

EFFECTO DE LOS SISMOS EN LAS CONSTRUCCIONES

Enrique del Valle C.¹

CARACTERISTICAS DINAMICAS

El efecto de los sismos sobre las estructuras depende de las características dinámicas tanto de la estructura como del movimiento. El problema es sumamente complejo, pues las características dinámicas del movimiento son variables tanto durante un mismo temblor, como de uno a otro temblor, dependiendo de la distancia epicentral, profundidad focal y magnitud del sismo, así como del tipo de terreno en que estén desplantadas las estructuras.

Las características de interés del movimiento son la duración, la amplitud y la frecuencia, refiriéndose la amplitud a los máximos valores que se alcanzan durante el sismo, ya sea de desplazamiento, velocidad o aceleración del suelo y la frecuencia al número de ciclos de oscilación del movimiento por unidad de tiempo. En general, en terrenos firmes la frecuencia es más alta que en terrenos blandos, lo que indica que el número de ciclos de oscilación del terreno por unidad de tiempo es mayor, sintiéndose el movimiento mucho más violento y rápido que en los terrenos blandos, donde es más lento, los desplazamientos y la duración total suelen ser mucho mayores en el terreno blando.

Por otro lado, las características dinámicas de las estructuras no son fáciles de estimar correctamente, debido a las incertidumbres existentes en la determinación de las propiedades elástico-geométricas de los elementos que conforman las estructuras, a la variación de las propiedades al presentarse comportamiento inelástico, así como a incertidumbres en cuanto a la colaboración a la resistencia y rigidez de elementos no estructurales, que suelen participar en la respuesta sísmica debido a que es difícil desligarlos adecuadamente de la estructura. también es poco frecuente incluir la participación de la cimentación y del suelo circundante en la determinación de las propiedades dinámicas de un edificio.

Se define como rigidez lateral o de entrepiso a la oposición de la estructura a ser deformada entre un nivel y otro por las cargas horizontales aplicadas en cada nivel. Puede hablarse también de rigidez angular, que será la oposición de un nudo de una estructura o del extremo de un elemento estructural a girar al ser sometido a un momento flexionante; o de rigidez lineal, que será la oposición al desplazamiento relativo de un extremo de un miembro estructural con respecto a su otro extremo (fig. 1).

La rigidez, tanto de entrepiso como angular o lineal, depende del tamaño de la sección transversal de los elementos estructurales, con lo que se calculan las propiedades geométricas: áreas y momentos de inercia, de su longitud, de la forma en que están conectados a otros elementos y del material con que están hechos, lo que define las propiedades elásticas como módulo de elasticidad, módulo de Poisson y módulo de cortante.

Es una propiedad diferente a la resistencia, aunque a veces se confunde con ella. Hay elementos estructurales en que existe compatibilidad entre resistencia y rigidez, pero hay otros en que la rigidez es mucho mayor que la resistencia, como es el caso de los muros de mampostería, lo que complica el problema de análisis de las estructuras en que existen elementos de este tipo. Asimismo, las propiedades elásticas del acero están más definidas que las del concreto reforzado o de la mampostería.

Cuando el nivel de esfuerzos a que están trabajando los materiales es bajo, su comportamiento puede ser cercano al elástico, esto es, habrá proporcionalidad entre esfuerzos y deformaciones, correspondiendo una deformación del

¹Ingeniero Consultor

doble para esfuerzos dos veces mayores; pero, a medida que los esfuerzos crecen, el comportamiento deja de ser elástico, alcanzándose lo que se conoce como comportamiento no lineal o inelástico, en el cual, al duplicar el esfuerzo, la deformación es mucho mayor que el doble a que se hizo mención antes (fig.2).

Debido a lo anterior, en general se elaboran modelos matemáticos elásticos muy simplificados de las estructuras, pues, aún con ayuda de las computadoras, el problema dista de ser manejable. Entre las características más importantes que pueden obtenerse de los modelos están los periodos de oscilación de cada uno de los distintos modos en que pueden vibrar y las formas de estos modos, entendiéndose por periodo el tiempo que tarda en ocurrir una oscilación completa (fig.3).

Otras características importantes de las que depende la respuesta de la estructura son el amortiguamiento y la ductilidad que pueden desarrollarse. El amortiguamiento es una propiedad intrínseca de los materiales empleados, pero depende también de la forma en que se conecten los miembros estructurales y los no estructurales: Valores de amortiguamiento relativamente pequeños reducen considerablemente la respuesta sísmica de las estructuras.

Se conoce como amortiguamiento crítico el que tiene una estructura cuando, al separarla de su posición y soltarla no oscila sino que regresa a la posición de equilibrio; las estructuras suelen tener amortiguamiento del orden de 3 a 10% del crítico, siendo menor el de las estructuras metálicas, soldadas y sin recubrir, y mayor el de las estructuras de mampostería, con gran número de juntas. Puede aumentar algo al someter a las estructuras a grandes deformaciones. También puede aumentarse colocando amortiguadores de diseño especial, que están empezando a desarrollarse.

La ductilidad de las estructuras es la propiedad de soportar grandes deformaciones inelásticas sin fallar ni reducir su capacidad de carga. Depende en gran medida de los materiales empleados y de los cuidados que se tienen al diseñarlas. Es una propiedad muy deseable en las estructuras situadas en zonas sísmicas, pues por lo general no es aconsejable diseñar las estructuras sometidas a estas acciones sobre la base de un comportamiento elástico, ya que sería antieconómico debido a la escasa probabilidad de que ocurra el sismo de diseño durante la vida útil de la estructura, además de que es muy difícil saber cuál será la mayor excitación sísmica que puede ocurrir, pues la historia con que se cuenta aún en países habitados hace muchos siglos no es suficiente para ello.

ESPECTROS DE RESPUESTA

Conocidos los acelerogramas de temblores intensos es posible estimar la respuesta de modelos simples en función del tiempo y, por consiguiente, la respuesta máxima que puede ocurrir en un instante dado. Esto puede hacerse considerando que el comportamiento de la estructura será elástico en todo el evento o bien que se incursionará en el intervalo de comportamiento inelástico a partir de un cierto valor de respuesta.

La gráfica que relaciona las respuestas máximas de distintas estructuras sometidas a una misma excitación con sus periodos de oscilación recibe el nombre de espectro de respuesta (fig. 4). Según el tipo de comportamiento que se haya considerado se tendrán espectros de respuesta elásticos o espectros de respuesta inelásticos.

Normalmente estos espectros se obtienen suponiendo que las estructuras tienen distintos valores del porcentaje de amortiguamiento crítico, pues, como se dijo antes, un pequeño valor de éste es suficiente para reducir considerablemente la respuesta. Los valores empleados normalmente en cálculos de este tipo son 0, 2, 5, 10 y 20% del amortiguamiento crítico (fig. 5).

El tipo de terreno en que se haya obtenido el acelerograma es muy importante, pues las características dinámicas de la excitación varían en función de esto. Como ya se indicó, en suelos firmes las vibraciones son rápidas, mientras que en suelos blandos las oscilaciones son de menor frecuencia, esto es, su periodo es relativamente más largo. Esto modifica la forma de los espectros de respuesta.

Las respuestas que suelen calcularse son desplazamientos, velocidades o aceleraciones, pues a partir de ellas se puede calcular cualquier efecto que se desee conocer en la estructura, como por ejemplo momentos de volteo en la base, fuerzas cortantes en cualquier nivel, esfuerzos en alguna sección, etc.

Normalmente los acelerogramas tienen periodos que varían dentro de una banda de valores relativamente ancha; sin embargo, en cierto tipo de suelo y bajo condiciones especiales puede haber algún periodo dominante en particular, como ocurrió en el sismo del 19 de septiembre de 1985, en el acelerograma obtenido en el centro SCOP, en el que se observa un periodo muy definido de dos segundos de duración. Esta situación conduce al problema dinámico conocido como resonancia, que consiste en una amplificación excesiva de la respuesta de aquellas estructuras que tienen algún periodo de oscilación muy parecido al de la excitación, lo que puede llevarlas al colapso total, sobre todo cuando la duración del evento es grande.

Es muy fácil demostrar por medio de una mesa vibratoria, en la que se coloquen modelos de las estructuras con diferentes periodos de oscilación, que la respuesta de uno de ellos se puede amplificar considerablemente moviendo la mesa con un periodo igual al de ese modelo, observándose que los otros no sufren mayores oscilaciones. Al cambiar el periodo de la oscilación, se excitará algún otro modelo, y así sucesivamente (fig. 6).

CRITERIOS DE DISEÑO SISMICO

Los criterios de diseño por sismo (filosofía del diseño sísmico) adoptados por la mayor parte de los reglamentos de construcción de los países que tienen problemas sísmicos establecen la necesidad de diseñar las estructuras para resistir, sin daños, sismos de baja intensidad, de ocurrencia relativamente frecuente, prevenir daños estructurales y minimizar daños no estructurales que pudieran ocurrir en sacudidas ocasionales de intensidad media y evitar el colapso o daños serios en caso de sacudidas del terreno de intensidad extrema, pero de probabilidad de ocurrencia muy baja, permitiendo daños no estructurales y aún estructurales en este caso (ref. 1). Esto obedece, como se indicó anteriormente, a motivos económicos, considerando muy baja la probabilidad de que se presente un sismo muy intenso, igual o mayor que el propuesto para diseño, durante la vida útil de la estructura.

Sin embargo, se reconoce que los datos estadísticos actuales no permiten desarrollar correctamente estos criterios de diseño, lo cual fue claramente demostrado con el sismo de septiembre de 1985 que rebasó ampliamente las previsiones que se tenían para diseño.

En los criterios en vigor se aprovecha la propiedad de ductilidad de las estructuras, la que también es útil para compensar la subestimación del máximo sismo que puede presentarse en un lugar, por falta de información adecuada, como ocurrió en el sismo de septiembre de 1985.

En los reglamentos se proponen usualmente valores máximos para diseño, estimados con base en la información estadística de que se disponga, considerando que las estructuras tienen comportamiento elástico. Suelen proponerse espectros para diseño obtenidos como una envolvente de espectros de respuesta de distintos temblores, escalados a una cierta intensidad. Para el cálculo de las fuerzas equivalentes al sismo se permite reducir por ductilidad los valores máximos antes mencionados, dependiendo del tipo de estructura, ya sea de marcos rígidos, muros de carga y rigidez, o combinación de estos sistemas, de la regularidad de la estructura, de los materiales con que está hecha y de los cuidados que se tengan en el detallado y construcción.

RECOMENDACIONES SOBRE ESTRUCTURACION

Con base en la experiencia obtenida en muchos temblores ocurridos en distintas partes del mundo se ha elaborado una serie de recomendaciones sobre estructuración, para lograr un mejor comportamiento sísmico, entre las más importantes están las siguientes (refs. 2, 3, 4, 5)

- A) Poco peso.
- B) Sencillez, simetría y regularidad tanto en planta como en elevación.
- C) Plantas poco alargadas.
- D) Uniformidad en la distribución de resistencia, rigidez y ductilidad.
- E) Hiperestaticidad y líneas escalonadas de defensa estructural
- F) Formación de articulaciones plásticas en elementos horizontales antes que en los verticales
- G) Propiedades dinámicas adecuadas al terreno en que se desplantará la estructura.
- H) Congruencia entre lo proyectado y lo construido.

Se recomienda que las estructuras sean ligeras pues las fuerzas debidas al sismo surgen como consecuencia de la inercia de las masas a desplazarse, por lo que, entre menos pesen, menores serán los efectos de los sismos en ellas. Conviene también que sean sencillas, para que los modelos matemáticos sean realistas, pues una estructura muy compleja, mezclando distintos tipos de sistemas estructurales y materiales, no es fácil de modelar; que sean simétricas para reducir efectos de torsión, por lo que se debe evitar las plantas en forma de L, T, C, y triangulares (fig 7); que no sean muy alargadas ni en planta, ni en elevación: en planta, para reducir la posibilidad de que el movimiento de un extremo del edificio sea diferente al del otro extremo, lo que causaría efectos usualmente no previstos; en elevación, para reducir los efectos de volteo, que encarecen considerablemente las cimentaciones. Se deben evitar remetimientos en elevación (fig. 8), pues los cambios bruscos en masa o rigidez propician amplificaciones dinámicas importantes, que suelen provocar daños graves. Lo mismo puede decirse con respecto a cambios en la forma de la planta, debiendo limitarse la extensión de apéndices que sobresalgan, como en el caso de formas simétricas en cruz o en H.

Conviene que la resistencia y la rigidez de la estructura estén repartidas uniformemente, sin concentrarse en unos cuantos elementos resistentes, o con variaciones grandes en los claros entre columnas o en las dimensiones de las trabes y de las columnas. Entre mayor hiperestaticidad tiene una estructura, es mayor el número de secciones estructurales que deben fallar antes de que la estructura colapse, asimismo, si se planea que haya elementos que fallen antes que otros, se puede dar la posibilidad de evitar daños grandes a toda la estructura. Estos elementos deben colocarse adecuadamente para que su reparación sea sencilla. El problema de satisfacer esta condición es que se requiere analizar varias etapas del comportamiento, para verificar que los elementos estructurales que van quedando son capaces de soportar el sismo sin colapsar, lo que encarece y complica el cálculo de la estructura.

Se debe buscar una estructuración a base de columnas fuertes-vigas débiles, para propiciar la formación de articulaciones plásticas en las vigas al excederse la resistencia suministrada, ya sea porque se está aprovechando la ductilidad o porque, además de eso, el sismo excede las previsiones de diseño. Al proceder así se logran mecanismos que pueden evitar más fácilmente el colapso de la estructura, pues la demanda de ductilidad local en las trabes de todos los entrepisos reparte mejor los efectos del sismo que cuando la demanda de ductilidad se concentra en las columnas de un sólo entrepiso (fig. 9). Por otro lado, el comportamiento dúctil de elementos estructurales sujetos a flexión pura, como en el caso de las trabes, es mucho mejor que el de elementos a flexocompresión, que es el caso de columnas (figs. 10 y 11)

Se recomienda también que se busque que las propiedades dinámicas de la estructura sean congruentes con las del suelo en que está desplantada; en general se dice que en suelos firmes se comportan mejor las estructuras flexibles y en suelos blandos las estructuras rígidas. Lo que trata de evitarse con esta recomendación es la posible resonancia por coincidencia de las propiedades dinámicas de la estructura y del suelo, como la observada el 19 de septiembre.

Finalmente, es recomendable también que lo que se construye sea congruente con lo que proyecta; en muchas ocasiones, al proyectar una estructura se decide no aprovechar la colaboración de muros de relleno, debido a la posibilidad de que sean eliminados para dejar libertad en la distribución de espacios en el proyecto arquitectónico de los distintos niveles; sin embargo, suele no detallarse adecuadamente la forma en que estos muros deben construirse, desligados de la estructura, para permitir que ésta se deforme sin recargarse en ellos, pues si lo hace les transmitirá buena parte de la fuerza sísmica que debía absorber, debido a que los muros, sobre todo cuando son de mampostería, tienen una rigidez intrínseca bastante alta en su plano, aunque su resistencia no sea compatible con esa rigidez, como se mencionó antes. Si los muros de relleno colaboran con la estructura para resistir los efectos sísmicos sin haber sido calculados para absorber la fuerza que les corresponde en función de su rigidez, el comportamiento de la estructura será muy distinto al supuesto en el proyecto estructural, pudiendo presentarse muchos daños.

En algunos casos la colaboración de los muros no estructurales evita el colapso de estructuras subdiseñadas, si su colocación es relativamente simétrica y tiene continuidad de un piso a otro. Pero cuando su colocación es asimétrica, como ocurre en los muros de colindancia de edificios en esquina o cuando son discontinuos, como ocurre en edificios de departamentos en que la planta baja o algunos otros niveles no tienen muros porque se destinan a estacionamiento o comercios, la colaboración de los muros de relleno pueden ser causa de daños muy graves o aún de colapso total de la estructura, al propiciar efectos torsionantes importantes en el primer caso o una condición de piso "suave" en el segundo.

El cambio de cargas con respecto al proyecto suele ser también causa de daños importantes en las estructuras. Usualmente un edificio diseñado para resistir el efecto combinado de cargas verticales y cargas de sismo puede soportar sin problemas sobrecargas verticales importantes mientras no tiemble, pero, si existe sobrecarga al momento de un sismo, los efectos de éste se verán doblemente amplificadas, por lo que pueden ocurrir daños importantes o colapsos parciales o totales.

INGENIERIA SISMICA. METODOS DE ANALISIS POR SISMO

La ingeniería sísmica empezó a desarrollarse y a proponer recomendaciones para diseño sísmico hace unos setenta años, después del temblor de 1923 en Japón, donde se vio que algunas estructuras diseñadas con ciertos principios habían resistido el sismo satisfactoriamente. Al principio los avances fueron relativamente lentos pero poco a poco se ha logrado mejorar los criterios de diseño a nivel internacional, sobre todo a raíz de la creación de la Asociación Internacional de Ingeniería Sísmica, que organiza cada cuatro años aproximadamente, a partir de 1956, congresos mundiales de ingeniería sísmica, donde los ingenieros de todo el mundo tienen oportunidad de intercambiar ideas y experiencias. Esos congresos mundiales se han celebrado en Estados Unidos de América en 1956, Japón en 1960, Nueva Zelanda en 1965, Chile en 1969, Italia en 1973, la India en 1977, Turquía en 1980 y nuevamente en los Estados Unidos de América en 1984, en Japón en 1988 y en Madrid, España en 1992, cada vez con mayor cantidad de ponencias y participantes. Además de la memorias de los distintos congresos, la Asociación ha editado también una publicación que resume los distintos reglamentos de diseño sísmico de los países miembros, México entre ellos, donde se puede ver el grado de desarrollo alcanzado en cada país (ref. 6).

En nuestro país el interés por la ingeniería sísmica se desarrolló de manera importante después del temblor del 28 de julio de 1957, que causó grandes destrozos en la Ciudad de México, dando lugar a la revisión del reglamento de construcción existente y propiciando la investigación e instrumentación sísmica.

En general, como se dijo antes, el problema dinámico que originan los temblores en estructuras es sumamente complejo y difícil de representar analíticamente, por lo que en los reglamentos se recomiendan usualmente métodos de análisis relativamente simples, que tratan de representar los efectos del sismo a través de fuerzas horizontales aplicadas en los distintos niveles de un edificio, evaluadas ya sea por un método estático o bien por métodos dinámicos, que tratan de ser más precisos.

Métodos estáticos. Los métodos más comúnmente empleados en el análisis sísmico son los llamados estáticos, las fuerzas equivalentes al efecto sísmico se valúan considerando una aceleración en el nivel inferior (coeficiente sísmico) reducida por ductilidad, que, al multiplicar por el peso total del edificio, da como resultado una fuerza cortante en la base del mismo. Esa fuerza total se reparte en los distintos niveles en función de su peso y ubicación con respecto al nivel inferior, tratando de obtener una envolvente del comportamiento de la estructura a la excitación en su base. En estos métodos sólo se requiere conocer la ubicación y destino de la estructura para asignarle un coeficiente sísmico adecuado, que tome en cuenta el tipo de terreno en que se desplantará y el tipo de ocupación que tendrá; el sistema estructural y los materiales que se emplearán, para estimar la ductilidad que podrá desarrollarse y reducir las fuerzas en función de ella; los pesos de los distintos niveles, la ubicación de su centroide y sus alturas respecto a la base, para evaluar el cortante basal, repartirlo a los distintos niveles y obtener momentos de volteo y efectos torsionales. Se requiere también conocer las rigideces de los distintos elementos resistentes, para calcular los desplazamientos máximos probables y estimar los efectos que el sismo ocasionará en cada elemento estructural: trabes, columnas, losas y muros.

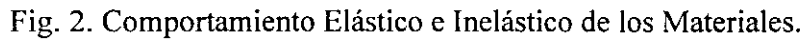
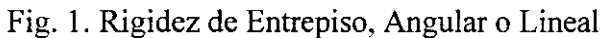
Para las estructuras más comunes, que son construcciones de muros de carga de mampostería de uno a tres niveles, existen métodos estáticos simplificados, que pueden emplearse si se cumple con una serie de requisitos; con estos métodos sólo se necesita revisar si la capacidad resistente de la mampostería a fuerza cortante es suficiente, sin tener que calcular desplazamientos laterales, momentos de volteo y efectos torsionales.

Métodos Dinámicos. Los métodos dinámicos se aplican en la determinación de los efectos sísmicos en edificios altos, cuya respuesta puede complicarse por la participación de modos superiores de vibrar, así como por las posibles variaciones de masa y rigidez en elevación. Es necesario elaborar modelos matemáticos más o menos refinados de la estructura, tomando en cuenta en ocasiones su carácter tridimensional, para calcular las formas en que puede oscilar y los periodos correspondientes, empleando computadoras. Con estos datos se estima, mediante un espectro de diseño, la máxima respuesta de cada uno de los modos de vibrar y se combinan para obtener fuerzas máximas probables que actuarán sobre la estructura, debido al sismo de diseño.

Cabe mencionar que, para el cálculo de desplazamientos, no se permite reducir las fuerzas, pues se estima que los desplazamientos elásticos bajo las fuerzas máximas son aproximadamente iguales a los calculados con las fuerzas reducidas, multiplicados por el factor de reducción por ductilidad, ya que al reducir las fuerzas se está permitiendo que la estructura se deforme inelásticamente.

REFERENCIAS

- 1.- Comportamiento Sísmico de Estructuras de Concreto Reforzado, Vitelmo V. Bertero. Revista "Ingeniería Sísmica", No.24. Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica; A.C., Ag. 1981.
- 2.- Earthquake Resistant Design. A Manual for Engineers and Architects, David Dowrick, John Wiley, traducido al español por Limusa, con el título "Diseño de Estructuras Resistentes a Sismos", 1984.
- 3.- Building Configuration & Seismic Design, Cristopher Arnold and Robert Reitherman, John Wiley. Traducido al español por Limusa con el título "Configuración y Diseño Sísmico de Edificios", 1987.
- 4.- Manual de Diseño Sísmico de Edificios, Enrique Bazán y Roberto Meli Editorial Limusa, 1985.
- 5.- Estructuras de Concreto Reforzado, R. Paulay y T. Paulay. Editorial Limusa, 1979.
- 6.- Earthquake Resistant Regulations, A World List. International Association for Earthquake Engineering.



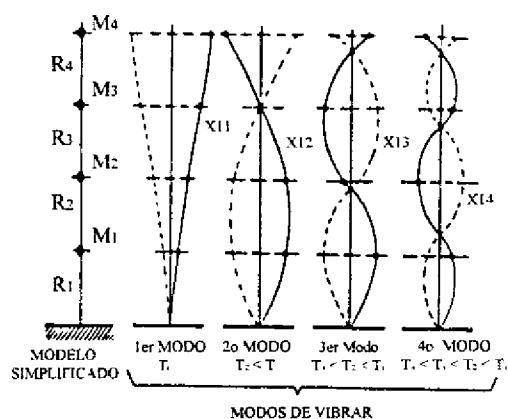


Fig. 3. Modelo Simplificado de un Edificio y Modos de Vibrar

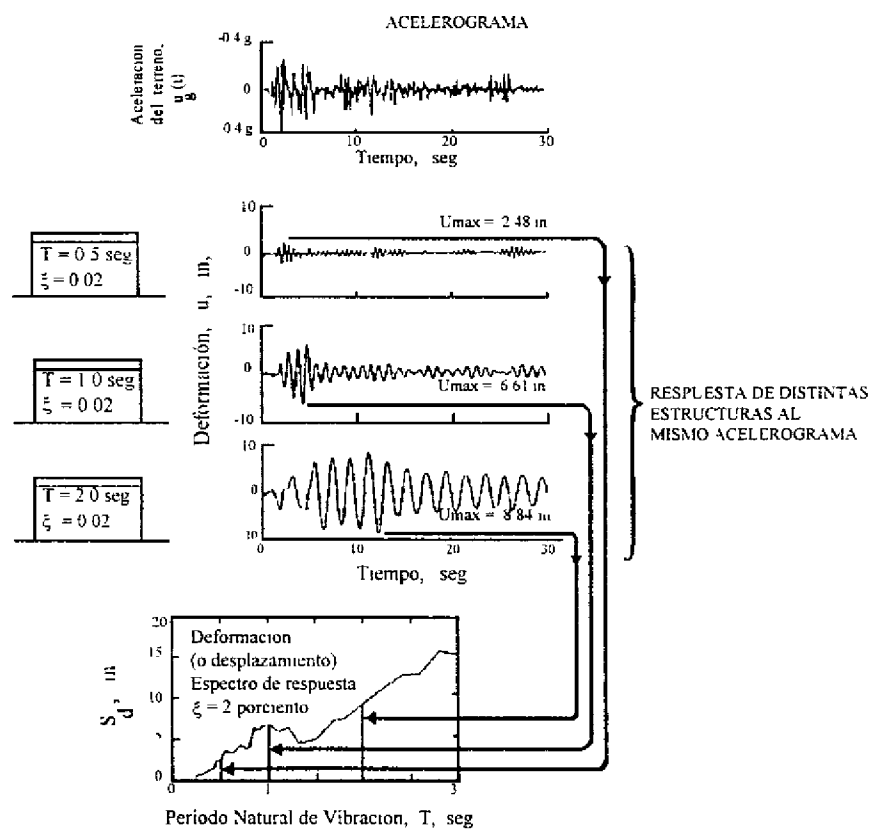


Fig.4. Construcción de un Espectro de Respuesta

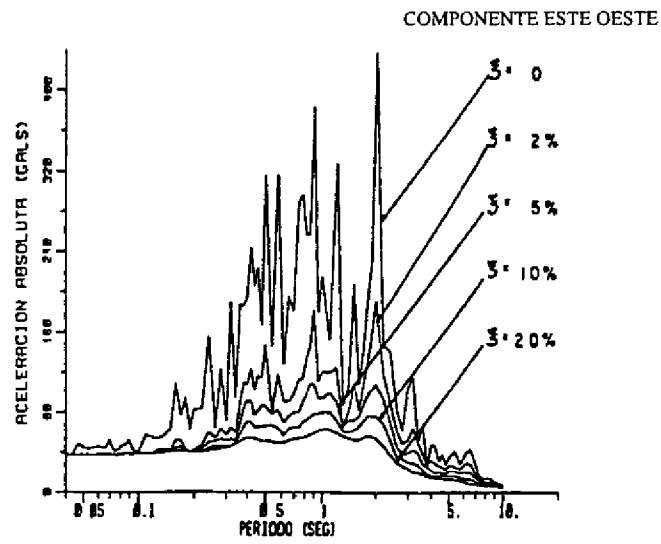


Fig.5. Espectros de Respuesta para la Componente N.S. Reg. de C.U.

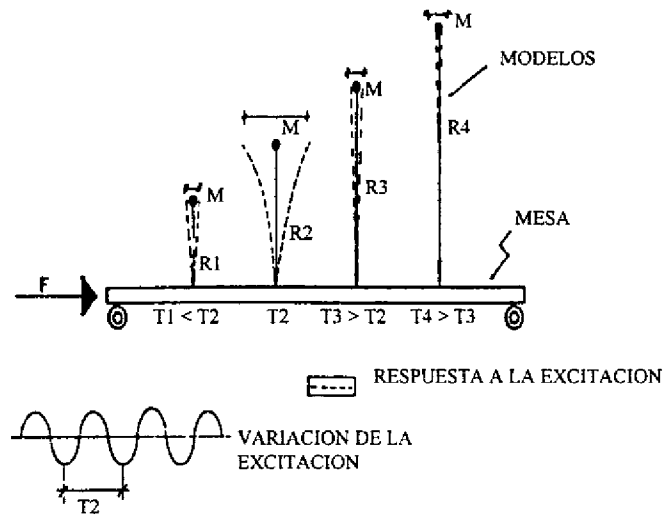


Fig.6 Demostración de la Resonancia

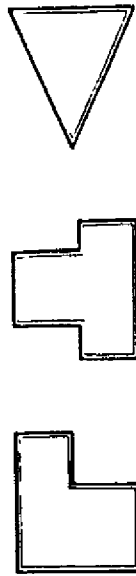


Fig.7. Plantas Irregulares de Edificios

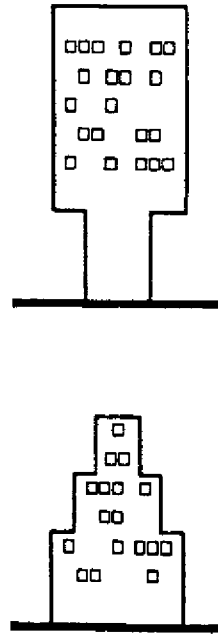


Fig.8. Elevaciones Irregulares de Edificios

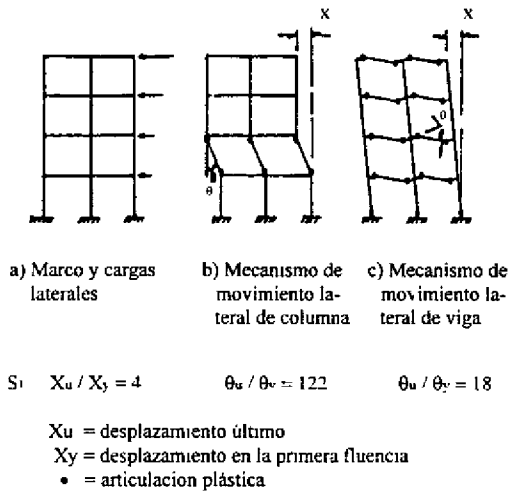


Fig.9. Posibles Mecanismos de un Marco Rígido, Sujeto a Carga Lateral (Ref. 4)

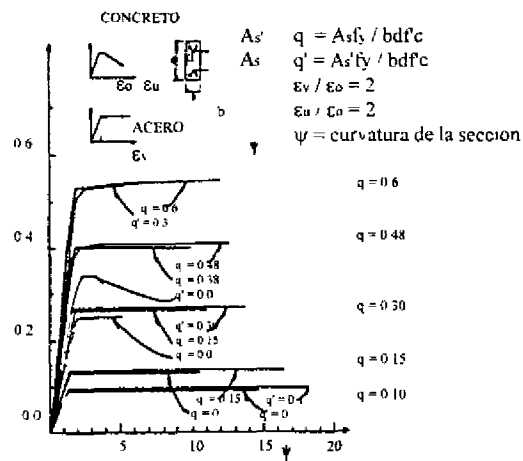
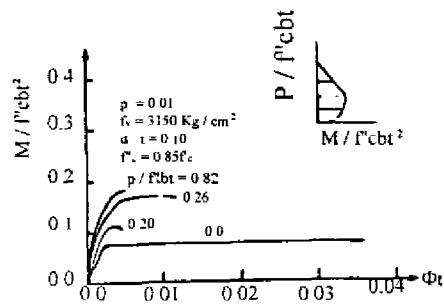
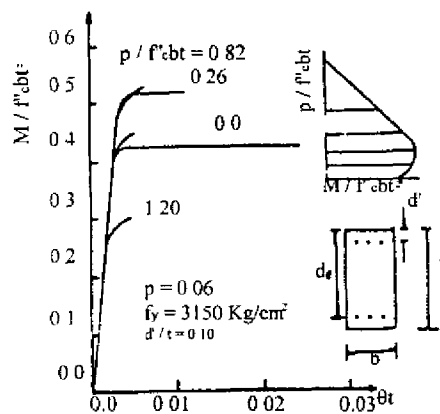


Fig.10. Relaciones Momento- Curvatura para Secciones de Concreto Reforzado, Sujetas a Flexión. (Ref.4)



a) BAJA CUANTIA DE REFUERZO LONGITUDINAL



b) ALTA CUANTIA DE REFUERZO LONGITUDINAL

Fig 11. Relaciones Momento Curvatura de Secciones de Concreto Sujetas a Flexo - Compresion (Ref.4)