecto exigiendo, por ejemplo, que el periodo considerado no sea mayor que 1.4 veces el dado por las fórmulas empíricas [5] o que el cortante en la base no sea menor que 80% del que se utilizaría para un análisis estático [17], es decir, el obtenido con un periodo calculado con fórmulas empíricas que si incluyen el efecto rigidizante de la tabiquería. Sin embargo esto no es suficiente: las formas de los modos de vibración son también afectadas, asemejándose más a los de una viga de corte a medida que se considerará más tabiquería. Contrariamente a lo que podría suponerse, los cortantes en los extremos superior e inferior de las placas crecen a medida que se agrega más tabiquería, observándose en cambio una reducción del esfuerzo cortante promedio en ésta [19]. Podría argumentarse que el análisis ignorando los efectos de la tabiquería corresponde a una situación límite para la que se supone que los elementos no estructurales han perdido toda su rigidez; sin embargo, esto ocurriría después que diversos elementos estructurales hayan sido esforzados por encima de los valores considerados para el diseño. Por lo tanto, es indispensable que el diseñador considere estos efectos, bien sea en el análisis o en detalles de diseño que resulten en una separación efectiva de la tabiquería.

No-linealidad en la respuesta sísmica

Aunque se espera que las edificaciones resistan sismos leves sin daños visibles y esencialmente dentro de un rango de deformaciones para el que las aproximaciones lineales son adecuadas, para sismos moderados pueden ser tolerables algunos daños en elementos no estructurales. En caso de sismos muy severos se acepta, incluso para las estructuras más importantes, que las componentes estructurales y no estructurales

tengan daños de consideración, aunque sin llegar a colapsar, lo que significa necesariamente un comportamiento altamente no-lineal.

Los códigos de diseño sismo-resistente especifican métodos de análisis basados en hipótesis de comportamiento elástico y lineal solamente para facilitar el trabajo con las herramientas *hardware* y *software* comúnmente disponibles. Sin embargo, indirectamente se reconoce el comportamiento no lineal en las reducciones por *ductilidad* de los espectros de diseño y en la exigencia de detalles de refuerzo que permitan a la estructura alcanzar grandes deformaciones, y disipar mucha energía, sin colapsar.

La no-linealidad en el comportamiento de una estructura sometida a acciones sísmicas se debe principalmente al comportamiento inelástico y no lineal de los materiales que la constituyen. Refiriéndose a una estructura aperturada de concreto armado, son importantes las no linealidades en las relaciones esfuerzo – deformación del concreto, el agrietamiento de este material, el desprendimiento del revestimiento y la degradación en la adherencia del refuerzo. Para estructuras muy esbeltas podría ser también necesario considerar no linealidades geométricas, v.g. el planteamiento de las ecuaciones de equilibrio con referencia a la *geometría* deformada. En situaciones extremas podrían tenerse alteraciones en las masas y rigideces como consecuencia de un colapso parcial, golpes con estructuras adyacentes, etc.

Las no-linealidades en el suelo sobre el que se cimienta la estructura solo tienen importancia a un nivel "primario", es decir, en cuanto afectan la excitación sísmica que llega a la estructura. Los efectos de interacción suelo estructura son poco importantes en edificaciones como las requeridas en hospitales, excepto si se trata de estructuras desusadamente rígidas sobre cimentaciones muy flexibles [23].

Es evidente que, aún considerando parcialmente los aspectos antes mencionados, un análisis no lineal presenta numerosas dificultades teóricas y prácticas.

Modelos para el análisis dinámico no lineal

Los modelos que han sido propuestos en relación al análisis sísmico no lineal pueden agruparse en tres categorías, dependiendo del nivel al que se consideran las no linealidades. En orden creciente de dificultad y costo, el comportamiento no lineal puede incluirse en:

- a. Las rigideces laterales de cada pódico.
- b. Las relaciones momento – curvatura para los elementos.
- c. Las ecuaciones de equilibrio y compatibilidad y las leyes constitutivas de cada material a nivel diferencial.

La mayor parte de los modelos del primer grupo corresponden a vigas de corte. Inicialmente propuestos para sistemas con un solo grado de libertad [25], las mismas ideas han sido aplicadas a sistemas con 3 grados de libertad por piso [1] en forma similar al análisis lineal seudo-tridimensional. Diversas relaciones fuerza cortante – distorsión han sido utilizadas, basadas en fórmulas semiempíricas [1] o en los resultados de análisis estáticos no lineales para los pórticos planos [20]. Este tipo de modelo permite considerar diversos efectos no lineales, al menos cualitativamente, con muy poco esfuerzo de cómputo. Sus principales desventajas están en las dificultades para estimar apropiadamente las rigideces de entrepiso y en que por lo general no es factible determinar con precisión los efectos a nivel local.

Al segundo grupo corresponden una serie de modelos de *rótulas plásticas*. Cuando las relaciones momento–curvatura se suponen elastoplásticas, las secciones que alcanzan el momento de fluencia no son capaces de soportar momentos adicionales, actuando entonces para cualquier incremento de cargas como si se tratara de rótulas. Con tales hipótesis el análisis puede realizarse sin mucha dificultad y a un costo razonable [6,25]. Los modelos de este tipo pueden ser mejorados considerando para los elementos diagramas momento–curvatura bilineales (lo que puede, por ejemplo, lograrse superponiendo un comportamiento lineal a otro elastoplástico) o eventualmente multilineales. Los detalles de la formulación pueden encontrarse en diversas referencias, v.g. [14]. Este tipo de modelos pueden también utilizarse para un análisis tridimensional [9].

En el tercer grupo podrían incluirse diversos modelos *de fibras*. Los elementos se dividen en segmentos, para cada uno de los cuales pueden suponerse interpolaciones polinómicas de los desplazamientos. Puede también admitirse que las secciones planas antes de la deformación siguen siendo planas después de ésta. En consecuencia, conociendo los desplazamientos en los nudos pueden obtenerse (en forma aproximada) las deformaciones en cualquier sección transversal. Esta información se combina con las leyes

esfuerzo–deformación de cada material, para obtener módulos tangentes o esfuerzos y a partir de estos resultados las flexibilidades y rigideces o las fuerzas desequilibradas, según sea necesario para el algoritmo utilizado en la solución [10,13]. Un análisis de este tipo es por regla general extremadamente costoso; no es pues la herramienta del diseñador sino más bien la del investigador. Por el momento, el uso de estos modelos se limita al análisis de pórticos planos considerados aisladamente.

Estudio de un caso: el hospital Olive View

Para estudiar la aplicabilidad de los distintos procesos puede ser útil reanalizar estructuras que han sido sometidas a sismos severos e interpretar los daños observados con base en los resultados del análisis. En los párrafos siguientes se hace referencia a resultados de análisis lineales y no lineales realizados para una estructura de análisis lineales y no lineales realizados para una estructura hospitalaria que ha sido extensamente estudiada: el Centro Médico Olive – View. La información ha sido tomada de las referencias [11] y [12].

El edificio principal de este hospital era una estructura de 5 pisos, de concreto armado. Los cinco pisos superiores estaban conformados por cuatro alas dispuestas ortogonalmente alrededor de un patio central; la planta baja tenía un área mayor y estaba parcialmente por debajo del nivel del terreno, aunque separada de los muros de contención por una junta sísmica. La estructura estaba constituida básicamente por losas planas de 20 ó 25 cm de espesor, con capiteles, soportadas por columnas cuadradas, de 50 cm x 50 cm. La mayor parte de las columnas tenían refuerzo en espiral, excepto por algunas columnas en el primer nivel, que eran estribadas. Se tenían placas en los cuatro pisos superiores; no así en los dos inferiores. En estos niveles las losas fueron diseñadas para actuar con las columnas como un pórtico espacial capaz de resistir momentos. Sin embargo, la rigidez y resistencia de estos dos pisos era apreciablemente menor que la del resto del edificio. Excepto por estos defectos de estructuración y la inadecuada consideración del refuerzo lateral en algunas columnas, puede decirse que se cumplían estrictamente las normas vigentes.

Durante el terremoto de San Fernando (1971) se produjeron en esta estructura daños de tal magnitud que obligaron a su posterior demolición. Los daños se concentraron en los dos pisos inferiores; en la parte superior los daños se concentraron en los dos pisos inferiores; en la parte superior los daños fueron comparativamente poco importantes. En el primer nivel el desplazamiento relativo después del sismo fue del orden de 25 cm y las separaciones con los muros de contención y otras estructuras fueron insuficientes. En el segundo nivel se tuvieron desplazamientos relativos mucho mayores, de hasta 75 cm. Una parte de la estructura del primer nivel colapso como resultado de la falla frágil de columnas con insuficientes estribos. Sin embargo, la mayor parte de las columnas, con refuerzo en espiral, tuvieron ductilidad suficiente, excepto en algunas zonas con defectos constructivos. También se observaron numerosas fallas por punzonamiento en las losas de los dos niveles inferiores. Desafortunadamente, no se obtuvieron registros del sismo en las proximidades del hospital.

Los análisis dinámicos lineales fueron realizados con un modelo seudo–tridimensional [27], que permitió considerar la configuración de la estructura a un nivel de detalle muy superior al que se podría tener con cualquier programa de análisis no lineal disponible. No se incluyeron las rigideces de tabiques, mayormente ubicados en los pisos superiores y poco importantes en relación a las placas. Al igual que para los análisis no lineales, los registros de aceleraciones del terreno utilizados fueron deducidos a partir de los obtenidos en otras localidades afectadas por el mismo sismo. Los resultados mostraron claramente que se producirían fallas por corte en las columnas con estribos, aunque subestimaron grandemente los desplazamientos laterales máximos. Puede concluirse que, aún cuando el modelo lineal fue insuficiente para cuantificar diversos efectos, sí puso en evidencia las principales deficiencias de la estructura.

Los análisis no lineales fueron realizados con el modelo bidimensional, para una de las cuatro alas del hospital considerada aisladamente, ignorando efectos de torsión. Para cada elemento se definieron aproximaciones bilineales de los diagramas momento – curvatura. Cabe mencionar que los resultados obtenidos con este tipo de análisis son muy sensibles a los detalles del modelo utilizado; en consecuencia se requiere mucho criterio y experiencia para plantear modelos apropiados. Los máximos cortantes obtenidos para el nivel inferior con distintos posibles registros fueron similares, mucho menores que los dados por el correspondiente análisis dinámico lineal, pero aproximadamente cuatro veces aquellos requeridos por las normas para análisis con cargas estáticas *equivalentes*. Esto corresponde a la resistencia última de las columnas, ya que el modelo predijo adecuadamente la formación de un mecanismo en los pisos inferiores. Por otro lado, la formación de este mecanismo motivó que los correspondientes desplazamientos relativos fueran muy sensibles a las características de la vibración del terreno. Los análisis no–lineales realizados también subestimaron grandemente los desplazamientos; sólo con uno de los registros considerados el modelo predijo el impacto de la estructura con el muro de contención y otras estructuras, circunstancia que

es indispensable para explicar los mayores desplazamientos observados en el segundo nivel. En conclusión, los resultados de los análisis no lineales sólo pueden ser calificados como correctos en lo cualitativo, aunque indudablemente reflejan la situación real mejor que el modelo lineal.

Es evidente que la predicción precisa de la respuesta sísmica de una estructura de concreto armado requiere de técnicas muy elaboradas. Los programas de análisis dinámico hoy disponibles pueden ser herramientas muy útiles, más aún cuando se trata de evaluar la capacidad resistente de una estructura dañada por un sismo severo y eventualmente determinar la eficacia de distintas alternativas de reforzamiento. Sin embargo, en todos los métodos propuestos hay una serie de limitaciones y simplificaciones que demandan un estudio muy cuidadoso de la información a utilizar e igualmente una interpretación adecuada de los resultados obtenidos.

Por un lado, el análisis lineal es indudablemente más económico y puede ser utilizado fácilmente para analizar estructuras complejas. A pesar de no obtenerse resultados correctos para las deformaciones y esfuerzos que se producirían en un sismo severo, se obtiene siempre valiosa información con relación al comportamiento en la etapa inicial y a las posibles deficiencias en algunos de los elementos.

Por otro lado, el análisis dinámico no lineal proporciona información más precisa con relación a desplazamientos, distorsiones de entrepiso, esfuerzos máximos y deformaciones plásticas. Sin embargo, las dificultades prácticas en su aplicación son considerables y por el momento no corresponde a la práctica habitual de una oficina de diseño.

Referencias

1. Anagnostopoulos, S. A., "Nonlinear Dynamic Response and Ductility Requirements of Building Structures Subjected to Earthquakes", Research Report R72-54, Massachusetts Institute of Technology, C.E. Department, Boston, 1972.
2. Applied Technology Council, Tentative Provisions for the Development of Seismic Regulations for Buildings", National Science Foundation y National Bureau of Standards, 1978.
3. Bathe, K.J. y Wilson, E.L., "SAP IV – A Structural Analysis Program for Static and Dynamic Response a Linear Systems". Earthquake Engineering Research Center Report No. 73-11, Universidad de California Berkeley, 1973.
4. Bathe, K.J. y Wilson, E.L., "Numerical Methods in Finite Element Analysis", Prentice Hall Inc., Englewood Cliffs, NJ., 1976.
5. "Código Colombiano de Construcciones Sísmo-Resistentes", Bogotá, 1984.
6. Clough, R.W. y Benuska K.L., "Federal Housing Administration Study of Seismic Design Criteria for High-Rise Buildings", HUD TS-3, 1966.
7. Clough, R.W., y Penzien, J., "Dynamics of Structures", McGraw, Hill Book Company, N.Y., 1975.
8. Dahquist, G. y Björck, A., "Numerical Methods", Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1974.
9. Kobori, T., Minai, R. y Fujiwara, T., "Earthquake Response of Frame Structures Composed of Inelastic Members", Quinta Conferencia Mundial de Ingeniería Sísmica, Roma, 1974.
10. LaTona, R.M. y Roesset, J.M., "Non-Linear Analysis of Building Frames for Earthquake Loading". Research Report R70-65, Massachusetts Institute of Technology, CE. Department, Boston, 1970.
11. Mahin, S. y Bertero, V. "An Evaluation of Some Methods for Predicting Seismic Behavior of Reinforced Concrete Buildings.". Earthquake Engineering Research Center Report No 75-5, Universidad de California, Berkeley, 1975.
12. Mahin, S., Collins, R, Chopra, A. y Bertero, V. "Response of the Olive View Hospital Main Building During the San Fernando Earthquake". Earthquake Engineering Research Center, Universidad de California, Berkeley, 1975.

13. Mark, K, "Nonlinear Dynamic Response of Reinforced Concrete Frames". Tesis Doctoral, Massachusetts Institute of Technology, C.E. Department, Boston, 1974.
14. Meek, J.L., "Matrix Structural Analysis", McGraw Hill Book Company, N.Y., 1971.
15. Newmark, N.M. y Rosenblueth, E., "Fundamentals of Earthquake Engineering", Prentice Hall Inc., Englewood Cliffs, N.J., 1971.
16. Nigam, N.C. y Jennings, P.C., "Digital Calculation of Response Spectra from Strong Motion Earthquake Records", Earthquake Engineering Research Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, 1967.
17. "Normas de Diseño Sismo-Resistente", Ministerio de Vivienda; y Construcción, Lima, 1977.
18. Norris, C.H. y Wilbur, J.B., "Elementary Structural Analysis", McGraw Hill Book Company, N.Y., 1960.
19. Pflücker, M., Efectos de la Tabiquería en el Comportamiento Dinámico de Estructuras Aporticadas", Tesis de Ingeniero Civil, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, 1988.
20. Piqué, J.R., "On the Use of Simple Models in Nonlinear Dynamic Analysis". Tesis Doctoral Massachusetts Institute of Technology, C.E. Department, Boston, 1976.
21. Piqué, J. R y Echarry, A., "A Modal Combination for Dynamic Analysis of Reinforced Concrete Frames". Novena Conferencia Mundial de Ingeniería Sísmica, Tokyo, 1988.
22. Roesset, J.M., Computer Solution of Dynamic Problems", cap. 8 de "Earthquake Engineering", Massachusetts Institute of Technology, Boston, 1972.
23. Roesset, J.M., "A Review of Soil-Structure Interaction", Seismic Safety Research Program,, Lawrence Livermore Laboratory, 1980.
24. Scaletti, H., "Frecuency Analysis of Structures with Foundation Interaction", Tesis de Maestría, Massachusetts Institute of Technology, C.E. Dept., Boston, 1975.
25. Veletsos, AS., y Newmark, N.M., "Effect of Inelastic Behavior on the Response of Simple Systems to Earthquake Motions", Segunda Conferencia Mundial de Ingeniería Sísmica, Tokyo, 1961.
26. Wiegel, R.L. (editor), "Earthquake Engineering", Prentice Hall Inc., Englewood Cliffs, NJ., 1970.
27. Wilson, E.L., Hollings, J.P. y Dovey, H.H, "Three Dimensional Analysis of Building Systems (Extended Version)". Earthquake Engineering Research Center Report N° 75-13, Universidad de California, Berkeley, 1975.
28. Wilson, EL., "New Approaches for the Dynamic Analysis of Large Structural Systems", Earthquake Engineering Research Center Report N° 82 04, Universidad de California, Berkeley, 1982.

Análisis de riesgo en el diseño de hospitales en zonas sísmicas

Introducción

Principios de ingeniería estructural en zonas sísmicas

Problemas de diseño arquitectónico de hospitales en zonas sísmicas

Normas de diseño sismorresistente en América latina: limitaciones

Concreto armado en zonas sísmicas

Reducción de riesgos en componentes no estructurales de los hospitales para casos de terremoto

Criterios de diseño de líneas vitales de hospitales en zonas sísmicas

Consideraciones sobre seguridad en el diseño sísmico de hospitales

Prevención de los incendios en hospitales

Métodos de análisis para determinar la resistencia sísmica