

simplificaciones fundamentadas en experiencias previas. Ocurre sin embargo, y de acuerdo a la experiencia acumulada en el IMME, que la gran mayoría de las soluciones constructivas para viviendas económicas no son de comportamiento tipificable, por poseer una diversidad de características diferentes a las contempladas en las prescripciones normativas. Para estos casos, las nuevas Normas venezolanas en su Sección 3.5 estipulan que "se deberán seguir los lineamientos básicos" de las mismas. En particular y en el Capítulo 1, se excluyen del ámbito de aplicación de las Normas los requerimientos para "el análisis y diseño de edificaciones cuyos elementos portantes sean prefabricados".

Estas limitaciones en la aplicación de la Norma son importantes, si tenemos presente los dos hechos siguientes: (1) un alto porcentaje de las inversiones en el sector vivienda, ya hechas y de las programadas para el futuro, está orientado a soluciones habitacionales de bajo costo, y (2) que, en el caso particular de Venezuela, cerca del 80 % de su población habita en zonas de elevada amenaza sísmica tal como se puede constatar en la Figura Nº 1. Es evidente por tanto, que el problema de la verificación sísmica de soluciones habitacionales de bajo costo, uni o multifamiliares, amerita atención especial. No debe perderse de vista que la construcción masiva de viviendas con el consiguiente abaratamiento del costo unitario, generalmente conduce al empleo de sistemas de tipo industrializado, dando lugar a un elevado número de construcciones nominalmente idénticas a ser ubicadas en condiciones geotécnicas y de amenaza sísmica, diferentes.

La naturaleza repetitiva de estas construcciones hace más obligante la aplicación eficiente de los conocimientos actuales en el dominio de la Ingeniería Sísmica, sintetizados en esos "lineamientos básicos" que se mencionan en

las Normas con el fin de reducir la amenaza de pérdidas importantes. Esos lineamientos no son dados en forma explícita en las Normas. Para facilitar su aplicación se revisan a continuación, anotando sus limitaciones en la verificación sísmica de viviendas económicas.

## 2. ZONIFICACIÓN

### 2.1) Aplicación General

Dado que las Normas son de aplicación en todo el país, éste ha sido zonificado desde el punto de vista de las acciones sísmicas con fines de Ingeniería (Fig. 1B). Para cada una de las zonas se establecen valores de la aceleración máxima del terreno  $A_0$ , asociados a probabilidades de excedencia en 50 años que oscilan entre 5 % y 20 % aproximadamente dentro de cada zona (Ref. 3). Con esto, durante la vida útil de la edificación, si ésta está situada en la zona de mayor amenaza sísmica (Zona 4), probablemente experimentará: (a) varios temblores de moderada intensidad y duración, y (b) por lo menos un sismo de elevada intensidad y larga duración. La intensidad de las sacudidas sísmicas puede ser caracterizada por los espectros de respuesta elástica, y es decreciente en las zonas sísmicas subsiguientes.

### 2.2) Aplicación a la Verificación de Sistemas de Viviendas Económicas

La zonificación sísmica del país mostrada en la Fig. 1B, puede considerarse esencialmente válida para ser aplicada en la verificación sísmica de viviendas económicas. Sistemas aprobados para ser ubicados en zonas donde no se requiere tomar en consideración la acción sísmica (Zona 0), o en zonas de actividad sísmica moderada (Zonas 1 y 2) deberán ser debidamente evaluados antes de aceptar que su construcción se extienda a zonas sísmicas de mayor amenaza.

### 3. ESPECTROS NORMALIZADOS DE RESPUESTA ELÁSTICA

#### 3.1) Aplicación General

En las Normas se consideran tres tipos de terreno de fundación, caracterizados por sus perfiles del subsuelo y por sus espectros de respuesta. En forma resumida, las condiciones generalizadas de estos perfiles son los siguientes:

- a) Tipo S1: roca; suelos duros y/o densos, con profundidad comprobada al basamento rocoso menor de 50 m.
- b) Tipo S2: grandes espesores de suelos que pueden estar formados por arenas y gravas medianamente densas, limos o arcillas muy duras o una mezcla de ellos.
- c) Tipo S3: suelos granulares poco densos y/o suelos cohesivos de consistencia blanda.

Los espectros normalizados de respuesta elástica para estos tres tipos de suelos se dan en la Fig. 2; sus ordenadas corresponden a valores medios provenientes de un análisis estadístico de diferentes registros acelerográficos (Ref. 4). Los suelos potencialmente licuables no entran en la clasificación anterior y requieren una evaluación especial.

La amplitud de los espectros de respuesta elástica de las Normas depende también del llamado coeficiente de uso, el cual amplifica un 25 % los valores espectrales para edificaciones de singular importancia (GRUPO A).

#### 3.2) Aplicación a la Verificación de Sistemas de Viviendas Económicas

Para la verificación de sistemas de viviendas económicas, la caracterización de las acciones sísmicas por medio de los espectros normalizados de

respuesta elástica, es adecuado. Procede, no obstante, llamar la atención sobre la necesidad de llevar a efecto estudios geotécnicos completos en el área de ubicación ya que la experiencia demuestra que el desconocimiento de las condiciones del suelo local puede conducir a daños graves o catastróficos tales como los ocurridos por inestabilidad del suelo en Niigata (1964), Anchorage (1964), Güigüe (1967) y San Juan, Cauce (1977).

En el caso de viviendas repetitivas, éstas pueden obviamente quedar ubicadas en cualquiera de los tipos de suelo, y parece por tanto recomendable seleccionar un espectro envolvente como el de la Fig. 3 para su verificación. Este criterio puede ser conservador, cuando se trate de edificaciones de varios niveles.

El carácter repetitivo de las viviendas económicas sugiere que en su verificación sísmica, éstas puedan incluirse como pertenecientes al GRUPO A, lo cual equivale a mayorar la acción sísmica un 25 %. Este criterio puede interpretarse como equivalente a adoptar movimientos sísmicos con probabilidades de excedencia más pequeñas.

### 4. SISTEMAS RESISTENTES A SISMOS Y FACTOR DE DUCTILIDAD

#### 4.1) Aplicación General

Toda edificación a ser ubicada en una zona sísmica, debe poseer un conjunto de elementos que suministre la resistencia, rigidez y ductilidad necesaria para soportar las acciones sísmicas prescritas para esa zona, conjunto éste que ha sido definido como sistema resistente a sismos. Estos sistemas han quedado caracterizados en las Normas por su capacidad para absorber y disipar energía bajo acciones sísmicas, definiéndose así los cuatro tipos

esquemáticos en la Fig. 4a. Esa caracterización se traduce en un factor  $D$  que describe la ductilidad global esperada de cada sistema resistente a sismos y cuantifica la relación entre: los desplazamientos máximos reales y los desplazamientos calculados suponiendo un comportamiento elástico lineal de la estructura. Para las prescripciones de diseño de miembros de concreto armado vigentes, o en vías de aprobación, los valores esperados de  $D$  para cada uno de los tipos esquematizados en la Fig. 4a son los allí indicados. En cada caso, los mayores valores de  $D$  corresponden a los diseños que garantizan mayores incursiones en el rango inelástico sin pérdida de la capacidad portante del sistema resistente a sismos (Figuras 4b y 4c). Esa caracterización se admite que es tipificable, pues presupone que se satisfacen las prescripciones para el diseño de miembros, contenidos en las Normas para Estructuras de Concreto Armado (COVENIN-MINDUR, 1753-81). Obsérvese que  $D$  también es mayor en la medida en que el sistema posee una mayor capacidad de redistribución de solicitaciones. Los valores adoptados para  $D$  están respaldados por abundantes estudios experimentales realizados en diversos países durante los últimos 25 años, y por numerosas observaciones de campo después de la ocurrencia de sismos severos.

La selección del valor de  $D$  a ser empleado en la obtención de los espectros de diseño, debe ser consistente con el comportamiento esperado de la edificación bajo acciones sísmicas. Por ejemplo, las características resistentes de la estructura de la Fig. 4b no permiten seleccionar el mismo valor de  $D$  que las de la Fig. 4c. En las Normas se reconoce este hecho, e incluso, cuando esté debidamente justificado, se autoriza el uso de valores de  $D$  mayores que los prescritos.

#### 4.2) Aplicación a la Verificación de Sistemas de Viviendas Económicas

La discusión anterior está relacionada a uno de los lineamientos básicos establecidos en la Norma (Sección 8.1), según el cual: "El sistema resistente a sismos debe concebirse de forma tal que la falla prematura de unos pocos elementos no amenace la estabilidad de la edificación". Se enfatiza así la necesidad de verificar la seguridad contra estados límites de colapso; en sistemas prefabricados de varios niveles a base de muros portantes, resulta necesaria la verificación de posibles mecanismos de colapso progresivo del tipo ejemplificado por la catástrofe de Ronan Point (Ref. 5).

Para el caso de sistemas no tipificados, o para aquellos en los cuales no sea factible predecir razonablemente su conducta bajo acciones de tipo sísmico, es conveniente ser conservador en la selección de  $D$  hasta tanto se posean suficientes evidencias que justifiquen valores menos conservadores. Usualmente, estas evidencias son de tipo experimental e implican el ensayo de prototipos bajo la repetición de desplazamientos de signo alternante a fin de obtener diagramas  $F-\delta$  como los de las Figuras 4b y 4c; esto permite evaluar también la sensibilidad de la solución adoptada a errores de ejecución.

Es importante enfatizar en la necesidad de garantizar una adecuada continuidad entre los diferentes elementos del sistema resistente a sismos. Por ejemplo, sistemas prefabricados de elementos lineales (vigas y columnas) con configuraciones similares a los sistemas aporticados Tipo I, (Fig. 4a), pueden ser completamente inadecuados bajo acciones de tipo sísmico si los detalles constructivos en las uniones no garantizan la debida restricción de rotaciones y la ductilidad necesaria en los apoyos de los elementos horizontales

(Fig. 4d). La comprobación de esto también deberá ser hecha por vía experimental.

## 5. ESPECTROS DE DISEÑO

Las ordenadas de los espectros de diseño, se obtienen a partir de las ordenadas de los espectros de respuesta elástica ya vistos, divididos por el factor de reducción de respuesta R el cual es igual a D para períodos mayores o iguales a 0,15 seg; desde este período hasta 0 varía linealmente de acuerdo a la expresión:

$$R = 1 + \frac{T}{0,15} (D - 1)$$

Lo anterior quiere decir que los espectros de respuesta elástica, y por tanto los coeficientes sísmicos de diseño, se pueden reducir en la medida en que el sistema resistente a sismos garantice una mayor capacidad de absorción y disipación de energía sin pérdida de capacidad portante (Fig. 5). Por el contrario, las fuerzas de diseño resultarán incrementadas cuando se trate de sistemas constructivos en los cuales sea necesario seleccionar pequeños valores de D.

## 6. MODELIZACIÓN Y MÉTODOS DE ANÁLISIS

En las Normas se establece que los efectos de las acciones sísmicas sean analizados, "suponiendo comportamiento elástico lineal de acuerdo con los principios de la Teoría de Estructuras". Se llama la atención allí sobre la hipótesis tácitamente aceptada en los métodos de análisis, según la cual: "los pisos, techos y sus conexiones actúan como diafragmas indeformables en su plano, y están diseñados para transmitir las fuerzas a los elementos

verticales del sistema resistente a sismos". Se indica asimismo, que los entrepisos prefabricados pueden aceptarse como diafragmas: "siempre que se demuestre la efectividad de la unión entre los diversos miembros". "Si los entrepisos no poseen la rigidez necesaria, deberá considerarse su flexibilidad en el análisis y diseño". De modo que, para poder aplicar los métodos de análisis de las Normas en sistemas con entrepisos constituidos por elementos prefabricados, es necesario demostrar que estos están unidos de forma tal que actúan como diafragmas indeformables.

Los criterios de análisis para cualquier edificación, son esencialmente los siguientes:

- a) análisis en 2 direcciones ortogonales;
- b) suponer comportamiento elástico;
- c) respetar la compatibilidad de deformaciones;
- d) superposición de efectos traslacionales y torsionales.

La experiencia de terremotos pasados y los resultados de estudios analíticos, revela que edificaciones en las cuales se presenten cambios importantes en: (i) la distribución de rigideces y/o de resistencias (Fig. 6a), (ii) la distribución de masas (Fig. 6b), (iii) o con excentricidades excesivas (Fig. 6c), requieren procedimientos de análisis más refinados que el llamado estático equivalente.

En las nuevas Normas se reconoce este hecho y los métodos de análisis están condicionados a la regularidad de la edificación; las investigaciones que respaldan el método estático equivalente utilizado en la Norma, limitan su aplicabilidad a 20 pisos o 60 metros de altura medido desde el nivel