

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 sísmico 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. Desde 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:

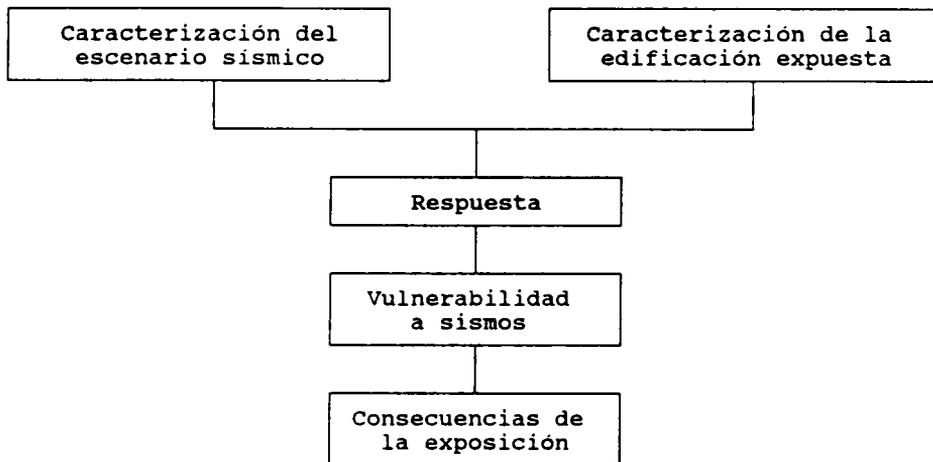
- a) No se poseen aún teorías generales en base a las cuales se puedan hacer predicciones confiables sobre futuros sismos. De una manera general, la predicción debe verse como una probabilidad condicional a ser revisada a medida que se produce nueva información.¹ Para ello se requiere como mínimo:
 - (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 aún 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 aislados², la estrategia más eficiente para limitar las pérdidas materiales, es la de proyectar y construir utilizando racionalmente los conocimientos de la Ingeniería Sismorresistente.
- 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.

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.

La secuencia anterior es válida, tanto para edificaciones aisladas 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).

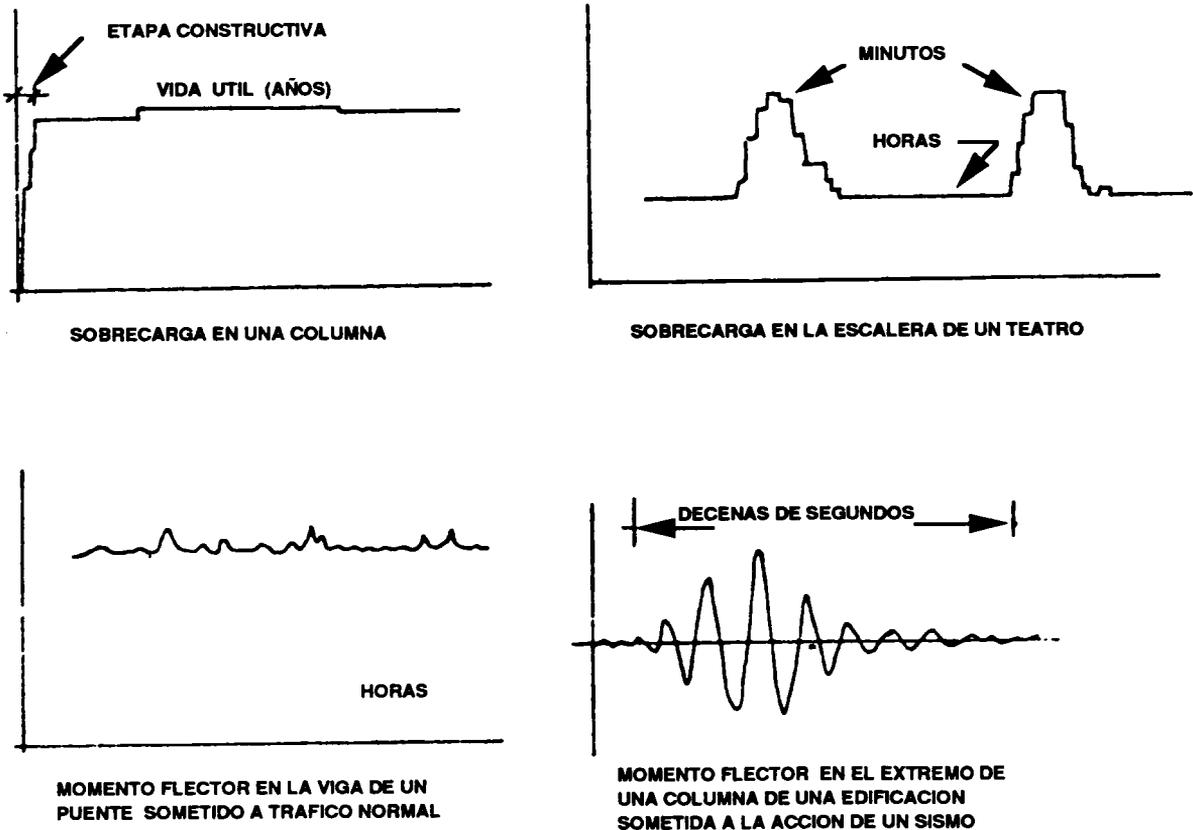


Figura 1. Sobrecargas: variaciones temporales.

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 1º 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.

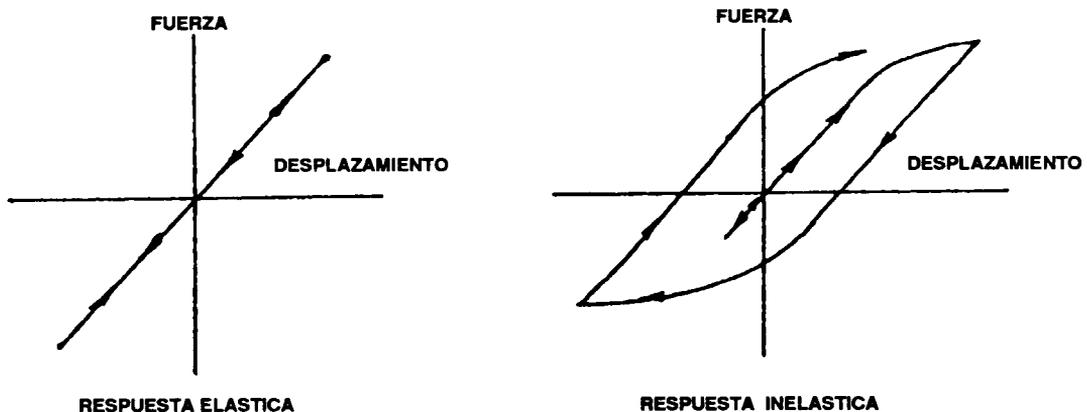


Figura 2. Respuesta de sistemas elásticos e inelásticos.

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 rios. Las pilas de este puente rotaron bajo la acción de un sismo y el tablero simplemente apoyado del lado derecho se hundió en el rio.

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.

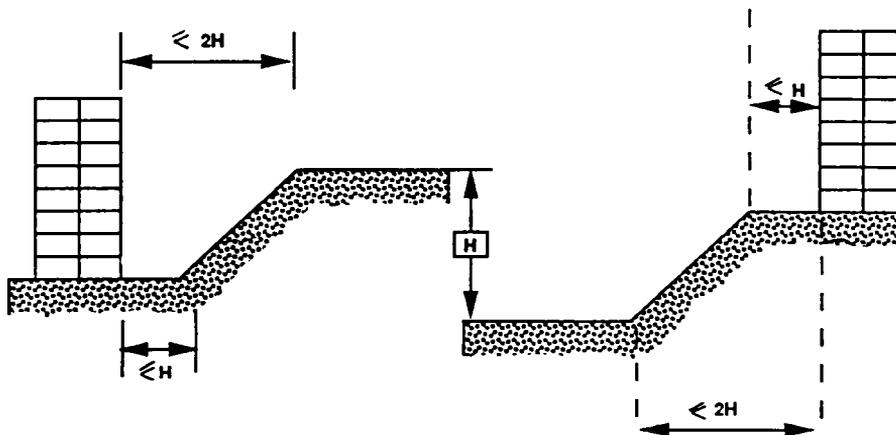


Figura 3. Condiciones que requieren la evaluación de la estabilidad de taludes.

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:

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

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 α , 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.

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

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

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

Ubicación de la localidad	Ao (2)	Coeficiente de Importancia α	$A'o = \alpha \cdot Ao$	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)	0,30g	1,0	0,30g	0,0021	0,100	0,190	473
		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)	0,15g	1,0	0,15g	0,0021	0,101	0,192	496
		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.

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

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

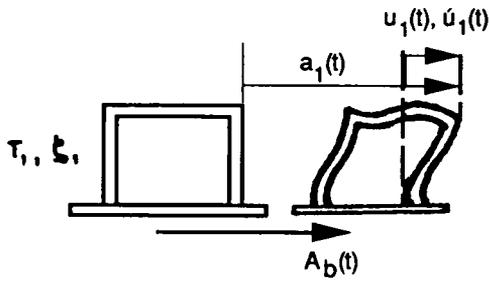
Los espectros describen la máxima respuesta de estructuras idealizadas como un grado de libertad, sometidas a la acción de un movimiento sísmico (acelerograma) conocido. El procedimiento a seguir para la determinación rigurosa de los espectros se ilustra en la Figura 4. Los espectros para el diseño (Figura 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.

Nivel de tensiones	Tipo y Condición de la Estructura	Porcentaje de Amortiguamiento Crítico (%)
Tensiones de servicio que no excedan un 50% de las cedentes	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 cedencia	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 de la pretensión	7 a 10
	d) concreto armado;	7 a 10
	e) miembros de acero apernados; estructuras de madera	10 a 15

Tabla 3. Valores de amortiguamiento.

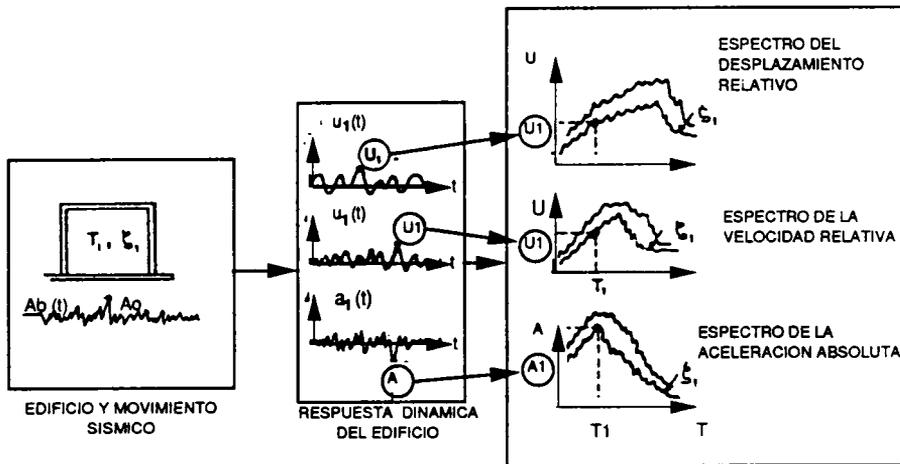
El valor de la aceleración máxima del terreno, representado por A_0 en las Figuras 4b y 4d, se obtiene en los términos explicados en la sección anterior. De una manera general, las condiciones del subsuelo influyen en los contenidos frecuenciales del movimiento y por tanto en la forma de los espectros. 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 \mathcal{J} . 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 obtenida para diferentes valores de \mathcal{J} , así como formas típicas de los espectros de respuesta elástica promedio para tres condiciones de subsuelo.

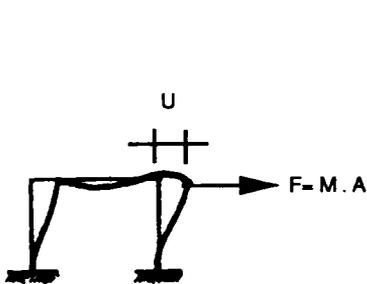


- $A_b(t)$ = Aceleración de la base
- $u_1(t)$ = Desplazamiento del edificio relativo a su base
- $\dot{u}_1(t)$ = Velocidad del edificio relativa a su base
- $a_1(t)$ = Aceleración absoluta del edificio, dada por la suma de la aceleración relativa y la aceleración de la base

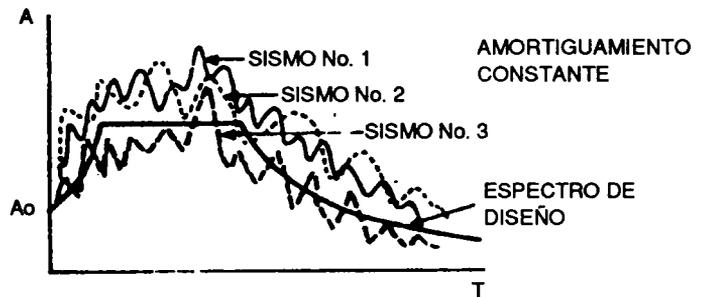
a) EDIFICIO DE UN PISO IDEALIZADO COMO UN SISTEMA DE UN GRADO DE LIBERTAD, DE PERIODO T_1 Y AMORTIGUAMIENTO RELATIVO



b) DETERMINACION DE LOS ESPECTROS DE RESPUESTA



c) FUERZA LATERAL DE DISEÑO



d) ESPECTRO MEDIO PARA EL DISEÑO

Figura 4. Espectros de respuesta.

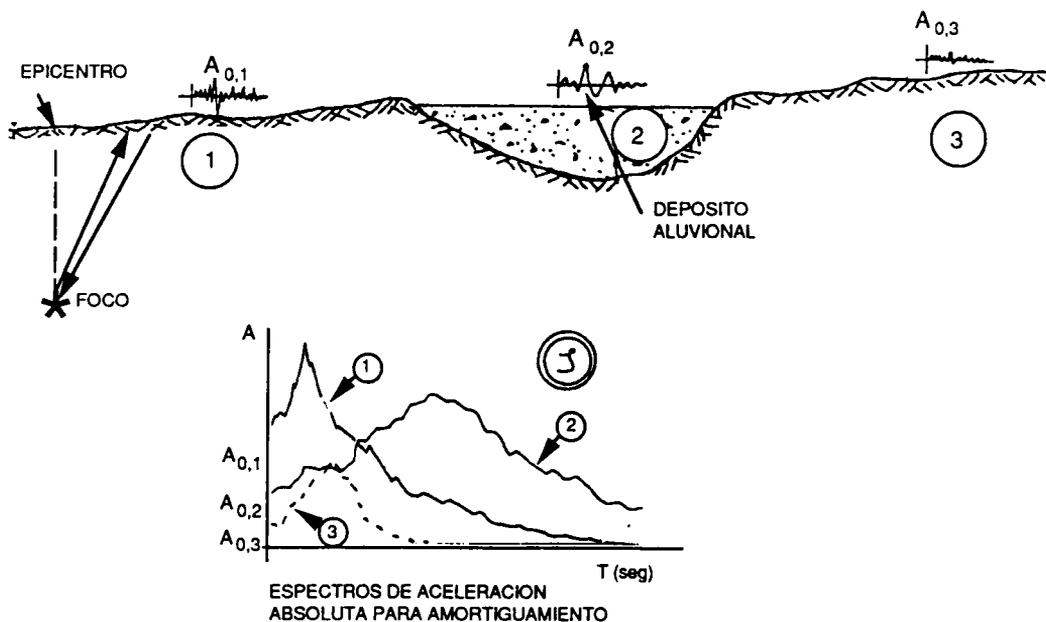


Figura 5. Cambios esperados en los movimientos del terreno, como consecuencia de un evento sísmico de foco superficial.

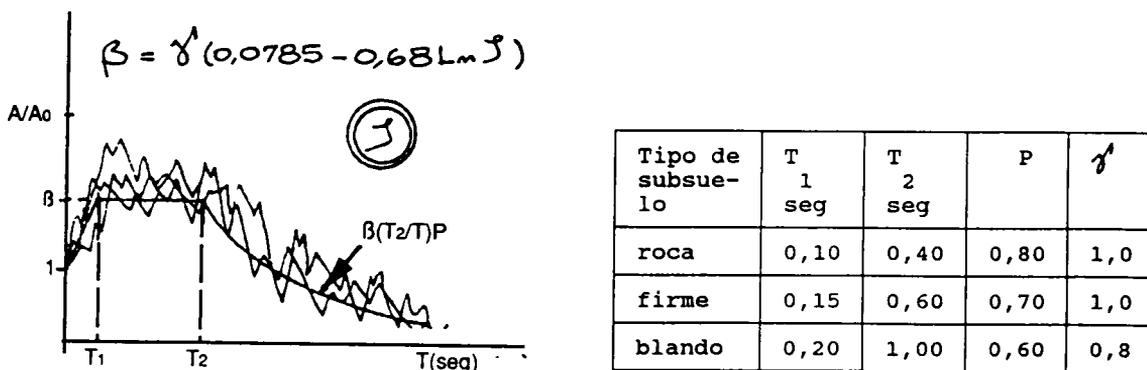
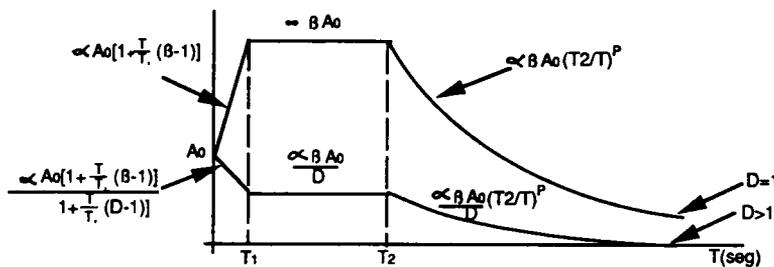


Figura 6. Espectros normalizados típicos, para diferentes condiciones del subsuelo y amortiguamiento.

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 inelástica, que en forma aproximada se pueden relacionar con los espectros de respuesta elástica a partir de un factor de reducción que depende del factor de ductilidad D garantizado 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 .

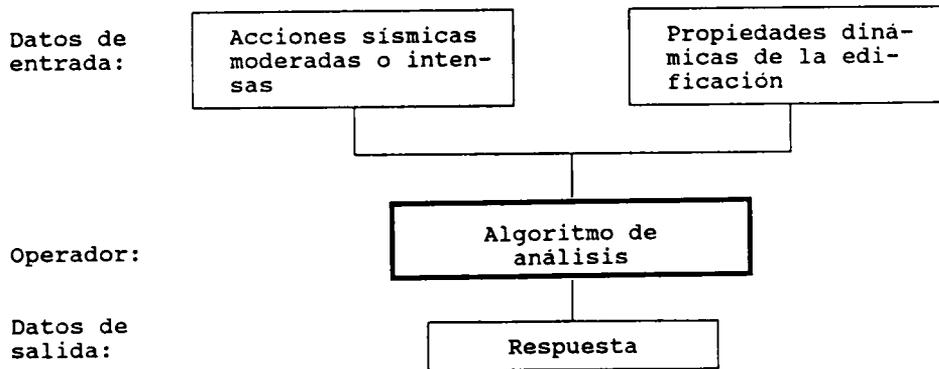
VALORES TÍPICOS DE D

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

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

Respuesta a sismos

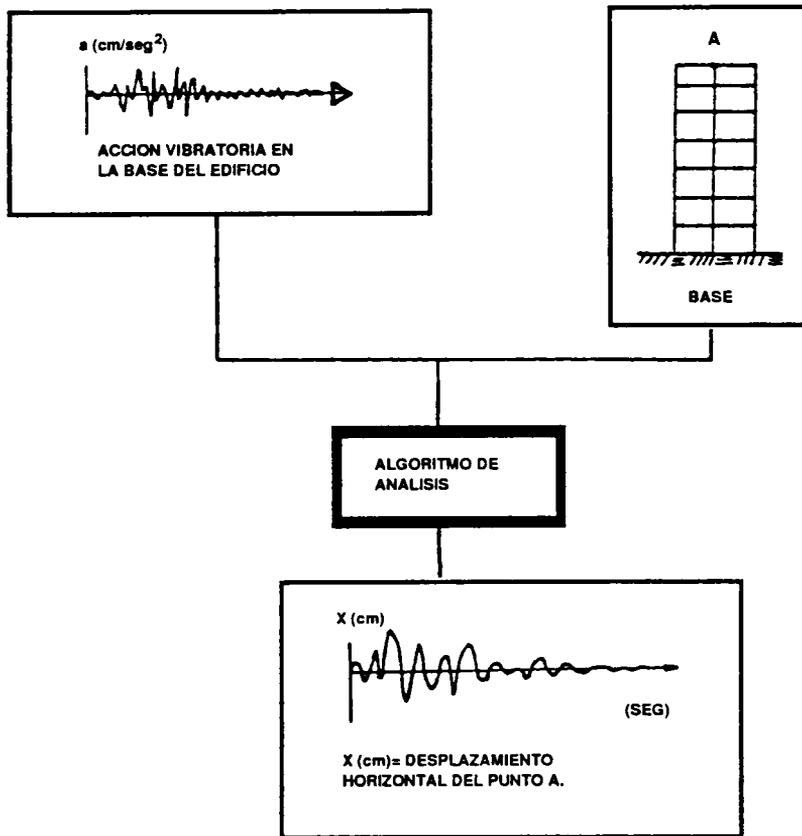
La cuantificación de la respuesta de una edificación a movimientos sísmicos requiere definir: tanto las acciones más probables en el sitio, como las propiedades dinámicas de la edificación. La secuencia en la resolución de este problema se puede representar de acuerdo al esquema del cuadro 2.



Cuadro 2.

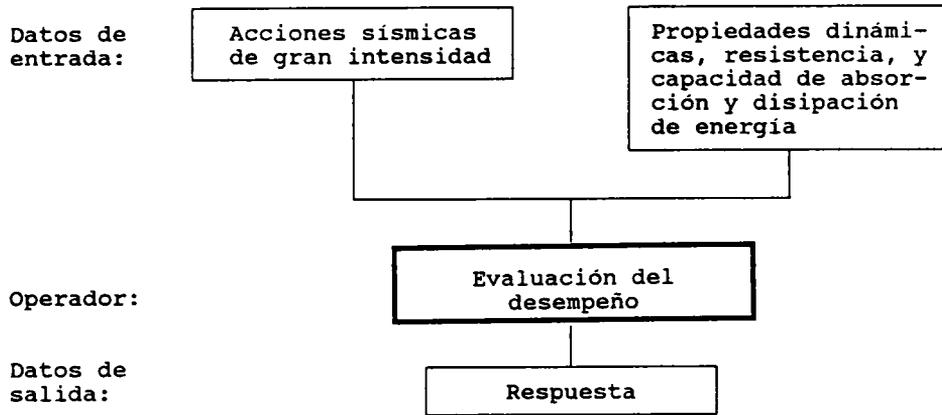
La respuesta, constituida por un conjunto de datos de salida, puede ser medida de formas muy diferentes. En el cuadro 3 la respuesta sísmica de un edificio de siete niveles a la acción vibratoria en su base, viene dada por los desplazamientos en el tope del edificio (punto A); esta ha podido ser igualmente 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 incursionen 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 solicitaciones 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 la 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 cedencia 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.

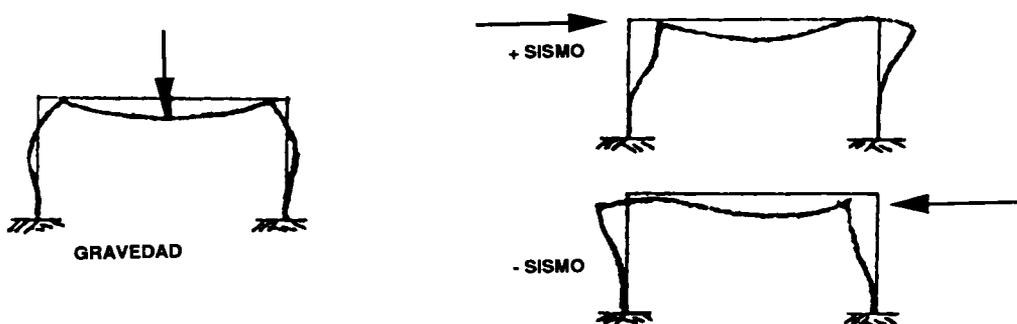


Figura 9. Superposición de efectos: gravedad + sismo.

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:

$$\begin{array}{c} CM + 1.2 CV \pm S \\ 0.9 CM \pm S \end{array}$$

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*)