

OBSERVACIONES A LOS CRITERIOS DE DISEÑO SISMORRESISTENTE DEL REGLAMENTO DE CONSTRUCCIONES PARA EL DISTRITO FEDERAL*

Eduardo Miranda

**Centro Nacional de Prevención de Desastres
Secretaría de Gobernación, México, D.F.**

*Codes should be considered live objects, and not allowed to
sit around too long without some indicated improvement.*

John A. Blume

RESUMEN

Con base en información recopilada en la red acelerográfica de la ciudad de México y en investigaciones recientes sobre el comportamiento sísmico de estructuras en suelos blandos se presenta una evaluación de los principales criterios de diseño por sismo de la versión de 1993 del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal. Se pone un especial énfasis en los procedimientos de diseño para el cálculo de fuerzas y desplazamientos laterales. Se comparan los espectros de diseño con espectros de respuesta lineal calculados para movimientos severos registrados durante el sismo de 1985 y con espectros de respuesta lineal inferidos a partir de movimientos registrados en sismos de moderada intensidad. Se comparan los factores de comportamiento sísmico con factores de reducción de fuerzas calculados en sistemas de un grado de libertad con comportamiento no lineal. Se comparan las demandas de desplazamiento lateral implícitas en el Reglamento con las obtenidas a partir de movimientos registrados. Se muestra que los procedimientos que actualmente se emplean no ofrecen al diseñador una claridad de conceptos, lo que se puede traducir tanto en errores de interpretación como en una inadecuada estimación de demandas de resistencia y deformación lateral. Finalmente, se hacen recomendaciones para mejorar los criterios de diseño por sismo que actualmente se emplean.

ABSTRACT

An evaluation of the seismic design criteria of the current edition of the Building Code of the Federal District is presented. The evaluation is based on earthquake records obtained in the strong-motion accelerograph network of Mexico City and on results of recent research on the behavior of structures built on soft soils. A special emphasis is made on the procedures that are used to compute the design lateral forces and the lateral displacement demands. Design spectra are compared with linear-elastic response spectra computed with severe earthquake ground motions recorded during the 1985 earthquake and with response spectra inferred from earthquake ground motions recorded during moderate earthquakes. Seismic behavior factors are compared with force reduction factors computed in nonlinear single-degree-of-freedom systems. Lateral displacement demands implicit in the Building Code are compared with those obtained with recorded earthquake ground motions. It is shown that the procedures currently used in the Code do not offer a clear view of the main seismic response parameters. Thus, the use of the recommended procedures can lead to interpretation errors as well as to an inadequate estimation of seismic strength and deformation demands. Finally, recommendations to improve the clarity and rationality of the Code are made.

* Preparado para conmemorar el décimo aniversario del sismo del 19 de septiembre de 1985

INTRODUCCIÓN

El objetivo del diseño sismorresistente es proveer a una estructura de una adecuada capacidad de resistencia, de rigidez, de disipación de energía y de deformación en rango inelástico tal que permitan evitar daños en la estructura y en los componentes no estructurales durante temblores de frecuente ocurrencia, así como evitar pérdidas de vidas humanas y lesiones a seres humanos en sismos intensos de ocurrencia poco frecuente. Lograr este objetivo implica mucho más que la simple aplicación de una serie de procedimientos reflejados en un reglamento de diseño; implica la comprensión de los principales factores que determinan la respuesta sísmica de las estructuras, así como el ingenio para producir estructuras con las características requeridas (Esteva, 1980). Para facilitar el cumplimiento de este objetivo, un reglamento debe presentar los principales criterios de diseño de una manera racional, clara y lo más simple posible para lograr que el usuario conozca y comprenda, no solo las bases de dichos procedimientos, sino también sus limitaciones. Hoy en día, la mayor parte de los reglamentos de diseño por sismo se basan en procedimientos simplificados que no tienen una relación transparente con los parámetros básicos de demandas y capacidades estructurales de los cuales depende la respuesta sísmica de una estructura. Un objetivo deseable en un reglamento de diseño es la incorporación clara y explícita en el proceso de diseño de dichos parámetros básicos de demandas y capacidades estructurales. Un reglamento en que sus procedimientos de diseño tienen bases racionales y en que las hipótesis o resultados en los que se basa están claramente especificados tiene la ventaja de que en la medida en la que se obtenga mayor información sobre dichos parámetros básicos de diseño, será más fácil y rápido el actualizarlo y mejorarlo.

El Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, RCDF, es sin duda uno de los reglamentos de diseño por sismo más avanzados del mundo. Desde la publicación de las Normas de Emergencia de 1957, pero principalmente con la edición de 1976, este reglamento se ha distinguido por la incorporación de aspectos novedosos en Ingeniería Sísmica (Rosenblueth, 1976, Bertero, 1986, Chopra y Cruz, 1986). A raíz del sismo del 19 de septiembre de 1985, la edición de 1976 del RCDF (DDF, 1976) fue modificada substancialmente, primero a través de las Normas de Emergencia, NDE, publicadas

el 18 de octubre de 1985 (DDF, 1985) y después a través de una nueva edición publicada el 6 de julio de 1987 (DDF, 1987a). La versión vigente del reglamento corresponde a la publicada el 2 de agosto de 1993 (DDF, 1993).

Al momento de ocurrir el sismo de 1985, únicamente se contaba con diez acelerógrafos en el valle de México. A partir de 1986 se inició el diseño, instalación y operación de una nueva red de acelerógrafos en la ciudad de México (Espinosa et al. 1989, Quaas et al. 1991, Quaas et al. 1993), la cual actualmente consta de 160 acelerógrafos, mismos que en tan solo nueve años han producido un gran número de acelerogramas. A su vez, esta información ha generado un gran número de investigaciones relacionadas con la respuesta sísmica de estructuras en el Distrito Federal. Cuando se elaboró la versión actual del RCDF no se contaba con toda esta información, por lo que resulta interesante, a diez años de ocurrido el sismo de 1985, realizar una evaluación de los principales criterios de diseño por sismo a la luz de los resultados de investigaciones recientes. El objetivo de este trabajo es el presentar una serie de observaciones a los criterios de diseño del RCDF-93, poniendo un especial énfasis en la llamada zona del lago.

MICROZONACIÓN

El Reglamento de Construcciones del Distrito Federal reconoció desde 1957 la gran diferencia en demandas sísmicas en distintas zonas de la ciudad de México, por medio del establecimiento de una microzonación en Las Normas de Emergencia generadas a raíz del sismo del 28 julio de 1957 (DDF, 1957). Desde entonces, la microzonación del Distrito Federal ha sufrido varias modificaciones hasta llegar a la actual en la que se divide el Distrito Federal básicamente en cuatro zonas en las que se especifican tres espectros de diseño diferentes. Estas zonas se conocen con el nombre de zona de lomas (zona I), zona de transición (zona II) y zona de lago (zonas III y IV). El objetivo principal de esta clasificación es distinguir las diferencias que existen en demandas sísmicas en estructuras construidas en una y otra zona de la ciudad.

En la figura 1 se muestran los espectros de respuesta de tres movimientos registrados en la llamada zona de lago durante el sismo del 19 de septiembre de 1985. Los tres espectros de respuesta corresponden a sistemas de un grado de libertad

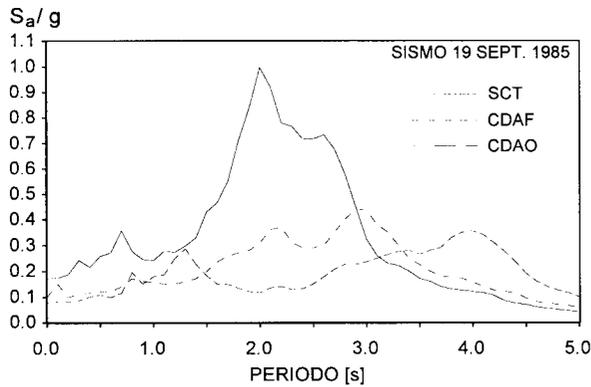


Fig 1. Espectros de respuesta de sistemas con 5% del amortiguamiento crítico correspondientes a tres movimientos de terreno registrados durante el sismo de 1985 en zona del lago.

con comportamiento elástico lineal y un amortiguamiento igual a 5% del crítico. En estos espectros se pueden apreciar cuatro importantes aspectos: (1) las ordenadas espectrales máximas son significativamente diferentes; por ejemplo, mientras que para el registro de SCT la ordenada espectral máxima es de 1.0g, para los registros CDAF y CDAO son de 0.43g y 0.36g, respectivamente; (2) el periodo en el cual se obtiene la ordenada espectral máxima es muy distinto; mientras que para el registro en SCT la ordenada espectral máxima se produce para un periodo de 2 s, para el registro en CDAF el máximo se produce para un periodo de 3 s y para CDAO para un periodo de 4 s; (3) la amplificación de la ordenada espectral máxima con respecto a la aceleración máxima del terreno es diferente, mientras que para el registro de SCT esta amplificación es de 5.9, para el registro CDAF es de 4.2 y para CDAO es de 4.5; (4) el intervalo de periodos en el que las ordenadas espectrales superan al 50% de la ordenada espectral máxima es diferente; para el registro SCT es entre 1.6 y 2.8 s, para el registro CDAF es entre 1.6 y 3.5 s, lo que implica que esta banda de periodos es 60% mayor para CDAF que para SCT. Estas observaciones indican que estructuras cercanas a estos tres sitios pueden estar sujetas a movimientos de terreno con contenidos de frecuencia muy diferentes y por lo tanto a demandas sísmicas también muy diferentes. Sin embargo, de acuerdo al RCDF los tres sitios pertenecen a la misma zona y por lo tanto se espera que las demandas de resistencia lateral y deformación lateral sean las mismas.

En la figura 2 se presentan espectros de respuesta calculados para el sismo del 24 de octubre de 1993 para otros tres sitios de la zona blanda del Distrito Federal. Puede verse que, nuevamente, las demandas sísmicas para estructuras en estos tres sitios son significativamente diferentes. De hecho, las cuatro observaciones antes mencionadas también son aplicables para estos registros. Es recomendable que diferencias tan importantes en demandas sísmicas como las mostradas en las figuras 1 y 2 se vean reflejadas en espectros de diseño diferentes, lo que implica una subdivisión de la zona III de la microzonación del reglamento. Diferencias en espectros de respuesta mucho menores a las mostradas en las figuras 1 y 2 (Seed, Ugas y Lysmer, 1974) dieron lugar a la especificación de tres espectros de diseño en documentos que sirven de base para la elaboración de reglamentos de diseño por sismo en los Estados Unidos (Applied Technology Council, 1978) y en Europa (Commission of the European Communities, 1988).

Estudios recientes sobre la respuesta sísmica de estructuras construidas sobre suelos blandos han mostrado que las demandas sísmicas y por lo tanto el comportamiento estructural son particularmente sensibles a la relación entre el periodo fundamental de la estructura y el periodo predominante del movimiento de terreno (Miranda, 1991; Rahnama y Krawinkler, 1993; Ordaz, Pérez Rocha y Meli, 1993). De acuerdo con Kobayashi et al. (1986), Lermo et al. (1988), Reinoso y Lermo, (1991), dentro de la zona clasificada como zona III por el RCDF-

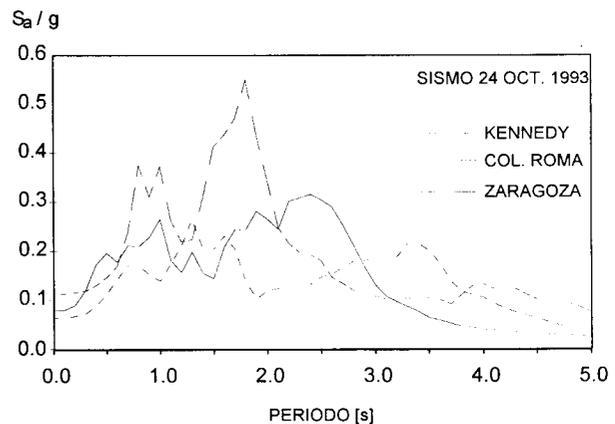


Fig 2. Espectros de respuesta de sistemas con 5% del amortiguamiento crítico correspondientes a tres movimientos de terreno registrados durante el sismo del 24 de octubre de 1993 en zona del lago.

93 el periodo predominante del terreno puede variar entre 1.0 s hasta 5.2 s, lo que puede dar lugar a diferencias importantes en demandas sísmicas para estructuras en dicha zona. El apéndice de las Normas Técnicas Complementarias de Diseño por Sismo, NTCDS, del RCDF-87 (DDF-87b), incluye un método para obtener espectros de diseño a partir del periodo dominante más largo del terreno, T_s , en el que los periodos característicos T_a , T_b y el coeficiente sísmico c se calculan a partir de T_s . Si bien este método representa un avance significativo con respecto a lo especificado en el cuerpo principal de las NTCDS, en el ejercicio profesional prácticamente no se emplea y no refleja las diferencias en ordenadas espectrales máximas que se observan en espectros de respuesta calculados a partir movimientos de terreno medidos en el lugar.

ESPECTROS DE DISEÑO

Dado que, por conveniencia, los efectos de las fuerzas laterales de diseño son distribuidos en los elementos estructurales mediante análisis que suponen un comportamiento elástico lineal, la mayor parte de los reglamentos determinan sus fuerzas de diseño por sismo a partir de espectros de diseño elásticos. Los espectros de diseño elástico normalmente se especifican como la envolvente suavizada de todos los posibles espectros de respuesta en un determinado sitio asociados a un cierto nivel de probabilidad de excedencia. Es común que dichos espectros de diseño elástico se especifiquen con base en ordenadas espectrales máximas asociadas a la media o con base en ordenadas espectrales asociadas a la media más una desviación estándar (IAEE, 1982).

La figura 3 muestra una comparación del espectro de diseño correspondiente a la zona III del RCDF-93 y el espectro de respuesta lineal calculado para la componente este-oeste del registro SCT. Puede verse que la ordenada del espectro de diseño correspondiente a periodo igual a cero no corresponde a la aceleración máxima del terreno y que el espectro de respuesta calculado a partir del movimiento de terreno es mucho mayor que el adoptado como espectro de diseño. Por ello, el espectro de diseño adoptado por el RCDF no representa una envolvente de posibles espectros de respuesta en la zona del lago.

De acuerdo con Rosenblueth et al. (1989) en el RCDF-93 los espectros de diseño corresponden

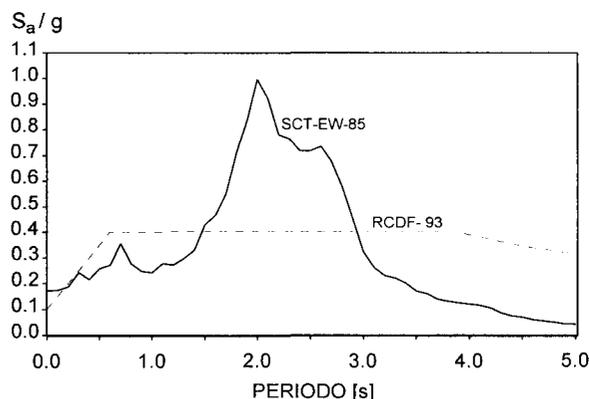


Fig 3. Comparación del espectro de respuesta del movimiento registrado en SCT durante el sismo de 1985 con el espectro de aceleraciones para diseño sísmico del RCDF-93.

a la envolvente de espectros esperados en el Distrito Federal multiplicados por un factor de 0.4. Las razones que se mencionan en esta referencia para adoptar dicha reducción son: (1) que al aceptar cierto daño estructural se puede diseñar para fuerzas menores a las requeridas para mantener a la estructura en intervalo elástico; (2) que los factores de reducción por comportamiento no lineal para movimientos de banda angosta (como los de la zona de lago) son mucho mayores que los factores de reducción para movimientos de banda ancha (como los de terreno firme); (3) que estructuras que se diseñan con un factor de comportamiento sísmico, Q , igual a 1, son capaces de desarrollar cierta ductilidad; (4) que las estructuras convencionales poseen una sobrerresistencia importante de tal forma que su resistencia lateral es mucho mayor a la resistencia lateral para la cual fueron diseñadas; y (5) que el adoptar dicho valor implica una desviación menos drástica del formato adoptado en la versión de 1976 del RCDF y de las NDE de 1985. Un reglamento de diseño debe procurar un nivel de seguridad aproximadamente uniforme para estructuras en la misma zona y de la misma importancia. Las cuatro primeras razones provocan reducciones que de ninguna manera se pueden considerar como independientes del periodo de vibración de la estructura. En especial las tres primeras están asociadas a fuertes variaciones en el nivel de reducción de fuerzas, el cual depende del nivel de deformación no lineal y de la relación entre el periodo fundamental de la estructura y el periodo predominante del movimiento de terreno, por lo que la adopción de un factor constante igual

a 0.4 para multiplicar las ordenadas de espectros de respuestas (independiente del periodo fundamental de la estructura, del periodo dominante de terreno y del nivel de deformación) puede dar lugar a importantes diferencias en el nivel de daño esperado para estructuras en zona del lago.

Los comentarios a las NTCDS (Rosenblueth y Gómez, 1991) mencionan que se decidió multiplicar por 0.4 la ordenada máxima del espectro de aceleraciones para 5% de amortiguamiento calculado a partir del registro más intenso que se obtuvo en 1985, y por lo tanto adoptar dicho valor como coeficiente sísmico para la zona de lago, con base en las interpretaciones de las experiencias del grupo de especialistas integrantes del Subcomité de Normas y Procedimientos de Construcción. Se menciona además que, este proceder, no obstante su subjetividad, constituye la forma más viable para definir el nivel de seguridad de las obras que han de diseñarse con un reglamento.

Si bien las razones mencionadas para adoptar un espectro de diseño que no corresponden a los espectros de respuesta elásticos esperados en la zona de lago pueden ser perfectamente justificadas, ello puede provocar los siguientes inconvenientes: (A) que no exista una relación transparente entre el espectro de diseño y la aceleración máxima de terreno o el nivel de amplificación que puede sufrir dicha aceleración; (B) que el nivel de seguridad no sea uniforme para todas las estructuras; (C) que no se indique en forma clara y explícita al diseñador el nivel de fuerzas y aceleraciones laterales a que puede estar sujeta la estructura durante un sismo intenso; y (D) que el diseñador no pueda obtener a partir del espectro de diseño una estimación adecuada de los desplazamientos laterales a los que se puede ver sometida la estructura durante un sismo intenso.

A partir de 1986 varios métodos han sido propuestos para la estimación de espectros de respuesta lineal en el Valle de México en sitios en los que no se tienen registros sísmicos durante movimientos de terreno intensos. Algunos de estos métodos son los siguientes: (i) usando la teoría de vibraciones aleatorias y a partir de funciones de transferencia empíricas calculadas como el cociente de espectros de amplitud de Fourier de sitios blandos y de sitios en suelo firme (Ordaz et al., 1988; Reinoso et al., 1992; Arciniega et al., 1993); (ii) a partir de cocientes de espectros de respues-

ta empíricos (Rosenblueth y Arciniega 1992, Arciniega et al. 1993); (iii) por medio de acelerogramas sintéticos generados a partir de registros de sismos pequeños usados como funciones de Green y de funciones moduladoras en el dominio del tiempo y de la frecuencia (Joyner y Boore 1988); (iv) por medio de acelerogramas sintéticos generados a partir de registros de sismos pequeños usados como funciones de Green y de un modelo de la fuente sísmica (Ordaz et al., 1993); (v) a partir de las características geométricas y dinámicas de los depósitos de suelo del sitio en cuestión, de un modelo de respuesta lineal o lineal-equivalente unidimensional y de un movimiento en suelo firme (Schnabel et al., 1972; Seed et al., 1987); y (vi) a partir de registros de sismos intensos en suelos firmes y de funciones de transferencia obtenidas a partir de microtemblores (Kobayashi et al., 1986b). En la figura 4 pueden verse los espectros de diseño calculados con algunos de estos métodos para tres sitios en la zona de lago de ciudad de México. Puede verse, por un lado, que las demandas pueden ser significativamente diferentes en sitios en los que de acuerdo al reglamento se esperan las mismas demandas sísmicas, y por otro, que las ordenadas espectrales en algunos sitios pueden superar 1.0g, que es la ordenada espectral máxima que se consideró para elaborar el RCDF-87. De los 27 sitios de zona de lago estudiados por Ordaz et al. (1989), en 14 se estima que pueden presentarse aceleraciones espectrales (asociadas a amortiguamientos de 5% del amortiguamiento crítico) mayores a 1.0g, y en 8 sitios aceleraciones espectrales mayores a 1.2g.

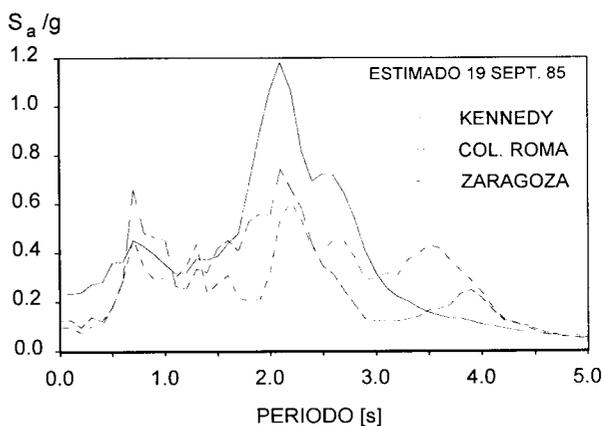


Fig 4. Espectros de respuesta de sistemas con 5% del amortiguamiento crítico estimados para el sismo del 19 de septiembre de 1985 para tres sitios en zona del lago.

REDUCCIONES AL ESPECTRO ELÁSTICO

A) Reducciones por comportamiento no lineal:

Por razones económicas, la filosofía de diseño sismorresistente adoptada en la mayoría de la regiones sísmicas mundiales acepta deformaciones inelásticas en la estructura durante sismos severos. Como resultado de esta filosofía de diseño, las resistencias laterales de diseño adoptadas en los reglamentos son menores, y en algunos casos mucho menores, que la resistencia lateral necesaria para mantener la estructura en el intervalo elástico (Miranda 1993a).

En los reglamentos de diseño, las reducciones en fuerzas producidas por la disipación de energía histerética, esto es, las reducciones en fuerzas que se obtienen al permitir un comportamiento no lineal en la estructura, normalmente se toman en cuenta a través de factores de reducción. La obtención de espectros inelásticos de diseño confiables a partir de espectros elásticos requiere una buena estimación de estos factores de reducción.

A pesar que desde 1960 se sabe que los factores de reducción presentan variaciones importantes con cambios en el periodo de vibración (Veletsos y Newmark, 1960), la mayoría de los reglamentos de diseño especifican factores de reducción constantes (independientes del periodo de vibración). Para estructuras construidas sobre roca o sobre suelos firmes las variaciones en el factor de reducción se presentan principalmente para periodos cortos. El RCDF fue el primer reglamento de diseño sismorresistente en reconocer la variación del factor de reducción con cambios en el periodo de vibración (T) para periodos cortos. Para estos periodos, desde 1976, el RCDF especifica una variación lineal del factor de reducción, Q' , entre 1 y el factor de comportamiento sísmico, Q , de acuerdo con la siguiente expresión

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

donde T es el periodo fundamental de vibración de la estructura y T_a es un periodo característico. Los factores de reducción correspondientes a factores de comportamiento sísmico de 2, 3 y 4 se muestran en la figura 5. Más recientemente, varia-

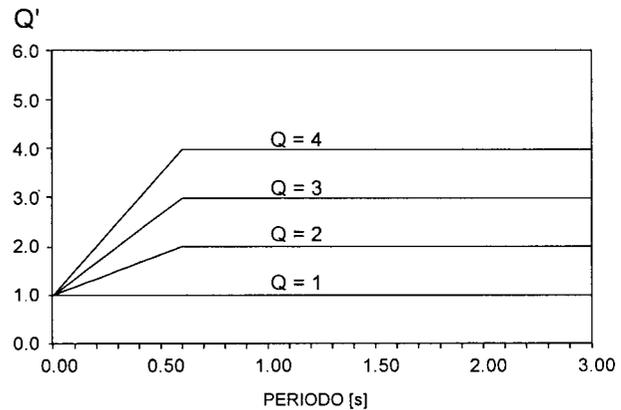


Fig 5. Factor de reducción Q' del espectro de aceleraciones de diseño sísmico para la zona del lago del RCDF-93.

ciones de tipo bilineal como las del RCDF han sido también adoptadas en Nueva Zelanda, Argentina y propuestas para el reglamento de Canadá y Eslovenia (Miranda y Bertero, 1994).

El factor de reducción debido al comportamiento no lineal de la estructura, R_μ , está definido como el cociente de la demanda de resistencia elástica entre la demanda de resistencia inelástica

$$R_\mu = \frac{F_y(\mu_i = 1)}{F_y(\mu_i = \mu)} \quad (2)$$

donde $F_y(\mu_i = 1)$ es la resistencia lateral requerida para mantener el sistema elástico y $F_y(\mu_i = \mu)$ es la resistencia lateral requerida para limitar la demanda de ductilidad μ a que sea menor o igual que una determinada demanda de ductilidad μ_i . Para fines de diseño, R_μ representa la máxima reducción de la resistencia lateral que se puede tomar para controlar la demanda de ductilidad por debajo de un valor predeterminado μ_i (la máxima ductilidad que se puede tolerar) en una estructura que tenga una resistencia lateral igual a su resistencia de diseño.

De acuerdo con varios estudios, los factores de reducción de tipo bilineal, como los adoptados por el RCDF (figura 5), son aproximadamente adecuados para el diseño de estructuras construidas sobre roca o sobre suelos firmes (Riddell et al., 1989; Miranda y Bertero, 1994). Sin embargo, para estructuras construidas sobre suelos blandos el factor de reducción puede ser significativamente diferente. Investigaciones recientes han demostrado

que el factor de reducción de resistencia es particularmente sensible al cociente del periodo fundamental de la estructura y el periodo predominante del movimiento de terreno (Miranda, 1991; Rahnama y Krawinkler, 1993; Ordaz, Pérez Rocha y Meli, 1993). En la figura 6 se muestra la media de factores de reducción obtenida a partir de sistemas de un grado de libertad con comportamiento elasto-plástico sujetos a 32 sismos registrados en la zona del lago del Distrito Federal. Puede verse que el factor de reducción presenta variaciones importantes con el cociente T/T_s , por lo que la adopción de una reducción independiente de T para el diseño de estructuras en suelos blandos (como la propuesta en muchos reglamentos de diseño) o dependiente únicamente de T con una variación de tipo bilineal (como la del RCDF) es inadecuada. Debido a la semejanza de los movimientos en zona del lago con movimientos de tipo armónico, el comportamiento inelástico es particularmente efectivo para reducir las ordenadas espectrales elásticas para estructuras con periodo cercano al primer modo del sitio. El efecto del segundo modo del sitio es también apreciable para $T/T_s \cong 0.33$.

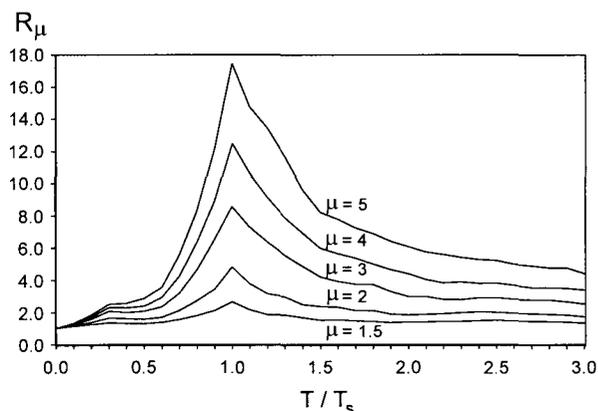


Fig 6. Factores de reducción por comportamiento no lineal en sistemas elastoplásticos sujetos a movimientos registrados en zona de lago.

En la figura 6 puede verse que para periodos de vibración cercanos al periodo predominante del movimiento de terreno ($T/T_s \cong 1$) el factor de reducción de fuerzas R_μ es mucho mayor a la ductilidad de desplazamiento. Por ejemplo para $\mu=5$ el factor de reducción es más de tres veces el factor de ductilidad μ . De acuerdo con Ordaz, Pérez-Rocha y Meli (1993), el valor máximo de R_μ es función del ancho de banda del espectro. Para valores de T/T_s menores que 0.6, el factor de reducción de

fuerzas es menor, y en algunos casos mucho menor que μ . Puede verse que para valores altos de T/T_s el factor de reducción es aproximadamente igual al factor de ductilidad. La relación de T/T_s para la cual el factor de reducción es aproximadamente igual al factor de ductilidad depende del nivel de deformación inelástica. Por ejemplo para $\mu=2$ el suponer $R_\mu=\mu$ es válido para $T/T_s > 1.8$, mientras que $\mu=5$ dicha suposición no es válida sino hasta $T/T_s > 2.7$. Recientemente se han propuesto reducciones que toman en cuenta estas observaciones (Ruiz y Díaz, 1991; Miranda, 1993b; Ordaz, Pérez Rocha y Meli, 1993).

En la figura 7 se muestra una comparación del factor de reducción promedio para ductilidades de 2, 3, y 4, para un sitio hipotético con periodo dominante igual a 2.0 s, con relación a las reducciones adoptadas por el RCDF-93. Puede verse que para periodos menores que 1.3 s los factores de reducción del reglamento son mayores que los factores de reducción promedio, lo que implicaría que si los factores de reducción del RCDF-93 se usan para reducir espectros elásticos, se pueden tener demandas de ductilidad mucho mayores que Q . Para estructuras con periodos fundamentales cercanos al periodo fundamental, los factores de reducción del reglamento son menores que los factores de reducción promedio obtenidos a partir de registros sísmicos de la zona del lago. Los comentarios a las NTCDS (Rosenblueth y Gómez, 1991) mencionan que en la especificación de los

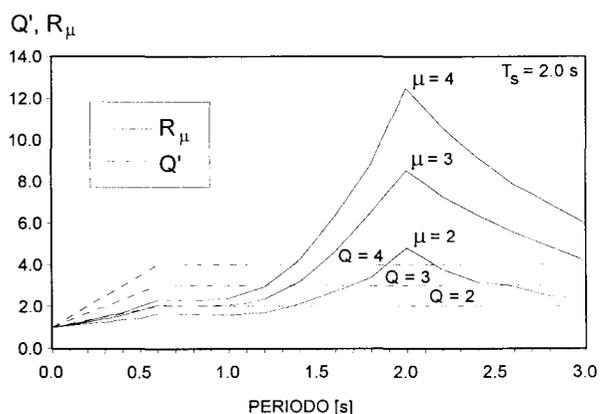


Fig 7. Comparación del factor de reducción Q' del RCDF-93 con el factor de reducción por comportamiento no lineal en sistemas elastoplásticos sujetos a movimientos registrados en zona de lago.

factores de reducción Q se tomaron en cuenta entre otros aspectos: (1) que los factores de reducción por comportamiento no lineal para movimientos de banda angosta son mucho mayores que los factores de reducción para movimientos de banda ancha; y (2) que las estructuras convencionales poseen una sobrerresistencia importante de tal forma que su resistencia lateral es mucho mayor que la resistencia lateral para la cual fueron diseñadas. Ambos factores también se tomaron en cuenta en la adopción de un espectro de diseño reducido por un factor de 0.4, por lo que en el RCDF-93 no se expresa en forma clara qué ductilidad debe esperar el diseñador en una estructura diseñada con este reglamento ni cuál es el nivel de fuerzas laterales o de aceleraciones que pudieran actuar en la estructura durante un sismo intenso. Adicionalmente, tanto la sobrerresistencia como la reducción por comportamiento no lineal presentan importantes variaciones con el periodo fundamental, por lo que para estructuras con periodos mayores que T_a diseñadas con el RCDF-93 (con una reducción de 0.4 en el espectro de diseño y una reducción de fuerza igual al factor de comportamiento sísmico, Q , ambas reducciones independientes del periodo de vibración) se pueden producir importantes variaciones en las demandas de ductilidad global. Es recomendable que futuras versiones de reglamentos mexicanos consideren explícitamente los factores reductores de resistencia debido a comportamiento no lineal (Rosenthal, 1992).

Es importante aclarar que si bien los factores adoptados por el RCDF-93 en las zonas III y IV difieren de los calculados para movimientos registrados en la zona del lago (i.e., figura 7), los espectros inelásticos correspondientes a $Q=3$ y $Q=4$ que se obtienen al reducir el espectro lineal del RCDF-93 son razonables (Avila y Meli, 1986), ya que se parte de un espectro lineal reducido que no corresponde a espectros que se puedan esperar y se reduce por factores de reducción que tampoco corresponden a lo que se puede esperar. Aunque el resultado final (i.e., espectro inelástico de diseño) para $Q=3$ y $Q=4$ es razonable, con base a la información que se tenía cuando se elaboró el RCDF-87 (no así para $Q=1$, $Q=1.5$ y $Q=2$), el formato adoptado en el reglamento oscurece el proceso de diseño al adoptar espectros lineales y factores de reducción que no se asemejan a los que se espera se produzcan en la zona del lago durante el sismo de diseño.

B) Reducciones por sobrerresistencia:

Con fines de diseño, además de las reducciones debidas a comportamiento inelástico, es posible considerar reducciones adicionales para tomar en cuenta que las estructuras poseen una resistencia lateral considerablemente mayor a la resistencia lateral de diseño. De hecho, la gran sobrerresistencia estructural observada en estructuras de la ciudad de México es considerada como una de las más importantes lecciones del sismo de 1985 (Esteve, 1987; Osteraas y Krawinkler, 1989). Sin embargo, en el RCDF-93 no se le reconoce en forma explícita como un parámetro de diseño. El que una estructura tenga una resistencia lateral por arriba de la de diseño implica que la estructura estará sometida a aceleraciones y fuerzas laterales también por arriba de las asociadas a los niveles nominales de diseño. Varios investigadores han estudiado la sobrerresistencia y han sugerido que se incorpore en forma explícita en el proceso de diseño, aunque sea en forma conservadora (Osteraas y Krawinkler, 1989; Miranda, 1991; Bertero et al., 1991; Uang, 1991; Fischinger et al., 1994; Fajfar 1994). El considerar en forma explícita la sobrerresistencia permite al diseñador estar consciente de un nivel de fuerzas laterales más realista que puede actuar en la estructura. La incorporación en forma explícita de factores de reducción debidos a sobrerresistencia ha sido adoptada en Suiza (SIA 160), Canadá (NBCC, 1990), en Europa para estructuras de acero (ECCS, 1988), y más recientemente se ha propuesto para el Euro-Código 8 (Fajfar, 1994).

C) Reducciones en sistemas de varios grados de libertad:

Un adecuado diseño sismorresistente se produce cuando una estructura es dimensionada y detallada de tal forma que las demandas de ductilidad local (en entrepiso o en miembros estructurales) son menores a sus capacidades. Por lo tanto, durante el diseño de una estructura es necesario estimar la resistencia lateral mínima que debe poseer dicha estructura para controlar la demanda de ductilidad global que esté asociada a un control adecuado de la ductilidad local.

Si bien las reducciones en fuerzas incluidas en códigos de diseño han sido tradicionalmente adoptadas con base en estudios de sistemas de un grado de libertad, debe reconocerse que es difícil el tener una estructura en la que las deformaciones

inelásticas máximas resulten uniformemente distribuidas en toda la altura de la estructura, esto es, que las demandas de ductilidad local de entrepiso sean aproximadamente iguales a la demanda de ductilidad global. Esto implica que aun si se logra limitar la demanda ductilidad global por debajo de un cierto valor, ello no garantiza que en ciertos entresijos no pueda excederse esa demanda de ductilidad considerada como máxima tolerable. Es deseable que en un reglamento de diseño se tome en cuenta en forma explícita, nuevamente aunque sea de manera conservadora, que las ductilidades locales pueden ser mayores que la ductilidad global. Esto implica que si, por ejemplo, se quiere limitar la ductilidad de desplazamiento de entrepiso a 4, debe diseñarse para una resistencia lateral (global) mayor a la necesaria para controlar la ductilidad de desplazamiento global a 4.

Se recomienda que el factor de reducción R que relacione la resistencia lateral necesaria para mantener la estructura en intervalo lineal con la resistencia lateral de diseño esté dado por:

$$R = R_{\mu G} \cdot R_s \cdot R_c \quad (3)$$

donde $R_{\mu G}$ es el factor de reducción debido a comportamiento no lineal necesario para controlar la ductilidad global, R_s es el factor de reducción debido a la sobrerresistencia y R_c es el factor que disminuye la reducción (i.e. es menor que 1) para tomar en cuenta la posible concentración de deformación inelástica y está definido como el cociente de la reducción máxima para controlar la ductilidad local a un valor tolerable y la reducción máxima para controlar la ductilidad global a ese mismo valor. En esta ecuación R_s y R_c están dados por:

$$R_s = \frac{F_y(\mu = \mu_i)}{F_d} \quad (4)$$

$$R_c = \frac{R_{\mu L}}{R_{\mu G}} \quad (5)$$

donde F_d es la resistencia lateral de diseño de la estructura y $R_{\mu L}$ es el factor de reducción debido a comportamiento no lineal necesario para controlar la ductilidad local al valor máximo tolerable. Es importante hacer notar que en general $R_{\mu G}$, R_s y R_c varían con cambios en el periodo fundamental de vibración. El autor de este trabajo actualmente está investigando el factor R_c . En la práctica, este

valor podría especificarse como función del sistema estructural y el número de niveles.

DEMANDAS DE DESPLAZAMIENTOS LATERALES

El daño producido por sismo, tanto estructural como no estructural, es principalmente ocasionado por las deformaciones laterales en la estructura, por lo que un adecuado control del daño requiere de una buena estimación de las demandas de deformación lateral en la estructura. Aunque recientemente han sido propuestos criterios de diseño sísmico basados en desplazamientos (Moehle 1993), en la mayor parte de los reglamentos únicamente se revisa que las deformaciones de entrepiso sean menores que un cierto máximo tolerable. Las demandas de deformación normalmente se calculan como un múltiplo de las estimadas a partir de un análisis de la estructura sometida a fuerzas laterales reducidas y suponiendo un comportamiento elástico lineal. Por lo que una adecuada estimación de las demandas sísmicas requiere conocer la relación entre las deformaciones elásticas y las deformaciones inelásticas.

La mayor parte de los reglamentos de diseño se basan en suponer que la máxima deformación inelástica, Δ_i , es aproximadamente igual a la máxima deformación elástica, Δ_e . Esta suposición de igual desplazamiento fue propuesta por primera vez por Veletsos y Newmark (1960), la cual es aproximadamente válida para estructuras de periodo fundamental largo construidas sobre roca o sobre terreno firme (Miranda, 1993a).

Si se considera que el espectro de diseño del RCDF-93 es igual al espectro de diseño elástico multiplicado por 0.4, entonces la relación entre la deformación elástica y la deformación inelástica implícita en este reglamento está dado por:

$$\frac{\Delta_i}{\Delta_e} = 0.4 \frac{Q}{Q'} = 0.4 \frac{Q}{1 + \frac{T}{T_a}(Q - 1)} \quad \text{para } T < T_a \quad (6)$$

$$\frac{\Delta_i}{\Delta_e} = 0.4 \frac{Q}{Q'} = 0.4 \quad \text{para } T \geq T_a \quad (7)$$

Estudios recientes han determinado que para estructuras construidas sobre terreno blando la relación entre Δ_i y Δ_e depende de la relación entre el periodo fundamental de la estructura y el periodo predominante del movimiento de terreno (Miranda 1993a). La figura 8 muestra la media de esta relación calculada para sistemas de un grado de libertad con comportamiento elastoplástico con demandas de ductilidad de desplazamiento de 1.5, 2, 3, 4 y 5 al ser sometidas a 28 sismos registrados en la zona del lago del Distrito Federal. Puede verse que para valores de T/T_s menores a 0.7 los desplazamientos máximos inelásticos son mayores a los máximos desplazamientos elásticos, pudiendo llegar a ser el desplazamiento inelástico más de 3 veces el desplazamiento elástico. En este rango de periodos, la relación entre Δ_i y Δ_e depende fuertemente de T/T_s y de μ . Para periodos cercanos al periodo predominante del movimiento de terreno ($T/T_s \cong 1$), los desplazamientos inelásticos son considerablemente menores a los elásticos, pudiendo llegar a ser menores a la mitad de los elásticos. Cuando T/T_s es mayor que 2.0 los desplazamientos inelásticos son, en promedio, iguales a los elásticos.

La figura 9 presenta una comparación entre el cociente de Δ_i y Δ_e implícito en el RCDF-93 (ecuaciones 6 y 7) con el calculado para un sitio en zona del lago con periodo dominante igual a 2.0s. Puede verse que, a excepción de periodos de vibración cercanos al dominante del terreno,

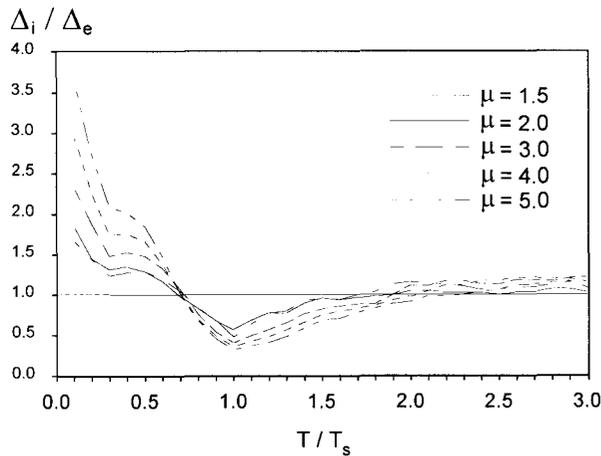


Fig 8. Media del cociente de desplazamientos inelásticos a elásticos en sistemas elastoplásticos sujetos a movimientos registrados en zona de lago.

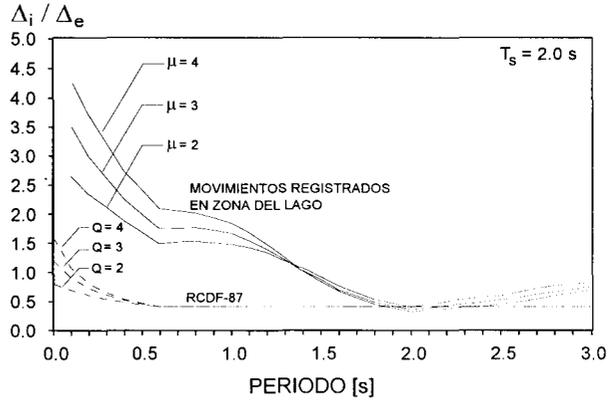


Fig 9. Comparación del cociente de desplazamientos inelásticos a elásticos implícito en el RCDF-93 con la media del cociente de desplazamientos inelásticos a elásticos en sistemas elastoplásticos sujetos a movimientos registrados en zona de lago.

la relación entre Δ_i y Δ_e del RCDF-93 subestima en forma importante la calculada a partir de movimientos registrados en la zona de lago.

Los desplazamientos calculados con el espectro reducido del RCDF-93 en sistemas de un grado de libertad con comportamiento elástico lineal están dados por:

$$\Delta_e = \frac{a \cdot T^2 \cdot g}{4 \cdot Q' \cdot \pi^2} \quad (8)$$

donde a es la ordenada del espectro de aceleraciones para diseño sísmico del RCDF-93 expresada como fracción de la aceleración de la gravedad, T es el periodo de vibración y g es la aceleración de la gravedad. Los desplazamientos inelásticos de acuerdo con el RCDF-93 son los calculados con un análisis elástico usando fuerzas reducidas multiplicados por el factor de comportamiento sísmico, esto es:

$$\Delta_i = \frac{a \cdot T^2 \cdot g}{4 \cdot \pi^2} \frac{Q}{1 + \frac{T}{T_a} (Q - 1)} \quad (9)$$

para $T < T_a$

$$\Delta_i = \frac{a \cdot T^2 \cdot g}{4 \cdot \pi^2} \quad (10)$$

para $T \geq T_a$

La figura 10 muestra los desplazamientos calculados con el componente este-oeste del registro de SCT para ductilidades de 1 (elástico), 2, 3 y 4 en comparación con los estimados para la zona del lago por el RCDF-93 (ecuaciones 9 y 10). Para periodos menores que T_a el RCDF reconoce que los desplazamientos inelásticos son mayores a los elásticos, sin embargo en la figura esto no se aprecia debido a la escala. Puede verse que los desplazamientos calculados por el RCDF-93 para sistemas de un grado de libertad pueden ser mayores o menores que los calculados a partir de este registro dependiendo del periodo de vibración y el nivel de deformación inelástica.

En la figura 11 se muestra el cociente de desplazamientos laterales en sistemas elastoplásticos con factores de ductilidad de desplazamiento de 1, 2, 3 y 4 al ser sometidos al componente este-oeste del registro de SCT del sismo de 1985 y del desplazamiento calculado con el RCDF-93 con Q igual a 1, 2, 3 y 4. Puede verse que para $\mu \geq 3$ el RCDF-93 subestima las demandas de desplazamiento lateral. Para $\mu=4$ el desplazamiento inelástico calculado con el registro de SCT es aproximadamente 50% mayor que el calculado con el RCDF-93.

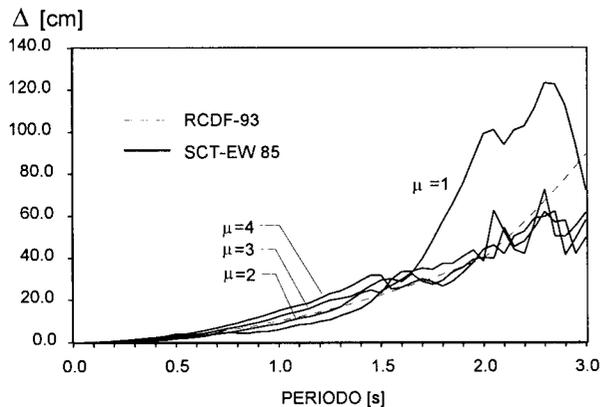


Fig 10. Comparación de los desplazamientos calculados con el RCDF-93 para Q igual a 1, 2, 3 y 4 (líneas punteadas) con los desplazamientos en sistemas elastoplásticos con ductilidades de desplazamiento igual a 1, 2, 3 y 4 al ser sometidos al registro de SCT del sismo de 1985 (líneas continuas).

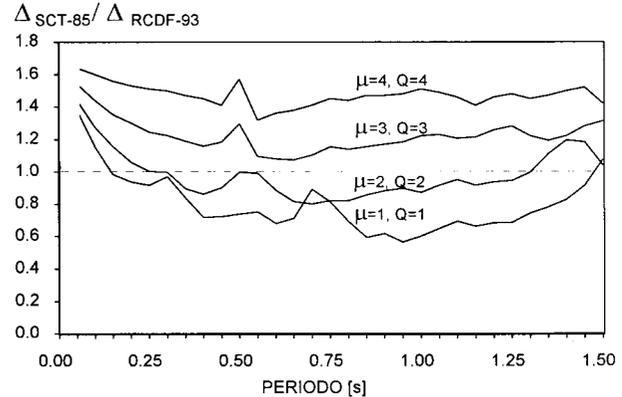


Fig 11. Cociente de desplazamientos en sistemas elastoplásticos con ductilidades de desplazamiento igual a 1, 2, 3 y 4 al ser sometidos al registro de SCT del sismo de 1985 y desplazamientos calculados con el RCDF-93 para Q igual a 1, 2, 3 y 4.

CONCLUSIONES

El Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal es reconocido mundialmente como uno de los reglamentos más avanzados de diseño sismorresistente. Después de la publicación de su última revisión, se ha recopilado una gran cantidad de información en la red acelerográfica de la ciudad de México y en investigaciones recientes sobre el comportamiento sísmico de estructuras contruidas sobre suelo blando. Usando esta información se realizó una evaluación de algunos de los parámetros de diseño del RCDF-93. Con base en esta evaluación se hacen las siguientes conclusiones:

1. Dentro de la llamada zona del lago especificada por el RCDF-93 pueden ocurrir diferencias importantes en algunas de las características de los espectros de respuesta como son: aceleraciones máximas de terreno, ordenadas máximas, niveles de amplificación dinámica, anchos de banda, periodos dominantes. Estas diferencias en espectros de respuesta pueden dar lugar a demandas sísmicas significativamente diferentes en una zona en la cual el Reglamento especifica un solo espectro de diseño. Se recomienda que dichas diferencias se tomen en cuenta subdividiendo dicha zona y especificando los espectros de aceleraciones de diseño en función del periodo dominante del terreno.

2. Los espectros de aceleraciones para diseño sísmico del RCDF no son representativos de los espectros de respuesta esperados en el valle de México durante un sismo intenso, por lo que no se ofrece al diseñador en forma clara y transparente una estimación de la aceleración máxima de terreno esperada, del nivel de ordenadas espectrales máximas y por tanto del nivel de fuerzas laterales que se pudieran producir en una estructura con comportamiento elástico durante un sismo intenso. Dado que los análisis estructurales que comunmente se emplean suponen un comportamiento elástico lineal, se recomienda que el punto de partida de las fuerzas laterales de diseño por sismo se base en espectros de diseño que representen espectros de respuesta suavizados, con lo que se ofrece al diseñador una relación transparente entre el nivel de diseño adoptado y los movimientos de terreno que pueden ocurrir en el valle de México durante un sismo intenso.

3. Actualmente no existe una división clara entre los factores que se consideraron para especificar un espectro de diseño igual a 0.4 veces el espectro de respuesta elástico y los que se tomaron en cuenta para especificar los factores de reducción de resistencia Q' . Para periodos de vibración mayores que el periodo característico T_a , ambos tipos de reducción son independientes del periodo de vibración e independientes del periodo dominante del terreno lo cual puede dar lugar a niveles de seguridad, y por tanto de daño esperado, diferentes para estructuras de la misma importancia.

4. Los factores de reducción de resistencia lateral Q' del RCDF-93 corresponden aproximadamente a los producidos por comportamiento no lineal en sistemas de un grado de libertad sometidos a movimientos registrados en roca o en terreno firme, pero no así a los que se producen en estructuras sobre suelos blandos. En estos últimos, las reducciones son función del nivel de deformación inelástica y de la relación entre el periodo fundamental de la estructura y el periodo predominante del terreno. Se recomienda que los factores de reducción por comportamiento inelástico y por tanto las demandas de resistencia lateral se especifiquen en función de estos parámetros. Con ello el diseñador puede conocer en forma transparente el nivel de deformación inelástica que debe esperar en la estructura durante un sismo intenso si diseña con el nivel de fuerzas especificado por el reglamento, el incremento en fuerzas laterales de diseño que

debe utilizar si desea permitir un menor nivel de deformación inelástica, así como las consecuencias en demandas de deformación inelástica y en demandas de resistencia lateral al tener un periodo fundamental menor, cercano o mayor al periodo dominante del sitio.

5. Por lo general las estructuras tienen una resistencia lateral por arriba y en algunos casos muy por arriba de la resistencia lateral de diseño. Dicha sobrerresistencia lateral implica también que la estructura estará sometida a aceleraciones y fuerzas laterales mucho mayores que las asociadas a los niveles nominales de diseño. Se recomienda se incorpore en forma explícita, aunque sea de manera aproximada, el nivel de sobrerresistencia esperado en la estructura con lo que se ofrece una mejor aproximación del nivel de fuerzas y desplazamientos laterales que pueden ocurrir en la estructura durante un sismo intenso. Además, como parte del proceso de diseño, debe verificarse que la estructura posee, al menos, dicho nivel de sobrerresistencia.

6. Se recomienda que los factores de reducción incorporen en forma explícita no solo la reducción debida al comportamiento inelástico y la reducción que se puede tomar debida a la sobrerresistencia de la estructura sino también la posible concentración de deformación inelástica en la estructura. Estas reducciones deben especificarse en función del nivel de deformación inelástica máxima tolerable de entrepiso (que a su vez es función del sistema estructural y del nivel de detallado), del periodo fundamental de la estructura y del periodo dominante del sitio, así como deben tomar en cuenta la incertidumbre en la estimación de estos parámetros.

7. Si se continúa obteniendo las demandas de desplazamiento lateral a partir de las deformaciones calculadas con un análisis elástico-lineal con fuerzas laterales reducidas, se recomienda que se tome en cuenta en forma explícita la relación entre desplazamientos elásticos e inelásticos, la relación entre demandas de deformación locales y demandas de deformación globales así como el hecho que la distribución de deformaciones inelásticas en la estructura puede diferir de la obtenida en el análisis elástico.

8. Es deseable que un reglamento de diseño sismorresistente esté basado en espectros de diseño que tengan una relación transparente con las

características de los movimientos de terreno esperados en el sitio durante un sismo intenso, y en forma explícita en parámetros básicos que determinan la respuesta sísmica de una estructura. Un reglamento que ofrece esta transparencia puede ser revisado y mejorado más rápidamente en la medida que la que se obtengan nuevos registros sísmicos y se realicen investigaciones que mejoren el conocimiento sobre dichos parámetros básicos.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece la ayuda del M. en I. Roberto Durán en el cálculo de la información presentada en las figuras 2 y 4. Así mismo, se agradecen los valiosos comentarios y sugerencias de un revisor anónimo, de los doctores Vitelmo Bertero, Roberto Meli, Mario Ordaz y Eduardo Reinoso y de los ingenieros Javier Alonso, Enrique Del Valle, Jesús Iglesias, Santiago Loera y Luis Eduardo Pérez Rocha.

REFERENCIAS

- Applied Technology Council**, (1978), "Tentative Provisions for the Development of Seismic Regulations for Buildings," *Report ATC 3-06*, NBS Special Publication 510, NSF Publication 78-08.
- Arciniega A., Ordaz, M., Padilla, G., Pérez-Rocha, L.E. y Rosenblueth, E.**, (1993), "Predicción de Espectros de Respuesta en el Valle de México, Métodos Simplificados y Aplicaciones," *Reporte FJBS/CIS-93/04*, Centro de Investigación Sísmica, México, D.F..
- Avila, J., y Meli, R.**, "Respuesta inelástica ante el acelerograma de SCT del sismo del 19 de septiembre de 1985," V Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Veracruz, Mexico, 1986.
- Bertero, V.V.**, (1986), "Lessons Learned from Recent Earthquakes and Research Implications for Earthquake-Resistant Design of Building Structures in U.S.," *Report No. UCB/EERC-86/03*, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, California.
- Bertero, V.V., Anderson, J.C., Krawinkler, H., and Miranda, E.**, (1991), "Design Guidelines for Ductility and Drift Limits," *Report No. UCB/EERC-91/15*, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, California.
- Chopra, A.K. and Cruz, E.**, (1986), "Evaluation of Building Code Formulas for Earthquake Forces," *Journal of Structural Engineering*, Vol. 112, No. 8, pp. 1881-1899.
- Commission of the European Communities**, (1988), "Eurocode No. 8, Structures in Seismic Regions - Design," *Report EUR 12266 EN*, Brussels.
- Departamento del Distrito Federal**, (1957), "Normas de Emergencia al Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal," *Diario Oficial de la Federación*, diciembre de 1957.
- Departamento del Distrito Federal**, (1976), "Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal," *Diario Oficial de la Federación*, 14 de diciembre de 1976.
- Departamento del Distrito Federal**, (1985), "Normas de Emergencia al Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal," *Diario Oficial de la Federación*, 18 de octubre de 1985.
- Departamento del Distrito Federal**, (1987a), "Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal," *Gaceta Oficial del Departamento del Distrito Federal*, 6 de julio de 1987.
- Departamento del Distrito Federal**, (1987b), "Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo," *Gaceta Oficial del Departamento del Distrito Federal*, 5 de noviembre de 1987.
- Departamento del Distrito Federal**, (1993), "Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal," *Gaceta Oficial del Departamento del Distrito Federal*, 2 de agosto de 1993.
- Esteva, L.**, (1980), "Design: General", Chapter 3, *Design of Earthquake Resistant Structures*, E. Rosenblueth, Ed., Pentech Press Ltd., London, England.

- Esteva, L.**, (1987), "Earthquake Engineering Research and Practice in Mexico after the 1985 Earthquakes," *Bull. New Zealand Nat. Soc. for Earthquake Engrg.*, Vol. 20, No. 3.
- Espinosa, J.M. et al.**, (1989), "The Mexico Earthquake of September 19, 1985 - New Accelerograph Network for Mexico City," *Earthquake Spectra*, Vol. 5, No. 1, pp. 249-255.
- European Communities Commission for Steel Structures**, (1988), "Recommendations for Steel Structures in Seismic Regions," ECCS Technical Committee 1, Working Group 1.3, Seismic Design, 1st edition.
- Fajfar, P.**, (1994), "Elastic and Inelastic Design Spectra," *Proc. 10th European Conference on Earthquake Engineering*, Vienna.
- Fajfar, P.**, (1994), "Design Spectra for the New Generation of Codes," *Proc. 10th European Conference on Earthquake Engineering*, Vienna.
- Fischinger, M., Fajfar, P. and Vidic, T.**, (1994), "Factors Contributing to the Response Reduction," *Proc. 5th U.S. Conf. on Earthquake Engineering*, EERI, Chicago, Illinois, Vol. 1, pp. 97-106.
- Joyner, W.B., and Boore, D.M.**, (1988), "Measurement, Characterization and Prediction of Strong Ground Motion," *Proc. of Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, Park City, Utah, June 27-30, Am. Soc. Civil Engineers, pp. 43-102.
- International Association for Earthquake Engineering**, (1982), "Basic Concepts of Seismic Codes,".
- Kobayashi, H., Seo, K. and Midorikawa, S.**, (1986a), "Measurements of Microtremors in and around Mexico D.F.," *Report on Seismic Microzonation Studies of the Mexico Earthquake of September 19, 1985*, Part 1, Tokyo Institute of Technology, Yokohama, Japan.
- Kobayashi, H., Seo, K. and Midorikawa, S.**, (1986b), "Estimated Strong Ground Motion in Mexico City due to the Michoacan Mexico Earthquake of September 19, 1985 Based on Characteristics of Microtremors," *Report on Seismic Microzonation Studies of the Mexico Earthquake of September 19, 1985*, Part 2, Tokyo Institute of Technology, Yokohama, Japan.
- Lermo, J., Rodríguez, M. and Singh, S.K.**, (1988), "The Mexico Earthquake of September 19, 1985 - Natural Period of Sites in the Valley of Mexico from Microtremors Measurements," *Earthquake Spectra*, Vol. 4, No. 4, pp. 805-814.
- Miranda, E.**, (1991), "Seismic Evaluation and Upgrading of Existing Structures," *Ph.D. Thesis*, University of California, Berkeley, California.
- Miranda, E.**, (1993a), "Evaluation of Site-Dependent Inelastic Seismic Design Spectra," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 119, No. 5, pp. 1319-1338.
- Miranda, E.**, (1993b), "Site-Dependent Strength Reduction Factors," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 119, No. 12, pp. 3503-3519.
- Miranda, E. and Bertero, V.V.**, (1994), "Evaluation of Strength Reduction Factors for Earthquake Resistant Design," *Earthquake Spectra*, Vol. 10, No. 2.
- Moehle, J.P.**, (1992), "Displacement-Based Design of RC Structures Subjected to Earthquakes," *Earthquake Spectra*, Vol. 8, No. 3, pp. 403-428.
- Ordaz, M., Singh, S.K., Reinoso, E., Lermo, J., Espinosa, J.M. and Domínguez, T.**, (1988), "The Mexico Earthquake of September 19, 1985 - Estimation of Response Spectra in the Lake Bed Zone of the Valley of Mexico," *Earthquake Spectra*, Vol. 4, No. 4, pp. 815-834.
- Ordaz, M., Pérez Rocha, L.E., y Meli, R.**, (1993), "Respuesta de Osciladores Elastoplásticos Sometidos a Excitaciones Sísmicas,"

- micas de Banda Angosta," *Memorias del X Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, pp. 346-352.
- Ordaz, M., Arboleda, J. y Singh, S.K.**, (1993), "Un Nuevo Método para Simular Acelerogramas Usando Registros Pequeños como Funciones de Green Empíricas," *Memorias del X Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, pp. 28-35.
- Osteraas, J. and Krawinkler, H.**, (1989), "The Mexico Earthquake of September 19, 1985 - Behavior of Steel Buildings," *Earthquake Spectra*, Vol. 5, No. 1, pp. 51-88.
- Associate Committee on the National Building Code**, (1990), "National Building Code of Canada," National Research Council of Canada, Ottawa, Ontario.
- Rahnama, M. and Krawinkler, H.**, (1993), "Seismic Demands for SDOF and MDOF Systems," *Report No. 90*, John A. Blume Earthquake Engineering Research Center, Stanford University.
- Reinoso, E. y Lermo J.**, (1991), "Periodos del Suelo del Valle de México Medidos en Sismos y con Vibración Ambiental," *Memorias del IX Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, Manzanillo, Colima, Volumen I, pp. 2-149 a 2-156.
- Reinoso, E., Pérez-Rocha, L.E., Ordaz, M. and Arciniega, A.**, (1992), "Prediction of Response Spectra at any Site in Mexico City," *Proc. 10th World Conference on Earthquake Engineering*, Vol. 2, pp. 767-776.
- Rosenblueth, E.**, (1979), "Seismic Design Requirements in a Mexican 1976 Code," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 7, pp. 49-61.
- Rosenblueth, E., Ordaz, M. Sánchez-Sesma, F.J. and Singh, S.K.**, (1989), "The Mexico Earthquake of September 19, 1985 - Design Spectra for Mexico's Federal District," *Earthquake Spectra*, Vol. 5, No. 1, pp. 273-291.
- Rosenblueth, E. y Gómez, R.**, (1991), "Comentarios a las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo," *Reporte No. ES-7*, Series del Instituto de Ingeniería, UNAM.
- Rosenblueth, E.**, (1992) "Reglamentos Futuros de México: Un Punto de Visto Personal," *Ingeniería Sísmica*, No. 44, pp. 3-10.
- Rosenblueth, E. y Arciniega, A.**, (1992) "Response Spectral Ratios," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 21.
- Ruiz, S.E. and Díaz, O.**, (1991), "Reduction of Linear Elastic Response Spectra due to Elastoplastic Behaviour of Systems," *Proc. Fifth International Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Karlsruhe, pp. 545-554.
- Schnabel, P.B., Lysmer, J. and Seed, H.B.**, (1972), "SHAKE - A Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Sites," *Report No. EERC 72-12*, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, California.
- Seed, H.B., Ugas, C. and Lysmer, J.**, (1974), "Site-Dependent Spectra for Earthquake-Resistant Design," *Report No. EERC 74-12*, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, California.
- Seed, H.B., Romo, M.P., Sun, J., Jaime, A., and Lysmer, J.**, (1987), "Relationships between Soil Conditions and Earthquake Ground Motions in Mexico City in the Earthquake of September 19, 1985," *Report No. UCB/EERC 87-14*, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, California.
- SIA 160 Norm**, (1989), *Einwirkungen auf Tragwerke*, SIA Zurich.
- Quaas, R. et al.**, (1991), "La Red de Observación Sísmica del Cenapred: Resumen de los Datos Registrados en 1990-1991," *Memorias del IX Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, Manzanillo, Colima, Volumen I, pp. 2-48 a 2-57.

- Quaas, R. et al.**, (1993), "Base Nacional de Datos de Sismos Fuertes - Catálogo de Estaciones Acelerográficas 1960-1992," *Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica*, México, D.F..
- Uang, C.-M.**, (1991) "Establishing R (or R_w) and C_d Factors for Building Seismic Provisions," *Journal of Structural Engineering*, Vol. 117, No.1, pp. 19-28.
- Veletsos, A.S. and Newmark, N.M.**, (1960), "Effect of Inelastic Behavior on the Response of Simple Systems to Earthquake Motions," *Proc. 2nd World Conf. on Earthquake Engrg.*, Vol. 2, Japan, pp. 895-912.