

# EVALUACIÓN DE CÓDIGO SÍSMICO

(Original: ingles)

## MÉXICO

*Evaluación llevada a cabo por Jorge Gutiérrez*

**NOMBRE DEL DOCUMENTO:** “Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo”.

Este documento incluye únicamente regulaciones específicas de diseño sísmico y está complementado por el “Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal”

**AÑO:** 2003 (ver Comentario Generales).

**COMENTARIOS GENERALES:** Las regulaciones sísmicas más ampliamente conocidas en México son las de la Ciudad de México. Estas previsiones son adoptadas generalmente para otras partes del país, con las debidas consideraciones de las diferencias en el riesgo sísmico y condiciones de suelo.

El Código de Construcción de la Ciudad de México está constituido por previsiones generales incluidas en el cuerpo principal del Código, y por Normas Técnicas Complementarias para materiales específicos como concreto, acero, mampostería o madera y para algunas acciones específicas como vientos o terremotos.

Aunque las “Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo” utilizadas actualmente son de 1995, hay un proyecto final actualizado que se espera sea aprobado durante 2003. La evaluación se refiere a este proyecto actualizado.

**TEMAS ESPECÍFICOS:**

**NOTAS:**

- Los números entre corchetes se refieren a capítulos o artículos específicos del proyecto de 2003 de las “Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo”: [1.1].
- Se harán algunas referencias a las previsiones generales contenidas en el cuerpo principal del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal [204 Reglamento de Construcciones]. Las referencias para este documentos fueron tomadas de “Regulaciones Sísmicas para Diseño Sísmico, una Lista Mundial – 1996”, IAEE, Japón, 1996.
- Los números entre paréntesis se refieren a temas del presente documento de evaluación: (ver 2.2).

## 1. FILOSOFÍA GENERAL

### 1.1 Conceptos Explícitos. [1.1]

La Norma define requisitos mínimos; el diseñador, de acuerdo con el propietario, puede escoger requisitos más conservadores para reducir las pérdidas económicas.

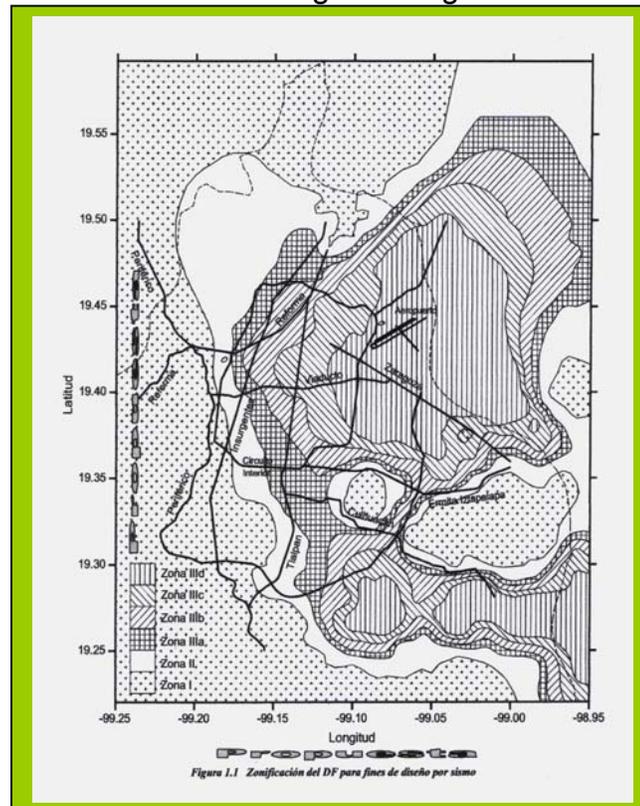
### 1.2 Objetivos del Desempeño. [1.1]

El propósito de la Norma es obtener una seguridad adecuada para garantizar que, para el terremoto de mayor intensidad probable, no habrá ninguna falla estructural mayor ni pérdida de vida, aunque podría haber daños que impidan los servicios y demanden reparaciones significativas.

## 2. ZONIFICACIÓN SÍSMICA Y CARACTERIZACIÓN DE SITIO

### 2.1 Zonificación Sísmica (Calidad de Datos). [1.4]

Como fue mencionado la Norma está supuesta para el Distrito Federal. La versión de 1995 tenía tres zonas (I, II y III). La Norma propuesta para 2003 tiene seis Zonas ya que la Zona III se divide en cuatro sub-zonas (I, II, III<sub>a</sub>, III<sub>b</sub>, III<sub>c</sub> y III<sub>d</sub>) como se muestra en la siguiente figura:



Las Zonas se definen esencialmente por las condiciones del tipo de sitio, las cuales han sido estudiadas a profundidad. Por lo tanto, la calidad de los datos es muy buena.

## **2.2 Niveles de Intensidad Sísmica. [1.5]**

Para edificaciones del Grupo B (ver 3.1) solo se asigna un nivel de intensidad sísmica a cada zona o sub-zona sísmica (ver 2.6). Estos niveles se incrementan en 50% para las edificaciones del Grupo A (ver 3.1) y también son diferentes para el método simplificado de análisis (ver 5.2). Sin embargo, estas modificaciones no se asocian a intensidades sísmicas específicas.

## **2.3 Consideraciones de Falla Cercana.**

No se ha considerado.

## **2.4 Requisitos de Sitio.**

No se han mencionado.

## **2.5 Clasificación de Sitio. [1.4]**

Como se mencionó (ver 2.1), el área está dividida en seis diferentes zonas y sub-zonas conforme a las siguientes características:

Zona I: Tierra Dura  
Zona II: Transición  
Zona III: Suelo Suave (dividido en cuatro sub-zonas)

## **2.6 Aceleraciones Pico en Tierra (Horizontales y Verticales). [3]**

Las aceleraciones pico en tierra horizontales  $a_0$  (en relación a la gravedad) se definen para cada zona o sub-zona:

<b>Zona</b>	<b><math>a_0</math></b>
I	0.04
II	0.08
III <sub>a</sub>	0.10
III <sub>b</sub>	0.11
III <sub>c</sub>	0.10
III <sub>d</sub>	0.10

No hay referencia a aceleraciones pico en tierra verticales.

### 3. PARÁMETROS PARA LA CLASIFICACIÓN ESTRUCTURAL

#### 3.1 Ocupación e Importancia. [174 Reglamento de Construcciones]

Existen dos Grupos, con Factores de Importancia correspondientes:

**Grupo A:** Son aquellas estructuras cuyas fallas pueden causar un alto número de muertes, altas pérdidas económicas y culturales y riesgo causado por sus contenidos tóxicos o explosivos. También incluye aquellas que deben mantenerse en servicio después de una emergencia urbana. Factor de Importancia  $I = 1.5$

**Grupo B:** Todas las estructuras no incluidas en el Grupo A. Factor de Importancia  $I = 1.0$

#### 3.2 Tipo Estructural. [5]

Ningún capítulo o artículo específico de la Norma define explícitamente los tipos estructurales. Sin embargo varios tipos estructurales son mencionados en relación a la definición del Factor de Reducción  $Q$  utilizado en los Espectros de Diseño (ver 4.2). Estos son:

- Sistemas de marco (acero, concreto, amalgamas de acero-concreto).
- Sistemas de losa plana (concreto, acero),
- Sistemas de muro (mampostería, concreto, acero, amalgamas de acero-concreto).
- Sistemas de marco reforzado (acero, concéntrico y excéntrico).
- Sistemas prefabricados de concreto.
- Sistemas dobles, combinación de los sistemas anteriores con resistencia mínima para los marcos.

#### 3.3 Regularidad Estructural: Plana y Vertical. [6]

Una estructura Regular debe satisfacer once requisitos (para regularidad plana y vertical); de lo contrario será Irregular:

- Plano esencialmente simétrico. Componentes de resistencia ortogonales.
- Proporción de finura menor que 2.5.
- Con proporción a longitud menor que 2.5
- Sin esquinas reentrantes en plano.
- Diafragmas fuertes y rígidos.
- Diafragmas sin aperturas.
- Pesos de piso uniformes a través del peso (un incremento de no mas de 10% sobre el piso inferior).
- Dimensiones de piso uniformes a través de la altura.

- Todas las columnas restringidas en ambas direcciones horizontales en cada piso.
- Una reducción de no más de 50% en la resistencia y rigidez entre pisos adyacentes.
- Excentricidad menor que 10% de las dimensiones del plano en el piso (ambas direcciones).

Adicionalmente, una estructura Irregular se define como Severamente Irregular si:

- Presenta una reducción de más de 100% de la resistencia y rigidez entre pisos adyacentes.
- Contiene excentricidades mayores que 20% de las dimensiones del plano en cualquier piso.

Para una estructura Irregular, el Factor de Reducción Q (ver 4.2) será multiplicado por 0.9 si se presenta una irregularidad, por 0.8 si hay dos irregularidades y por 0.7 para Irregularidades Severas (conservando  $Q \geq 1$ ).

### **3.4 Redundancia Estructural. [1.2]**

Si cualquier columna, muro o marco reforzado contribuye con más de 35% de la resistencia total, su resistencia será 80% del correspondiente valor nominal estimado con las Normas.

### **3.5 Ductilidad de elementos y componentes. [5]**

El Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal contiene requisitos específicos para lograr ductilidad alta o moderada en los miembros y componentes estructurales para cada material estructural. El Factor de Reducción Q es mayor para estructuras diseñadas con elementos de ductilidad alta (ver 4.2)

## **4. ACCIONES SÍSMICAS**

### **4.1 Espectros de Respuesta Elásticos (Horizontales y Verticales). [3]**

Un espectro de respuesta elástico se define únicamente para los métodos de Superposición Modal (ver 5.4). Los espectros de respuesta de aceleración horizontal,  $a$ , están dados por:

$$\begin{array}{ll}
 a = a_0 + (c - a) (T/T_a) & \text{para } T < T_a \\
 a = c & \text{para } T_a \leq T \leq T_b \\
 a = q c & \text{para } T > T_b
 \end{array}$$

donde  $q = (T_b / T)^r$  y los valores de  $c$ ,  $a_o$ ,  $T_a$ ,  $T_b$  y  $r$  para cada zona se dan en el siguiente cuadro:

Zona	c	a <sub>o</sub>	T <sub>a</sub>	T <sub>b</sub>	r
I	0.16	0.04	0.20	1.35	1.0
II	0.32	0.08	0.20	1.35	1.33
III <sub>a</sub>	0.40	0.10	0.53	1.8	2
III <sub>b</sub>	0.45	0.11	0.85	3.0	2
III <sub>c</sub>	0.40	0.10	1.25	4.2	2
III <sub>d</sub>	0.30	0.10	0.85	4.2	2

No se considera ningún espectro elástico vertical.

#### 4.2 Espectros de Diseño. [4]

Un Factor de Reducción  $Q'$  se utiliza para el cálculo de las fuerzas sísmicas laterales con Métodos Estáticos (ver 5.3) y de Superposición Modal (ver 5.4), donde:

$$Q' = Q \quad \text{para } T \text{ desconocido o } T \geq T_a$$

$$Q' = 1 + (T / T_a)(Q - 1) \quad \text{para } T < T_a$$

Donde  $Q$  puede tomar valores de 1, 1.5, 2, 3 y 4 de acuerdo a los Tipos Estructurales (ver 3.2), materiales estructurales y ductilidad de elementos y componentes (ver 3.5). El siguiente cuadro resume los requisitos para diferentes valores de  $Q$ :

Q	Requisitos
4	<ul style="list-style-type: none"> <li>a. Tipos estructurales de Marco o Doble, de acero, concreto o amalgama de acero-concreto con marcos capaces de resistir 50% de la fuerza sísmica en acción.</li> <li>b. Tipos estructurales Dobles con muros de mampostería si la estructura sin ellos es capaz de resistir 80% de las fuerzas laterales totales.</li> <li>c. La resistencia lateral mínima en cualquier piso está dentro de 35% del promedio total.</li> <li>d. Si hay marcos reforzados de acero presentes, deben estar reforzados excéntricamente.</li> <li>e. Elementos y componentes diseñados para alta ductilidad.</li> </ul>
3	<ul style="list-style-type: none"> <li>a. Las condiciones previas (Q=4) b, d y e son satisfechas pero las condiciones a o c no lo son (en cualquier piso).</li> <li>b. Marcos reforzados de acero concéntricos diseñados para alta ductilidad.</li> </ul>
2	<ul style="list-style-type: none"> <li>a. Tipos estructurales de marco, muro o dobles de acero, concreto, amalgamas de acero-concreto o mampostería que no satisfacen ninguno de los requisitos para las condiciones previas (Q= 3 o 4).</li> <li>b. Edificaciones prefabricadas de concreto.</li> <li>c. Algunos tipos de edificaciones de madera o acero conforme a sus normas específicas.</li> </ul>
1.5	<ul style="list-style-type: none"> <li>a. Tipos estructurales de muro con muros de mampostería vacíos.</li> <li>b. Edificaciones de marco de madera.</li> </ul>
1	Edificaciones con otros materiales estructurales y sin justificación técnica para valores más altos.

### 4.3 Representación de historias de tiempo de aceleración. [9.2]

Historias de tiempo de aceleración ya sea registradas, simuladas o una combinación de ambas pueden ser utilizadas para análisis dinámico no lineal (ver 5.5). Un mínimo de cuatro historias de tiempo independientes debe ser utilizado; deberían ser compatibles con todos los criterios establecidos en la Norma.

### 4.4 Desplazamiento de Tierra del Diseño.

No se ha considerado.

## 5. FUERZAS DE DISEÑO, MÉTODOS DE ANÁLISIS Y LIMITACIONES DE DESVÍO

### 5.1 Combinaciones de Carga incluyendo los Efectos de Carga Sísmica Ortogonal. [Capítulo III, Reglamento de Construcciones]

$$CU = 1.5 (CM + CV_{\max}) \text{ para el Grupo de Estructuras A}$$

$$CU = 1.4 (CM + CV_{\max}) \text{ para el Grupo de Estructuras B}$$

$$CU = 1.1 (CM + CV_{\text{inst}}) + CS$$

$$CU = 0.9 (CM + CV_{\min}) + CS$$

donde

CU = Carga Unificada (para LRFD o Diseño de Resistencia)

CM = Carga Muerta

CV<sub>max</sub> = Carga Viva con intensidad máxima

CV<sub>inst</sub> = Carga Viva con intensidad instantánea

CV<sub>min</sub> = Carga Viva con intensidad mínima

CS = Carga Sísmica

La estructura debe ser diseñada para la acción simultánea de ambos componentes sísmicos horizontales utilizando el valor total en una dirección más 30% del valor en la otra dirección.

### 5.2 Procedimientos de Análisis Simplificado y Diseño. [2.1; 7]

Un método de análisis simplificado puede ser aplicado a edificaciones que satisfacen los siguientes requisitos:

- En cada planta, al menos 75% de las cargas verticales son sostenidas por muros distribuidos casi simétricamente (muros de mampostería, concreto, plancha de acero, amalgama de concreto-acero o madera reforzada) integrados por diafragmas horizontales (losas) con rigidez y resistencia suficientes.
- La proporción de longitud a anchura del plano es menor que 2.

- La altura es menos de 13 m y su proporción a la dimensión horizontal mínima es menor que 1.5.

Desplazamientos Horizontales, torsión y momentos de volcamiento no son considerados. Únicamente es necesario chequear que, en cada piso y para cada dirección horizontal, la resistencia de corte sea como mínimo igual a la demanda sísmica calculada con los Procedimientos del Método Estático (ver 5.3) pero utilizando los Coeficientes Sísmicos que se dan en el siguiente cuadro para edificaciones tipo B (o 1.5 veces los valores para edificaciones Tipo A):

Zona	Muros de concreto o mampostería sólidos			Muros de mampostería vacíos		
	Altura de construcción H (m)			Altura de construcción H (m)		
	H < 4	4<H<7	7<H<13	H < 4	4<H<7	7<H<13
I	0.07	0.08	0.08	0.10	0.11	0.11
II o III	0.13	0.16	0.19	0.15	0.19	0.23

Los Coeficientes para edificaciones de madera están dados en sus normas específicas. Para otros materiales estructurales sus Coeficientes Sísmicos deben basarse en evidencia analítica y experimental de su comportamiento bajo cargas cíclicas horizontales.

### 5.3 Procedimientos del Método Estático. [2.2; 8.1; 8.2]

Este método puede ser aplicado a edificaciones regulares (ver 3.3) no más altas que 30m o edificaciones irregulares no más altas que 20m en las Zonas II y III, o para edificaciones no más altas que 40m para las regulares y no más altas que 30m para las irregulares en la Zona I.

Inicialmente, la fuerza sismorresistente base total  $V_o$  como una proporción del peso estructural total  $W_o$  es calculada como:

$$V_o / W_o = c / Q' \geq a_o \quad (\text{para valores } c \text{ y } a_o \text{ ver Cuadro en 4.1; para } Q' \text{ ver 4.2})$$

$V_o$  es distribuida como fuerzas  $F_i$  en cada piso de peso  $W_i$  y altura  $h_i$  :

$$F_i = V_o [ W_i h_i / \sum_k W_k h_k ]$$

Luego, El período fundamental  $T$  es calculado por el método de Rayleigh.

Si  $T \leq T_b$  entonces  $V_o / W_o = (a/Q')$  (ver 4.1) y  $F_i$  es recalculado mediante la ecuación anterior.

Si  $T > T_b$  entonces las fuerzas  $F_i$  en cada nivel son:

$$F_i = W_i (k_1 h_i + k_2 h_i^2) (a/Q') \text{ donde } a \geq a_0$$

$$y \quad k_1 = [1 - 0.5 r (1-q)] [W_0 / \sum_k W_k h_k]$$

$$k_2 = 0.75 r (1-q) [W_0 / \sum_k W_k h_k^2]$$

$$q = (T_b / T)^r \text{ (ver 4.2)}$$

#### **5.4 Métodos de Superposición Modal. [2.2; 9.1]**

Este método estándar de análisis puede ser aplicado a todos los tipos de edificaciones. El Espectro de Diseño es  $(a/Q')$  (ver 4.1 y 4.2).

Se consideran dos procedimientos analíticos:

- Bi-Dimensional (1 dof por nivel)
- Tri-Dimensional con Diafragmas Rígidos (3 dof por nivel)

En el primer caso todos los modos con período natural mayor que 0.4s deben ser incluidos (no menos que el número de pisos por edificación de 3 o menos pisos). En el segundo caso el número de modos considerados deben tener un peso efectivo acumulado de 90% del peso total.

Los Modos pueden ser combinados según la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados SRSS para frecuencias separadas entre sí por más de 10%, de lo contrario sus efectos de acoplamiento deben ser considerados.

Los desplazamientos inelásticos serán estimados como  $Q$  (ver 4.2) veces los desplazamientos elásticos obtenidos por el análisis. Estos desplazamientos inelásticos serán utilizados para chequear límites de desvío y efectos  $P-\Delta$  (ver 6.4).

#### **5.5 Métodos No Lineales. [9.2]**

Un párrafo corto establece que el análisis de la historia de tiempo no lineal está permitido. Como mínimo cuatro registros de aceleración compatibles (ver 4.3) en cada dirección horizontal deberían ser utilizados y las incertidumbres en los parámetros estructurales deben ser consideradas.

#### **5.6 Consideraciones Torsionales. [8.5; 9.1]**

Para los procedimientos del Método Estático (ver 5.3) momentos Torsionales en cada piso serán calculados como la fuerza sismorresistente del piso multiplicada por la excentricidad menos

favorable de ya sea  $1.5 e_i + 0.1b$  o  $e_i - 0.1b$ , donde  $e_i$  es la excentricidad calculada y  $b$  es la normal de la dimensión del plano a la dirección sísmica. Para edificaciones con  $Q \geq 3$  (ver 4.2) la excentricidad accidental no puede exceder  $0.2b$ . Para estos tipos de edificaciones debe haber una distribución similar de rigidez y resistencia entre los elementos y componentes de resistencia de fuerza lateral.

Para Métodos de Superposición Modal (ver 5.5) un efecto de torsión accidental de  $\pm 0.1b$  debería incluirse en cada nivel de piso para cada dirección sísmica.

### **5.7 Limitaciones de Desvío. [1.8]**

Ángulos de desvío laterales inter-piso deberían limitarse a 0.006 si los elementos no pueden resistir desvíos más grandes, de lo contrario a 0.012. Desvíos inelásticos son los valores elásticos multiplicados por el Factor de Reducción  $Q$  (ver 4.2).

El desvío en los sistemas de losa plana siempre serán limitados a 0.006.

### **5.8 Consideraciones de Interacción Suelo- Estructura. [Apéndice A]**

Debido a condiciones de suelo suave presentes en áreas importantes del Distrito Federal, los efectos de Interacción de Suelo-Estructura son un asunto particularmente delicado. Regulaciones específicas y detalladas para tomar en cuenta estos efectos se incluyen en el Apéndice A, para ser utilizados en el diseño por sismo de estructuras en las Zonas II y III.

## **6. VERIFICACIONES DE SEGURIDAD**

### **6.1 Separación De Edificaciones. [1.10]**

El Código especifica separaciones mínimas de los límites del sitio de 50mm o los desplazamientos horizontales inelásticos correspondientes incrementados por 0,001, 0.003 o 0.006 veces la altura para las Zonas I, II o III. Para el Método Simplificado de Análisis (ver 5.2) los incrementos son 0.007, 0.009 y 0.012. Se deben considerar rotaciones de la base (ver 5.8) cuando éstas son significativas.

Desde edificaciones adyacentes o cuerpos independientes de una edificación, su separación total será los valores sumados de ambos cuerpos o la mitad del mismo si tienen sistemas estructurales similares y la misma altura en todos los niveles.

## 6.2 Requerimientos para Diafragmas Horizontales.

Aparte del hecho de que los diafragmas de Estructuras Regulares deben satisfacer ciertos requisitos (ver 3.3), no hay requisitos específicos de diseño para ellos más que la afirmación de que los mismos deberían tener suficiente resistencia y rigidez para resistir y transmitir las fuerzas sísmicas a los sistemas de resistencia a terremotos.

## 6.3 Requerimientos para Cimientos.

Aparte de una referencia menor a que ambas, la estructura y su cimiento deben satisfacer todos los límites finales y de servicio [1.2], no se incluyen requisitos para cimiento en las “Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo” sino en el “Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal”.

Las propiedades de rigidez y amortiguamiento de cimientos se especifican para la evaluación de efectos de interacción suelo-estructura (ver 5.8).

## 6.4 Consideraciones de P-Δ. [8.6]

Efectos  $P-\Delta$  de segundo orden deben ser incluidos en el análisis (ya sea Método Estático o Superposición Modal), si en cualquier piso  $i$ :

$$\theta_i = (\Delta / \Delta h)_i > 0.08 [V_i / (\sum_{k=i} W_k)]$$

donde  $\Delta$  = Desvío inelástico (ver 5.7).  
 $\Delta h$  = Altura del piso  
 $V_i$  = Sismorresistencia lateral del piso en el nivel  $i$   
 $\sum_{k=i} W_k$  = Peso total de la edificación por encima de  $i$

## 6.5 Componentes No Estructurales. [1.3.2; 8.4]

Los elementos y componentes no estructurales en el nivel  $h_i$  deben resistir una fuerza lateral, la cual es igual a  $(1+c'/a_0)$  veces la fuerza correspondiente, si los componentes fueron puestos en el nivel base de la estructura;  $c' = (F_i / W_i)$ .

Paneles de vidrio y muros no resistentes a terremoto no deberían participar en los desplazamientos de edificación inelásticos correspondientes en su propia dirección, pero deberían resistir las fuerzas sísmicas fuera del plano.

## **6.6 Previsiones para el Aislamiento de la Base. [1.12]**

Un solo párrafo afirma que cuando se adoptan dispositivos de aislamiento de base o de disipación pasiva, se pueden usar criterios alternativos de diseño para terremotos diferentes a los de la Norma pero congruentes con la ella, siempre que su eficacia y todos sus parámetros de diseño sean apropiadamente justificados.

## **7. EDIFICIOS RESIDENCIALES PEQUEÑOS. [7]**

Ninguna recomendación específica se da para edificios residenciales pequeños pero las provisiones para el Análisis Simplificado (ver 5.2) se aplican a muchas de estas edificaciones.

## **8. PREVISIONES PARA EDIFICACIONES EXISTENTES. [11]**

Un capítulo específico trata sobre este asunto. Considera y penaliza el caso de estructuras inclinadas presentes en muchas edificaciones existentes debido a las condiciones de suelo suave de la ciudad.

### **RECOMENDACIONES PARA MEJORAR EL CÓDIGO**

**El inconveniente principal en las Regulaciones del Código Sísmico para México es la ausencia de un Código nacional. Las Normas evaluadas pueden ser consideradas de lo más moderno y sofisticado pero éstas están diseñadas específicamente para el Distrito Federal, con condiciones de sismicidad y de sitio muy específicas. Las autoridades nacionales deberían ser estimuladas para emitir un Código Nacional con la debida consideración de las condiciones de sismicidad y de sitio del país.**

**Adicionalmente, se recomienda que los Procedimientos del Método Estático sean limitados únicamente a estructuras Regulares, ya que sus aproximaciones inherentes pueden llevar a acumular errores en el análisis de estructuras Irregulares de cualquier altura.**