

FILOSOFÍA Y ESTADO DE LA PRÁCTICA DEL DISEÑO SISMORRESISTENTE

INTRODUCCIÓN. Puesto que el diseño y la construcción de la mayoría de los edificios sismorresistentes, en la práctica, generalmente siguen las normas de los códigos sísmicos, conviene repasar brevemente estas normas y examinar a fondo qué se ha hecho y qué se debería hacer para mejorar el presente estado de la práctica. Los problemas encontrados son complejos, por lo que las soluciones, en general, también lo son. Para mantener el procedimiento de diseño según el código, lo más simple posible, como debería ser, es necesario especificar regulaciones muy severas y restrictivas en cuanto a la selección de las localizaciones de edificios y también a la selección de sus configuraciones, composición estructural, sistemas estructurales, materiales estructurales y componentes no estructurales. Ésta es la mejor manera para evitar problemas complejos (interacción suelo-estructura, movimientos de cimientos, efectos torsionales, etc). Cuando no se siguen estas regulaciones restrictivas, el código tiene que especificar que el procedimiento debería complementarse con pruebas dinámicas, lineales y no lineales, que se deberían someter a revisión detenida.

PROBLEMAS EN EL DISEÑO SISMORRESISTENTE. El diagrama de flujo de la Fig. 7 muestra claramente que los códigos sísmicos deberían regular:

- 1) selección y restricciones de emplazamientos, uso del terreno, análisis de idoneidad del lugar de construcción;
- 2) establecimiento de terremotos de diseño, criterios y metodología de diseño sismorresistente;
- 3) regulaciones y/o pautas para la adecuada selección de configuraciones, cimientos, composición estructural, sistema estructural, material estructural y componentes no estructurales;
- 4) estimación de demandas o exigencias a la estructura y su contenido para los distintos niveles de terremotos de diseño;
- 5) estimación de capacidades provistas de una estructura;
- 6) análisis del comportamiento de una estructura diseñada bajo distintos niveles establecidos de terremotos de diseño.

Como se dijo anteriormente, una revisión de los resultados de investigación acerca de la importancia y efectos de estos aspectos generales de diseño sismorresistente, indica que los temas principales que faltan por resolver para mejorar ese diseño, están relacionados con los siguientes tres elementos básicos: **terremoto de entrada, exigencias a la estructura y capacidades provistas de la estructura**. Después de una breve revisión sobre cómo se han desarrollado los códigos sísmicos en los EE.UU. y cómo se han intentado resolver estos temas, esta conferencia se concentrará en el primer elemento, el terremoto de entrada, que incluye los siguientes temas interrelacionados: **terremoto de diseño, criterios de diseño y selección de metodología de diseño**. La importancia de establecer adecuadamente el terremoto de diseño, se resume en la **necesidad de saber contra qué tenemos que diseñar la estructura**. Como discutimos anteriormente, mientras que el terremoto de diseño es, conceptualmente, aquel movimiento que conducirá al edificio a su respuesta crítica, la aplicación práctica de este concepto simple se encuentra con serias dificultades por la existencia de grandes dudas en la predicción de características dinámicas de los futuros movimientos del suelo y las variaciones en la respuesta crítica de un sistema estructural específico, según los diferentes estados límite que podrían controlar el diseño. Por lo tanto, los terremotos de diseño dependen de los criterios de diseño. Los criterios de diseño deberían reflejar de una manera transparente la filosofía general del diseño sismorresistente, que se ha establecido claramente y está aceptada en el mundo entero. Sin embargo, como se discutirá más adelante, las metodologías de diseño, según los códigos actuales, no cumplen los objetivos de esta filosofía [2,8].

Filosofía general del diseño sismorresistente. La filosofía general del diseño sismorresistente de edificios que sólo contenían instalaciones esenciales y peligrosas, se introdujo en los EE.UU. en el comentario de la edición de 1967 del "Libro Azul" de la SEAOC [17].

Exceptuando el hecho de que los principios de tal filosofía están expresados de manera más precisa, estos principios son prácticamente los mismos que se exponen en el comentario de la edición de 1988 del "Libro Azul" de la SEAOC [17]:

1. Prevenir daños no estructurales en terremotos pequeños, que pueden ocurrir frecuentemente durante la vida de servicio de una estructura.
2. Prevenir daños estructurales y hacer que los no estructurales sean los mínimos posibles, en terremotos moderados que pueden ocurrir de vez en cuando.
3. Evitar el colapso o daños graves en terremotos intensos que pueden ocurrir raras veces.



Aunque en el comentario sobre las recomendaciones de la SEAOC [17], se dice que las estructuras diseñadas en conformidad con estas recomendaciones deberían generalmente ser capaces de alcanzar los objetivos de la filosofía general de diseño, lo cierto es que estas recomendaciones están principalmente pensadas para proteger contra grandes fallos y pérdida de vidas, y no para limitar daño, mantener funciones, o proporcionar fácil reparación. En otras palabras, la metodología actual de diseño, según código, está basada en un terremoto de diseño de una única intensidad. Además, el comentario de la SEAOC dice "la protección de la vida está asegurada razonablemente pero no completamente."

Para resumir, la meta principal de las normas sísmicas de los EE.UU. es la protección de vida. La meta secundaria es reducir (no eliminar) el daño de las propiedades. Las preguntas a responder son: 1) ¿alcanza la aplicación de las actuales normas estas metas ?; y 2) ¿son suficientes estas metas ?. Antes de intentar responder, conviene revisar la filosofía de los códigos de edificación, en particular los códigos sísmicos, y revisar la historia y el desarrollo de éstos.

Códigos y normas de edificación en EE.UU. Los códigos de edificación en los EE.UU. son, en primer lugar, requerimientos técnicos legales aprobados por agencias gubernamentales, que especifican normas mínimas para el diseño, fabricación, instalación y uso de materiales y componentes de edificación.

Filosofía del código. Aunque la función primaria de un código de edificación es proporcionar normas mínimas para garantizar la seguridad pública, habitualmente, tiene también otros objetivos. Por ejemplo, la intención del Uniform Building Code (UBC) [18], está claramente expresada en la sección 1.02:

El propósito de este código es proporcionar normas mínimas para salvaguardar la vida o la integridad de ésta, la salud, propiedades y bienestar público, a través de la regulación y control del diseño, construcción, calidad de materiales, uso y ocupación, localización y mantenimiento de todas las edificaciones y estructuras dentro de la jurisdicción y cierto equipamiento específicamente regulado en este documento.

A la vista de esto, es natural que la SEAOC haya establecido una filosofía de código sísmico que está en acuerdo con este propósito de los códigos de edificación. Así la filosofía básica del código sísmico SEAOC y la mayoría de los demás códigos sísmicos, ha sido proteger a la población en los edificios y alrededor de ellos, de la pérdida de vida y graves heridas durante grandes terremotos. Sin embargo, algunos de los códigos que han sido patrocinados por propietarios han ido más lejos. Por ejemplo, ya en 1967, el Capítulo 21, Título 24 del Código Administrativo de California que se refiere al diseño y construcción de escuelas públicas incluía, como propósito adicional, la protección de la propiedad; es decir, este código está interesado tanto en minimizar el daño como en proteger sus ocupantes. En 1975, los Títulos 17 y 21 de este código, relacionados con el diseño y construcción de hospitales y escuelas públicas, incluyen, como propósito adicional, la protección de la propiedad. Actualmente, el Título 24 del Código Administrativo de California, que se refiere a hospitales, tiene como propósito adicional el que el hospital permanezca en estado de funcionamiento después de un terremoto.

Historia de los códigos de diseño sísmico. La edición del 1980 del "Libro Azul" de la SEAOC (The Structural Engineers Association of California) [17], describe la historia de los códigos sísmicos en California. La tabla 1 resume la historia de los códigos de diseño sísmico y sus provisiones en los EE.UU. [13 (1982)].

Los primeros requerimientos del diseño sísmico aparecieron en la edición de 1927 del Uniform Building Code [18]. Aunque estas provisiones no se aplicaron en ninguna ciudad, exigían que todos los edificios de más de 20 pies de altura, salvo los no protegidos contra incendio con pórticos de acero y los de pórticos de madera, fuesen diseñados para resistir una fuerza lateral aplicada a nivel de cada piso y a nivel del techo, generalmente paralela con los dos ejes principales de la estructura. La fuerza que se requería era un porcentaje de la carga permanente y la sobrecarga, con la excepción de edificios con sobrecarga de no más de 50 libras por pie cuadrado, para los cuales se requería sólo un porcentaje de la carga permanente. Las estructuras en suelos con una capacidad portante de dos o más toneladas por pie cuadrado tenían que diseñarse para un 7,5% de sus cargas verticales, y aquéllas en suelos con valores más bajos y las construidas sobre pilotes tenían que ser diseñadas para un 10% de sus cargas verticales.

Cuando aparecieron por primera vez requerimientos sísmicos en los códigos de edificación y se aplicaron, no se sabía prácticamente nada sobre ingeniería sísmica. El Código de Edificación de Los Angeles de 1933, por ejemplo, sólo decía que un edificio debería diseñarse para soportar un empuje horizontal constante igual a un 8% de su peso, tratando así fuerzas sísmicas de la misma manera que presiones de viento. Recientemente, el entendimiento de los problemas de ingeniería sísmica y de diseño sísmico se ha desarrollado de una manera extraordinaria. En los EE.UU. esto ha sido posible, en gran medida, a través de la investigación desarrollada después de la II Guerra Mundial en estructuras militares de protección, y después de 1960 a través de los programas de investigación en ingeniería sísmica en los EE.UU., Japón y otros países.

Los códigos de edificación según los cuales se diseñan edificios corrientes también han avanzado de manera impresionante, así que ahora son mucho más idóneos como pauta realista en el diseño contra las fuerzas de terremotos. Está claro que los métodos actuales de diseño sismorresistente en los EE.UU. representan una mejora excepcional, comparados con los métodos de hace 20 o incluso 10 años, en particular en lo que se refiere al predimensionado y armado de elementos estructurales de la superestructura de edificios corrientes. Para poder analizar este hecho, conviene reconocer que las provisiones de código sísmico pueden clasificarse en los dos grupos principales siguientes:

1. **Criterios sismorresistentes.** Este grupo cubre la base de diseño y las especificaciones de fuerzas laterales mínimas y los efectos afines (estimación de exigencias sísmicas), y se discutirá en detalle más adelante.
2. **Especificaciones del código para materiales.** Este grupo regula el predimensionado y armado de elementos de la estructura.

En las dos últimas décadas se han producido enormes mejoras en las especificaciones del código para el cálculo de dimensiones y detalles de armado de miembros estructurales y sus uniones y apoyos. La Fig. 8 ilustra los cambios en el espaciamiento de nudos en el diseño sismorresistente de columnas de hormigón armado. Aunque ya en 1959, en los requerimientos recomendados por la SEAOC, se reconoció la importancia de dotar a la estructura de gran ductilidad, otras provisiones especiales, que se referían al diseño de estructuras sismorresistentes de hormigón armado, aparecieron, por primera vez, en la edición de 1971 del Código ACI [19]. Puesto que la cantidad y el detalle de la armadura transversal para alcanzar altas demandas de ductilidad, difieren algo de los requerimientos de la práctica habitual en el diseño y la construcción de estructuras armadas, el coste del diseño sismorresistente es más alto. Este mayor coste ha causado preocupación y quejas de que quizás haya habido demasiado énfasis en la ductilidad por la ductilidad [15]. También se llegó a plantear la siguiente pregunta válida: "¿Cómo diseñaremos estructuras menos dúctiles, suficientemente resistentes a los terremotos?"

En cuanto a estas quejas y preguntas, el conferenciante cree que los requerimientos de ductilidad no deberían disminuirse en diseño sísmico, por lo menos hasta que los resultados de nuevas investigaciones fiables y sus desarrollos, estén disponibles para justificar tal disminución. Estos rigurosos requerimientos en el predimensionado y, particularmente en el detalle de armados, han sido beneficiados por el actual procedimiento del código de diseño sísmico.

Existen muchas dudas acerca de la estimación de las exigencias y provisiones en el diseño sismorresistente. Como se comenta más adelante, las presentes especificaciones del código para estimar fuerzas sísmicas laterales y sus efectos, no son muy fiables. Por eso la fiabilidad de la metodología actual del código sismorresistente es discutible. Por esta razón, el conferenciante cree que lo que ha permitido que muchos edificios sobrevivan a recientes terremotos, moderados o severos, han sido los rigurosos requerimientos de predimensionado y armado, y no los complejos análisis numéricos realizados para cumplir con las fórmulas del código en la estimación de exigencias.

Criterios del Código de Diseño Sismorresistente de los EE.UU.: Estimación de exigencias. Existen varias dudas en la estimación de exigencias y se pueden dividir en dos categorías: 1) fuerzas sísmicas concretas, y 2) métodos utilizados para estimar la respuesta a estas fuerzas sísmicas.

1) **Estimación de fuerzas sísmicas.** Para edificios normales, las fuerzas sísmicas laterales pueden derivarse de la siguiente manera:

a) *Esfuerzo cortante en la base:*

$$V = C_s W = \frac{C_{sp}}{R} W \quad (5)$$

donde V es la fuerza de corte, C_s se define como el coeficiente de diseño sísmico, W es el peso de la masa reactiva (es decir, la masa que puede inducir fuerzas de inercia), C_{sp} es el coeficiente sísmico equivalente a una aceleración espectral de respuesta lineal elástica, S_a ($C_{sp} = C_s R = S_a/g$), y R es el factor de reducción.

(b) *Distribución del esfuerzo cortante sobre la altura de la estructura:*

$$V = F_t + \sum_{i=1}^n F_i \quad (6)$$

donde F_t es la fuerza concentrada en la parte superior y representa los efectos de los modos más altos (efecto látigo) y:

$$F_i = \frac{(V - F_t) w_i h_i}{\sum_{i=1}^n w_i h_i} \quad (7)$$

es la fuerza en el nivel i (habitualmente aplicada al nivel del suelo), w_i es la porción de W localizada en el nivel i o asignada a él, y h_i es la altura desde la base hasta el nivel i.

TABLA 1.—HISTORIA DE LOS CÓDIGOS DE DISEÑO SÍSMICO EN ESTADOS UNIDOS.

Date	Code or Provisions
Post-1906	San Francisco rebuilt to 30 psf wind
1927	First seismic design appendix in Uniform Building Code: $V=CW$ ($C=0.075$ to 0.10)
1933	Los Angeles City Code: $V=CW$ ($C=0.08$) - First reinforced seismic code
1943	Los Angeles City Code: $V=CW$ [$C=60/(N+4.5)$] - N greater than 13 stories
1952	ASCE-SEAONC ($C=K_1/T_1$) ($K_1=0.015-0.025$)
1959	SEAOC $V=KCW$, $C=0.05/(T_1)^{1/3}$
1974	SEAOC $V=ZIKCSW$
1976	UBC $V=ZIKCSW$
1977	ATC-3 Tentative Recommendations $V=C_s W$, $C_s=1.2 A_v S/RT \leq 2.5 A_g/R$
1988	SEAOC $V=ZIC W/R_w$, $C=1.25 S/T^{2/3} \leq 2.75$ $C/R_w \geq 0.075$

NOTE: W =weight of building, V =base shear, T =period of vibration, N =number of stories, C, K, Z, I and S =numerical coefficients (C was originally a seismic design coefficient, but in codes later than 1943 a numerical coefficient dependent on T ; Z =dependent on the zone in a seismic risk map; I =occupancy importance factor; and S =site-structural resonance or soil-profile coefficient), C_s =seismic coefficient, A_v =effective peak-velocity acceleration, A_g =effective peak acceleration, R =response modification factor, and R_w =numerical coefficient (called system quality factor).

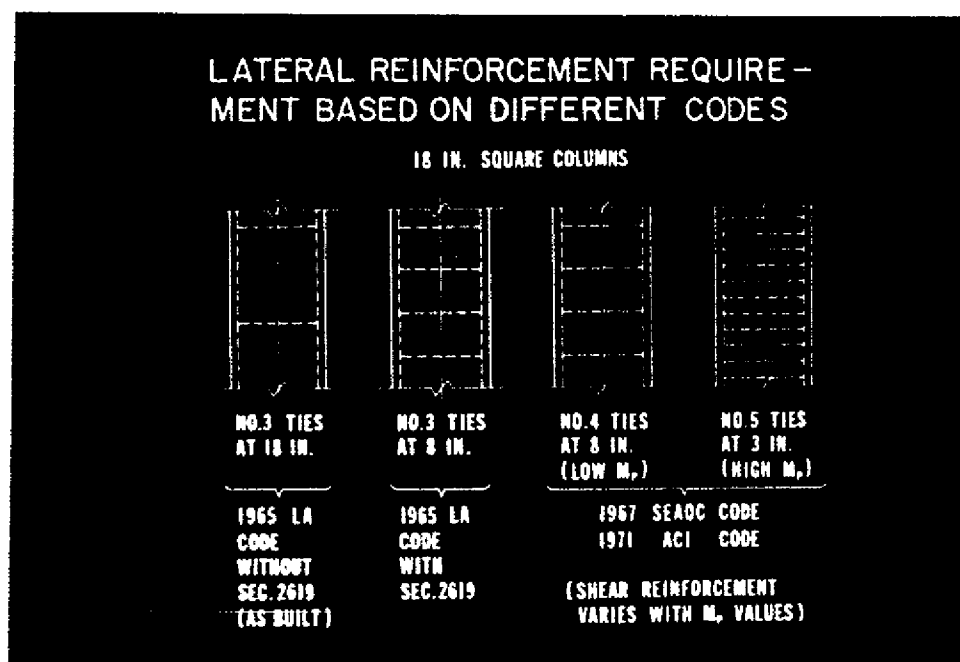


Fig. 8.—ILUSTRACIÓN DE LOS CAMBIOS EN LAS EXIGENCIAS DE LOS CÓDIGOS RESPECTO A ARMADURAS.

2) **Estimación de la respuesta estructural a fuerzas sísmicas.** La respuesta estructural puede estimarse a través del análisis lineal elástico, bien utilizando directamente las citadas fuerzas laterales equivalentes (Ecs. 6 y 7), o bien multiplicando éstas por factores de carga, dependiendo de si el diseño utilizará el método de tensiones admisibles (en estado de servicio) o el método de resistencia a rotura.

Las incertidumbres en la estimación del esfuerzo cortante y su distribución en altura, y también la fiabilidad de los procedimientos y valores especificados en los actuales códigos sísmicos de los EE.UU., se han discutido detalladamente en las Refs. 5, 6 y 8.

Una revisión de la historia de cómo se han calculado los valores del esfuerzo cortante (Tabla 1) demuestra claramente que la ecuación recomendada para su evaluación ha llegado a ser más y más sofisticada y requiere cada vez más coeficientes numéricos empíricos. Sin embargo, lo realmente sorprendente es que el requerimiento del código para dicho esfuerzo sigue siendo prácticamente el mismo que en el primer código sísmico de 1927, incluso ha sido reducido, como se puede deducir de la comparación de las Tablas 1 y 2. Esto sorprende porque la tecnología de edificación en los años 30 era completamente diferente de la actual, y sus resultados fueron edificios con una sobrerresistencia significativamente más baja.

Como indican las Tablas 1 y 2, la SEAOC introdujo cambios significativos en sus recomendaciones del código en 1988 adoptando algunas de las recomendaciones de la ATC-3 de 1977. Las nuevas recomendaciones de la SEAOC se adoptaron en el UBC de 1988 [18]. Aunque estos códigos y recomendaciones recientes, reconocen la severidad de la peligrosidad sísmica en distintas zonas sísmicas de los EE.UU. e incorporan modernas filosofías y enfoques del diseño sísmico, siguen poniendo demasiado énfasis en diseñar para una capacidad de resistencia elástica que es la misma, o incluso inferior, a la que resultó de la aplicación de las provisiones de las primeras regulaciones del código sísmico en los EE.UU. en 1927.

TABLA 2.—COMPARACIÓN ENTRE:

1) EXPRESIONES PARA EL COEFICIENTE $C_s = V/W$,
ESPECIFICADAS POR LAS RECOMENDACIONES DE UBC
1985, ATC-3 Y SEAOC 1988.

2) VALORES DE C_s PARA ESTRUCTURAS
DÚCTILES DE PÓRTICOS RÍGIDOS,
EN REGIONES DE ALTO RIESGO SÍSMICO.

UBC	ATC	SEAOC	UBC	ATC	SEAOC
ZIKCS	$\frac{1.2 A_v S}{RT^{2/3}}$	$\frac{ZIC}{R_w}$	(K=0.7)	(R=8)	($R_w=12$)
$C = \frac{1}{15 \sqrt{T}}$		$C = \frac{1.25 S}{T^{2/3}}$	$\frac{0.51 S}{12 \sqrt{T}}$	$\frac{0.060 S}{T^{2/3}}$	$\frac{0.042 IS}{T^{2/3}}$
ZIKS	$\frac{1.2 A_v S}{RT^{2/3}}$	$\frac{1.25 ZIS}{R_w T^{2/3}}$	For I = 1 and T = 1 sec.		
			V	0.045 S	0.060 S
			Vu	0.063 S	0.060 S
					0.042 S
					0.059 S

El conferenciante ha analizado recientemente las tendencias actuales en diseño sismorresistente y construcción de edificios en los EE.UU. y ha hecho las siguientes observaciones:

- 1) Las recientes recomendaciones del código reconocen la posibilidad de que en un emplazamiento dado, ubicado en una región de alta sismicidad, ocurran movimientos severos del suelo (movimientos del suelo de gran intensidad y larga duración). A pesar de este hecho y de los cambios significativos en la tecnología de la construcción, el coeficiente sísmico con el que los edificios deben ser diseñados ha cambiado muy poco.
- 2) El código sigue poniendo demasiado énfasis en el diseño de resistencia, basado en fuerzas sísmicas ficticias y análisis lineales elásticos de sus efectos.
- 3) Debido a las presiones económicas, los diseñadores intentan satisfacer solamente los mínimos requerimientos del código para la resistencia.

- 4) El desarrollo y el uso de programas de ordenador, basados en el diseño óptimo de elementos de una estructura, conducirá a diseños finales con muy poca sobrerresistencia con respecto a la resistencia mínima que requiere el código.
- 5) El uso de elementos no estructurales muy ligeros y débiles (muros, tabiques, revestimientos, etc.) que son, además, hechos de tal manera que su comportamiento no interfiere con la deformación de la estructura, produce edificios cuya resistencia y rigidez son simplemente las del sistema formado por la estructura.

Todos estos desarrollos y tendencias tienen como resultado la construcción de edificios con muy poca sobrerresistencia, más allá de la resistencia mínima requerida por el código. Existe una necesidad urgente de calibrar la resistencia real y la rigidez de los edificios que han sido diseñados y construidos según los códigos actuales. No puede haber mejora alguna en diseño sísmorresistente de nuevos edificios, evaluando el comportamiento sísmico de edificios existentes, o en la valoración de la vulnerabilidad y reacondicionamiento de edificios peligrosos, si no hay mejora en la predicción de rigidez, resistencia y capacidades de absorción y disipación de energía de sistemas reales (suelo-cimientos-superestructura-componentes no estructurales).

En los últimos años se ha incrementado la investigación de los conceptos del diseño desde puntos de vista probabilísticos. Esta actividad ha dado pie a un nuevo examen de datos pasados, un detenido análisis de conceptos de diseño y una formulación de provisiones de diseño para hacerlas más lógicas a los profesionales. Todavía queda mucho por hacer para aplicar estas investigaciones en las evaluaciones de riesgo sísmico, especialmente en áreas de baja actividad sísmica, y para adaptarlas a la práctica del diseño y la construcción.

Comparación de las provisiones actuales de los códigos sísmicos. Existen muchos códigos sísmicos y provisiones sísmicas recomendadas en los EE.UU. Los requerimientos de fuerza lateral de los códigos sísmicos de los EE.UU se comparan y discuten en Ref. 20. Los análisis de las comparaciones de los códigos de EE.UU. con los códigos actuales de Europa, Chile, Japón, México D.F. y Nueva Zelanda, demuestran claramente que existen algunas importantes discrepancias entre las provisiones sísmicas de los códigos actuales. Esto es consecuencia del hecho de que los códigos sísmicos son, por necesidad, simplificaciones generalizadas del problema muy complejo y real que es el diseño sísmorresistente. Los códigos sísmicos modernos, los cuales intentan reflejar grandes avances en conocimiento y entendimiento de una manera muy simple, no son transparentes sobre el nivel esperado de comportamiento o respuesta del sistema completo (suelo-cimientos-superestructura y componentes no estructurales). El nivel esperado de comportamiento se ha convertido en una parte implícita, más que explícita, de los códigos, a través de una serie de factores empíricos y requerimientos de armados que esconden la verdadera naturaleza del problema de diseño sísmorresistente: el comportamiento del edificio.

Los códigos sísmicos actuales no tienen transparencia en sus provisiones en cuanto al establecimiento fiable de terremotos críticos, que fijen el comportamiento o actuación deseables del sistema completo, en sus distintos estados límite de vida de servicio, y tampoco en las provisiones que se refieren a la respuesta real esperada del sistema diseñado y construido ante terremotos críticos reales (y no sólo a los movimientos especificados por el código). Aunque no han ocurrido suficientes terremotos moderados y severos en áreas urbanas para permitir análisis y juicios del comportamiento de los edificios, diseñados según códigos sísmicos actuales, el comportamiento observado de algunos edificios modernos en terremotos recientes, particularmente en Ciudad de México durante el terremoto de Michoacan en 1985 y en la Bahía de San Francisco, durante el terremoto de Loma Prieta en 1989, indica la necesidad de ciertos refinamientos en el actual enfoque del código de los EE.UU.

Para definir claramente que es lo que se necesita mejorar en el actual enfoque del código, conviene primero resumir las lecciones aprendidas de los recientes terremotos e investigaciones y, a continuación, valorar las implicaciones que afectan a la idoneidad de los actuales códigos para diseño sísmico en los EE.UU. y a la posibilidad de mejorar el diseño sísmorresistente de estructuras. Antes de hacer eso, debería observarse que muchos de los fallos habidos durante terremotos han sido consecuencias de la falta de aplicación adecuada de los códigos.

Adopción y aplicación de los códigos de diseño actuales. La adopción y aplicación de los actuales requerimientos de diseño en los diferentes estados y corporaciones locales, varía mucho en EE.UU. Un informe de la National Conference of States on Building Codes and Standards, de 1977, indicaba que alrededor de un cuarto de los estados tenía códigos de edificación para el estado entero. Las investigaciones posteriores a los terremotos, frecuentemente revelan prácticas de construcción que no respetan las normas que podrían haber sido eliminadas por una supervisión competente o una inspección durante la construcción. Observaciones informales sugieren también que la aplicación de los códigos de edificación es probablemente poco exigente, salvo en los estados occidentales de los EE.UU.