

y técnicas eficientes, de modernización sísmica de estructuras peligrosas existentes. Finalmente, se proponen nuevas aproximaciones, para perfeccionar el estado de la práctica del diseño sísmorresistente de nuevas estructuras y el reacondicionamiento de estructuras existentes sísmicamente peligrosas.

La conferencia empieza con un repaso de problemas especiales, inherentes al diseño sísmorresistente y construcción de edificios. A continuación, se comenta brevemente el estado de la práctica de éste en EE.UU., analizando la fiabilidad de los procedimientos del actual código de diseño, a la luz de algunos terremotos y comportamientos de edificios registrados recientemente.

A continuación se resumen, evalúan y discuten las características principales de terremotos recientes, y las lecciones aprendidas reiteradamente de ellos. Se valoran las implicaciones de estas lecciones y de los resultados de recientes investigaciones, en particular los referentes a la base lógica y a la fiabilidad de las regulaciones del código de EE.UU., que se ocupan de establecer el diseño sísmico y las cargas sísmicas, por medio de los llamados **Factor de Modificación de Respuesta, R**, y **Factor de Calidad Estructural, R_w**.

Finalmente, se discute brevemente el problema de reacondicionar las estructuras existentes, sísmicamente peligrosas, con el énfasis en la necesidad de desarrollar estrategias y técnicas eficaces. También se discuten estrategias y técnicas basadas en el uso de la ecuación de conservación de la energía, potencialmente atractivas desde el punto de vista de conseguir mejoras eficientes de edificios ya existentes.

REPASO DE PROBLEMAS ESPECIALES ENCONTRADOS EN EL DISEÑO Y CONSTRUCCION DE ESTRUCTURAS SISMORRESISTENTES.

Para realizar un eficiente diseño sísmorresistente de una instalación es necesario predecir, de manera fiable, el comportamiento mecánico (dinámico) del sistema completo (suelo, cimentaciones, superestructura, y los componentes y contenidos no-estructurales) de un edificio. Los problemas generales que se encuentran en la predicción de la respuesta sísmica de un edificio están simbólicamente definidos y esquemáticamente ilustrados en la Fig. 3. Estos problemas generales se analizan detalladamente en las referencias 1, 4, 5 y 8.

El primer problema es estimar con precisión el movimiento del suelo en los cimientos del edificio, X_3 .

El segundo problema es la predicción de la deformación, X_4 , para un edificio particular, en respuesta a un movimiento del suelo específico, X_3 , lo que depende del efecto combinado de las características dinámicas de todas las excitaciones que actúan sobre el edificio. Habitualmente, las principales excitaciones que actúan sobre las estructuras durante terremotos fuertes se deben a: 1) fuerzas de gravedad, $G(t)$, con los efectos asociados de cambios volumétricos producidos por fluencia de material estructural, hormigón en particular; 2) cambios en las condiciones ambientales, $E(t)$, como esfuerzos producidos por variaciones de temperatura, humedad, viento, nieve; y 3) al menos las tres componentes de traslación del movimiento en la base de la estructura, $X_3(t)$.

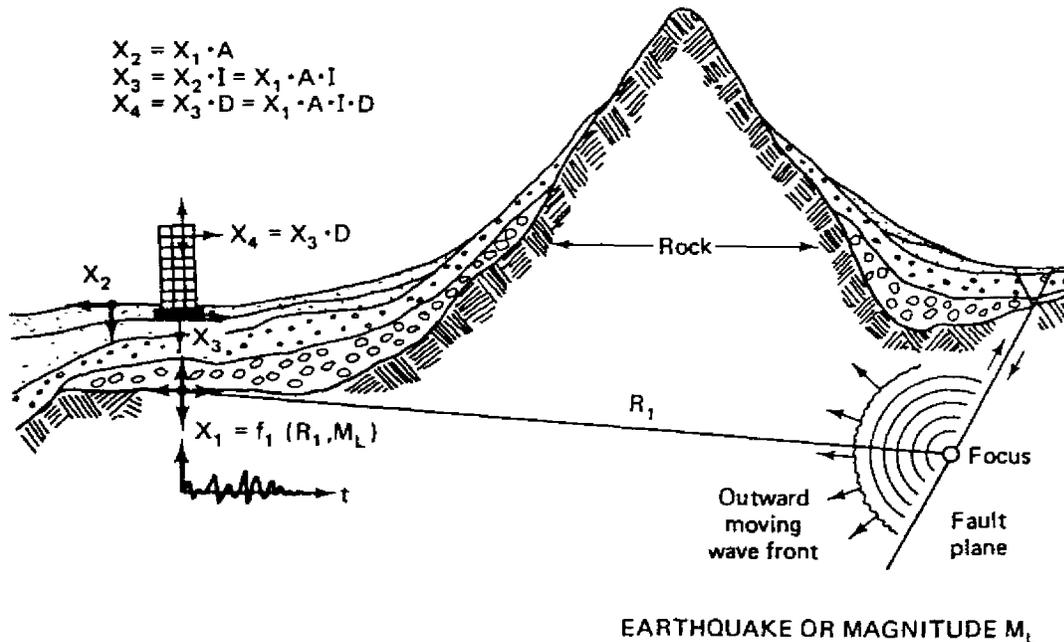


Fig. 3.—ILUSTRACIÓN DE LOS PROBLEMAS Y FACTORES RELACIONADOS CON LA PREDICCIÓN DE LA RESPUESTA SÍSMICA DE UN EDIFICIO.

Como se ve en la Ec. 3(a), las características dinámicas del sistema completo, las cuales pueden cambiar continuamente si la estructura se deforma dentro de su rango inelástico, se pueden resumir como valores instantáneos de: 1) masa, $M(t)$; 2) coeficiente de amortiguamiento, $\xi(t)$; y 3) función de resistencia (R vs. X_4)(t). También se pueden representar, como se ve en la Ec. 3(b), por los valores instantáneos de: 1) periodo fundamental, $T(t)$; 2) coeficiente de amortiguamiento, $\xi(t)$; 3) resistencia elástica, $R_y(t)$; y 4) absorción de energía y capacidad de disipación, denotadas por la ductilidad instantánea, $\mu(t)$, que es función de $X_4(t)$.

$$X_4(t) = F \left\{ [G(t), \Delta E(t), X_3(t)], \quad [M(t), \xi(t), (R \text{ vs. } X_4)(t)] \right\} \quad 3(a)$$

$$X_4(t) = F \left\{ \underbrace{[G(t), \Delta E(t), X_3(t)]}_{\text{Características dinámicas de las excitaciones}}, \quad \underbrace{[T(t), \xi(t), R_y(t), \mu(t)]}_{\text{Características dinámicas del sistema completo, suelo-cimientos-superestructura-elementos no estructurales}} \right\} \quad 3(b)$$

El análisis de los parámetros de las Ecs. 3(a) y 3(b), indica la magnitud de los problemas que supone la predicción de la respuesta a movimientos del suelo. El primer problema es que para predecir X_4 , éste debe ser conocido. Otro problema es que todos estos parámetros son función del tiempo, aunque las fuerzas de gravedad y las condiciones ambientales tienden a permanecer casi constantes para la duración de un terremoto. Deberíamos tener en cuenta que el valor $\Delta E(t)$, representa algo más que tan sólo los esfuerzos inducidos por cambios ambientales durante movimientos críticos del suelo, porque este parámetro también tiene en cuenta el esfuerzo y la deformación durante el terremoto debidos a: 1) cambios térmicos previos o retracciones, que causan tensiones o distensiones residuales y deterioro por envejecimiento y corrosión; 2) degradación de resistencia y rigidez causados por exposición previa a fuertes vientos, incendios, o terremotos; y 3) cambios de resistencia y rigidez causados por alteración, reparación o refuerzo. Ya que una de estas condiciones puede afectar seriamente la respuesta estructural, los factores que se deben considerar en la determinación de la resistencia y de las capacidades de deformación, incluyen las variaciones en la carga y las historias ambientales durante la vida útil del edificio, y los efectos de éstas en su estado, en el momento de ocurrencia de circunstancias ambientales extremas. Asimismo, debería tenerse en cuenta que $E(t)$ también afecta (R vs. X_4)(t).

Otra dificultad es que la predicción de la respuesta, $X_4(t)$, en el límite (de seguridad), habitualmente incluye respuesta no-lineal (inelástica). Por lo tanto, no es posible aplicar el principio de superposición y resolver el problema independientemente para cada una de las diferentes excitaciones, y luego superponer las soluciones. Ésta es una de las razones principales por la cual, en la práctica, los diseñadores prefieren reducir (simplificar) la predicción de la respuesta sísmica de una estructura y, de ese modo, limitar su diseño al rango lineal elástico de la respuesta real.

DIFERENCIAS ENTRE ANÁLISIS Y DISEÑO, Y ENTRE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN.

Un diseño preliminar debería estar disponible para realizar análisis lineales y no-lineales (inelásticos) de modelo(s) suelo-cimientos-superestructura. Para distinguir claramente entre análisis y diseño, y al mismo tiempo identificar problemas inherentes al diseño de estructuras sismorresistentes, es conveniente analizar los pasos principales que se han de satisfacer en lo que puede llamarse la ecuación básica de diseño (Ec.4):

EXIGENCIA	≤	PROVISIÓN	(4)
de		de	
Rigidez		Rigidez	
Resistencia		Resistencia	
Estabilidad		Estabilidad	
Capacidades de absorción y disipación de energía.		Capacidades de absorción y disipación de energía.	

La evaluación de las exigencias y la predicción de las provisiones no son fáciles, particularmente cuando se trata de edificios sismorresistentes. La determinación de las exigencias, habitualmente a través de análisis numéricos de modelos matemáticos del sistema completo, suelo-cimientos-superestructura-componentes no-estructurales (la superestructura es lo único que realmente debería ser modelizado) depende, no sólo de la interacción de este sistema con las diferentes excitaciones que se originan por cambios en el entorno del sistema, sino también de la **interrelación intrínseca entre las propias exigencias y provisiones.**

En las últimas tres décadas, nuestra capacidad para analizar modelos matemáticos de edificios, expuestos a movimientos del suelo, ha avanzado dramáticamente. Se han desarrollado y utilizado sofisticados programas de ordenador para análisis numérico de respuesta sísmica, lineal o no, de modelos 3D de estructuras de edificios, para ciertos movimientos del suelo asumidos (**terremotos de entrada**). Ha llegado el momento de aprovecharse de estos perfeccionamientos en el análisis del diseño sismorresistente de estructuras. No obstante, en general, estos análisis no han conseguido predecir respuestas de edificios reales, particularmente en estados límites últimos. Como consecuencia de esto y también de la falta de modelos fiables para predecir **las provisiones de estructuras reales**, no se ha avanzado suficientemente en el diseño sismorresistente. Existe una necesidad urgente de mejorar los modelos matemáticos de instalaciones reales. Esto requiere una investigación analítica y experimental conjunta.

El predimensionado y detalle de armado de los elementos estructurales de un edificio se hace habitualmente mediante ecuaciones derivadas de la teoría de mecánica de medios continuos o utilizando formulas empíricas. Excepto en el caso de flexión pura, no se ha desarrollado una teoría general con ecuaciones fiables que puedan predecir con precisión las capacidades de absorción y disipación de energía de los elementos estructurales y de los llamados elementos no estructurales, es decir, de edificios reales. Mejorar esta situación requerirá integrar investigaciones analíticas y experimentales en campo (a través de instrumentación intensiva de edificios), y en laboratorio (a través del uso de simuladores seudo-dinámicos y/o simuladores de terremotos).

La información que se necesita para mejorar el diseño sismorresistente, por medio de mejoras en la predicción de respuestas de estructuras a terremotos, puede agruparse según los tres siguientes elementos básicos: **terremoto de entrada, exigencias a la estructura y capacidades provistas de la estructura.** Estos tres elementos básicos del problema de respuesta a terremotos se discuten brevemente a continuación, junto con los comentarios sobre la importancia de una construcción correcta y un adecuado mantenimiento.

Terremoto de entrada: Especificación de terremoto de diseño y criterios de diseño. El terremoto de diseño depende de los criterios de diseño, es decir, del estado límite que controla el diseño. Conceptualmente, el terremoto de diseño debería ser aquel movimiento del suelo, de todos los probables que pudieran ocurrir en el emplazamiento, que conduzca a una estructura a su respuesta crítica. En la práctica, este concepto simple encuentra serias dificultades en su aplicación porque, primero, existen grandes dificultades en la predicción de las principales características dinámicas de los movimientos del suelo, que todavía no han ocurrido en el emplazamiento del edificio y, segundo, porque incluso la respuesta crítica de un sistema estructural variará según los varios estados límites que pudiera controlar el diseño.

Los códigos sísmicos especifican terremotos de diseño en términos de un código de edificación por zonas, un factor de intensidad para el emplazamiento o una aceleración pico para el emplazamiento. La confianza en estos índices es sin embargo generalmente inadecuada, y han sido recomendados métodos [5,8] que utilizan **espectros del movimiento del suelo** basados en aceleraciones pico efectivas (EPA). Mientras que esto ha sido una considerable mejora conceptual, aún quedan grandes incertidumbres en cuanto a los valores apropiados de aceleraciones pico efectivas y espectros del movimiento del suelo, así como de otros parámetros recomendados [8, 11].

Estimación de exigencias fiables. Las mayores dudas en la estimación de exigencias fiables, normalmente a través del análisis numérico, se deben a las dificultades en predecir: 1) la carga sísmica crítica durante la vida de servicio de la estructura (falta de terremotos de diseño adecuadamente establecidos); 2) el estado del sistema completo, suelo-cimientos-superestructura-componentes no estructurales, cuando ocurren movimientos del suelo críticos (selección de modelo(s) matemático(s) adecuado(s) para analizar); 3) las fuerzas internas (deformación) y los esfuerzos (deformaciones unitarias) inducidos en el modelo (análisis estructural y de esfuerzos); y 4) las provisiones o suficiencias realistas de rigidez, resistencia, estabilidad y capacidad para absorber y disipar energía (es decir, comportamiento histerético realista) del sistema total del edificio.

Predicción de provisiones. Las provisiones o suficiencias para un edificio no dependen sólo de las provisiones de su sistema superestructural sin más, sino también de las provisiones procedentes de la interacción del sistema superestructural con el suelo-cimientos y los llamados **componentes no estructurales** del edificio. Por ejemplo, muros de fábrica y/o tabiquerías retacadas como relleno de pórticos rígidos en un edificio introducen cambios importantes en las características dinámicas de ese edificio. Cambios en rigidez, resistencia y capacidades de deformación aparecen en la Fig. 4. En la referencia [16] se evalúan los resultados de los ensayos ilustrados en esta figura, y se discuten las implicaciones de estos resultados. Está claro que cuando se producen interacción entre los componentes estructurales y no-estructurales, ignorar esa interacción en la selección de características numéricas para el cálculo de la estructura, podría conducir a una evaluación de las exigencias completamente

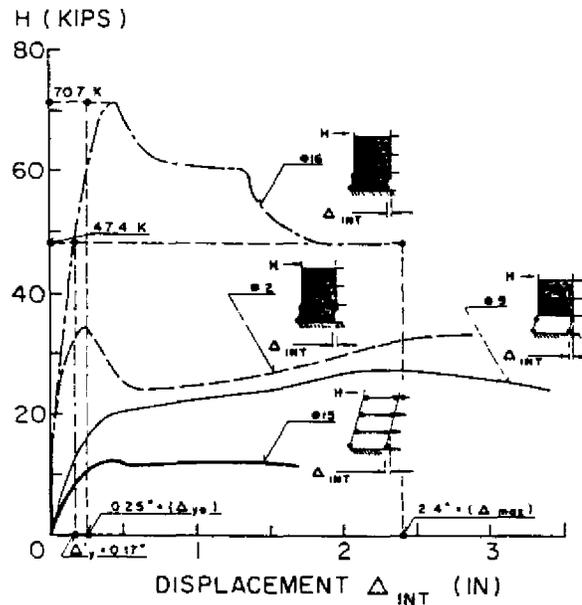


Fig. 4.—EFECTO DE LA ADICIÓN DE RELLENO DE FÁBRICA EN LA RELACIÓN ENTRE LA CARGA LATERAL (H) Y EL DESPLAZAMIENTO ENTRE PISOS (Δ_{INT}), EN PÓRTICOS RÍGIDOS (NO ARRIOSTRADOS).

errónea y, como consecuencia, podría resultar un diseño final pobre del sistema completo. Esta observación se ha confirmado por el hecho de que muchos edificios con estructura de pórticos rígidos de hormigón armado, que tienen relleno de fábrica no armado, se comportaron mal durante el terremoto de 1985 en México. Asimismo, un gran porcentaje de los edificios que colapsaron durante el terremoto de 1988 en Armenia, eran pórticos de hormigón armado con relleno de piedra.

Al considerar la ecuación básica de diseño, el diseñador podría sentirse tentado a aumentar las provisiones, para superar los problemas creados por las dudas en los valores de las exigencias. Sin embargo, la provisión debe aumentarse con mucho cuidado, porque podría contribuir a aumentar de manera considerable la exigencia.

Construcción y mantenimiento adecuados de edificios. Aunque son necesarios un buen diseño preliminar de una estructura y un análisis fiable de dicho diseño, no son suficientes para garantizar una satisfactoria estructura sismorresistente.

La respuesta sísmica de la estructura depende del sistema entero, suelo-cimientos-superestructura-componentes no estructurales, cuando ocurre una sacudida sísmica, es decir, la respuesta depende no sólo de cómo se ha construido la estructura, sino también de cómo se ha mantenido hasta el momento del terremoto. El diseño sólo puede ser efectivo si el modelo utilizado para su preparación puede ser y es construido y mantenido [1, 5, 8]. Aunque se ha reconocido la importancia de la construcción y el mantenimiento en el comportamiento sísmico de estructuras, no se ha hecho suficiente esfuerzo para mejorarlos (por ejemplo, a través de supervisión e inspección). Diseño y construcción están relacionados intrínsecamente. Si se consigue una buena ejecución de obra, el detallado de armado de elementos estructurales y sus apoyos debe ser simple. Inspecciones han revelado que muchos daños y fallos se deben a un mal control de calidad de materiales estructurales y/o a una mala ejecución de obras - problemas que no habrían aparecido si el edificio se hubiese inspeccionado debidamente durante la construcción. Los fotos de la Fig. 5 ilustran el gran daño ocurrido en mitad de un edificio durante el terremoto de Chile en 1985 (las dos mitades, divididas por una junta de expansión, fueron construidas por diferentes contratistas), mientras la otra mitad no sufrió ningún daño. El hormigón en la parte gravemente dañada tenía una resistencia a compresión de solo 100 kg/cm². Uno de los factores principales en los fallos de varios edificios, durante el terremoto de México en 1985, fue la mala calidad del hormigón y la mala ejecución en el acabado y colocación de las armaduras. Una mala ejecución de obra en las uniones era la razón principal del fallo de muchos edificios prefabricados durante el terremoto de 1988 en Armenia (Fig. 6). En muchos otros casos, el daño se puede atribuir a un mantenimiento inadecuado de los edificios durante su vida útil. Alteraciones, reparaciones y rehabilitaciones inadecuadas de la estructura y de los componentes no estructurales, pueden conducir a graves daños en terremotos mayores.

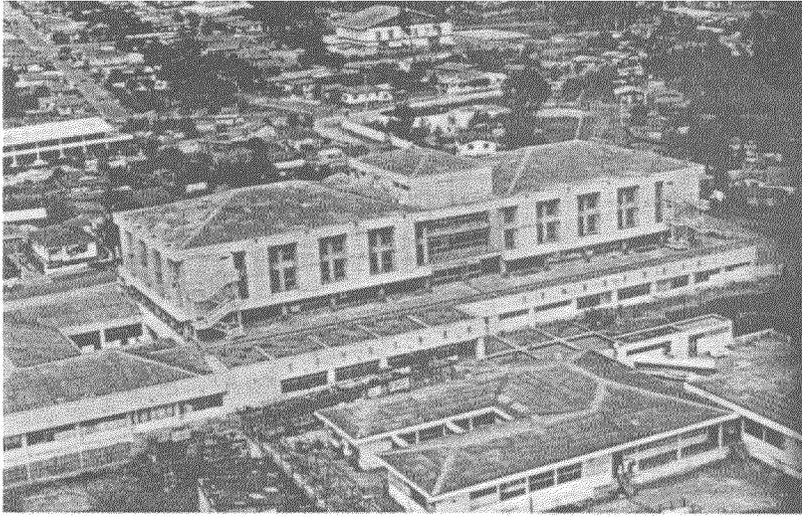


Fig 5(a)—Vista general de un edificio de hormigón armado de cuatro pisos, dividido en dos mitades por una junta de expansión. Una de las mitades fue dañada en el terremoto de Chile de 1985.



Fig. 5(b)—Daño en pilares de hormigón armado

Fig 5 —ILUSTRACIÓN DEL DAÑO DEBIDO A UN DEFICIENTE CONTROL DE CALIDAD DE MATERIAL (Earthquake Spectra, EERI February 1986).