

ASPECTOS CONCEPTUALES DEL DISEÑO SISMORRESISTENTE

Franz Sauter F.
Ingeniero Consultor
Franz Sauter & Asociados S.A.
San José, Costa Rica

RESUMEN

La experiencia demuestra que la aplicación de los códigos sísmicos no garantiza necesariamente el buen comportamiento de las edificaciones. La falla de estructuras diseñadas de acuerdo con los códigos confirma que aun no podemos cuantificar adecuadamente las características del movimiento del terreno y que las sollicitaciones sísmicas pueden ser mayores que las deducidas de los espectros de diseño. El diseñador otorga frecuentemente excesiva confianza a los resultados del análisis dinámico y del cálculo electrónico, olvidando que nuestra habilidad para analizar las estructuras excede en mucho nuestra capacidad para predecir la demanda sísmica. El diseño sismorresistente es una disciplina aun llena de incertidumbres, que demanda del ingeniero capacidad para intuir el comportamiento de las estructuras, criterio para seleccionar el sistema resistente más eficiente y pericia para satisfacer requerimientos arquitectónicos y estructurales. El trabajo en equipo y una estrecha colaboración entre arquitecto y diseñador estructural son requisitos para el éxito del proyecto.

INTRODUCCION

El diseño sismorresistente, una disciplina científica reciente en estado de evolución y aun llena de incertidumbres, sigue siendo un arte que demanda del ingeniero:

- * experiencia adquirida a través del estudio de los daños ocasionados por eventos destructivos, asimismo
- * capacidad para intuir el comportamiento sísmico de las estructuras,
- * criterio para seleccionar el sistema resistente más eficiente y económico, y
- * pericia profesional para combinar y satisfacer requerimientos arquitectónicos, funcionales y estructurales.

La experiencia derivada de terremotos ocurridos en las últimas décadas, demuestra que la aplicación de los códigos sísmicos vigentes no garantiza necesariamente el buen comportamiento de las obras durante eventos de alta intensidad. La falla y colapso de estructuras diseñadas de acuerdo con los requerimientos de los códigos, confirma que aun no se conocen adecuadamente las características de la sacudida del terreno y que el parámetro de intensidad empleado, la aceleración máxima, no es suficiente para

estimar la energía impartida a la estructura. La predicción de la demanda sísmica es aun incierta, pues está basada en información insuficiente y no incluye factores tales como la duración de la fase de movimiento intenso y los impulsos de gran contenido de energía. Por otro lado, los registros de aceleración en áreas epicentrales indican que la intensidad del movimiento puede superar los valores de aceleración determinados en los estudios de riesgo sísmico y la demanda puede ser mayor a la deducida de los espectros de diseño.

Frecuentemente, el diseñador otorga excesiva confianza a los resultados del análisis matemático complejo, a las hipótesis de diseño, a los cálculos probabilísticos y confía absolutamente en una falsa exactitud del cálculo electrónico. Se olvida que:

- * **Nuestra habilidad para analizar estructuras excede en mucho nuestra capacidad para determinar la demanda sísmica**

Al concebir y diseñar una obra, el ingeniero debe tener presente la incertidumbre que existe en la determinación del riesgo sísmico, para predecir las características e intensidad del movimiento, la multiplicidad de parámetros requeridos para cuantificar la energía que debe absorber y disipar la estructura, los errores cometidos en su modelación y la dificultad para analizar correctamente la interacción con los elementos no-estructurales.

Hacer énfasis sobre las consideraciones anteriores, asimismo sobre el aspecto conceptual en la estructuración y diseño sismorresistente, es el propósito de esta presentación.

OBLIGACION DE LOS PROFESIONALES

Es obligación ética de los profesionales dedicados al campo de la construcción, arquitectos, ingenieros y contratistas, concebir, diseñar y construir obras capaces de resistir la violenta sacudida del terreno, consecuencia de un sismo, y contribuir, a través de su acción y práctica profesional, a reducir el impacto funesto que estos eventos naturales han causado a la humanidad. Evitar el colapso y proteger la vida humana es un objetivo primordial del diseño sismorresistente, pero no único; la reducción de los daños debe ser igualmente una meta prioritaria, pues las pérdidas materiales derivadas pueden ser muy cuantiosas y tener un impacto negativo y funesto sobre la sociedad y la economía de un país o región.

Se desea, a través de una práctica constructiva adecuada, evitar que se repitan tragedias como la de Managua, en la cual el centro de la capital de Nicaragua fué literalmente arrasado por el terremoto de diciembre 1972 con un saldo de 10,000 muertos, o la de Guatemala en 1976, donde 22,000 personas perecieron bajo los escombros de viviendas de adobe y pesados techos de teja. Más recientemente, en 1988, Armenia fue azotada por un evento destructivo que cobró más de 50,000 vidas.

TENDENCIAS EN LA FORMACION ACADEMICA

Hacer énfasis sobre el aspecto conceptual en el diseño sismorresistente, asimismo resaltar la importancia que adquieren los criterios de estructuración y los detalles constructivos, es uno de los objetivos de esta presentación. Una razón importante motiva al autor a insistir sobre estos aspectos. En la formación académica actual existe una tendencia a dar mayor importancia a la formación teórica; se recargan los estudios con el complejo análisis estructural y se tiende a dotar al futuro ingeniero de un poderoso instrumental matemático para manejar complejos modelos que representan estructuras idealizadas, que a veces tienen poca semejanza con la obra que se pretende diseñar y construir, descuidando frecuentemente el aspecto fundamental de la concepción estructural y del detalle constructivo. Esta tendencia hacia la formación eminentemente teórica, con poco énfasis sobre los aspectos creativos, conceptuales y constructivos, se ha acentuado aún más con el advenimiento de los computadores y del cálculo electrónico.

Así, el estudiante y luego el joven profesional, se inclinan a considerar el diseño sismorresistente como un proceso eminentemente matemático de modelaje y análisis, y tienden a confiar excesivamente en los resultados del cálculo electrónico. Olvidan frecuentemente el aspecto creativo que debe prevalecer en ingeniería, o restan importancia a la concepción del sistema resistente más confiable y eficiente para resistir las sollicitaciones inducidas por sismo. Pero también menosprecian los aspectos relacionados con el detalle constructivo.

Obviamente, el autor no tiene nada en contra de un riguroso análisis de la estructura que se pretende diseñar, y no objeta el juicioso empleo de la programación y computación electrónica como un valioso instrumento para predecir mejor el comportamiento del sistema estructural sometido a las vibraciones del terreno. La oficina de consultoría del autor cuenta con excelentes computadoras que facilitan la labor de análisis y en ella se han realizado análisis dinámicos de obras complejas para determinar las características dinámicas, modos de vibración y respuesta modal de puentes en arco de gran luz y de edificios altos con muros estructurales acoplados a pórticos dúctiles.

DISEÑO SISMORRESISTENTE: UN ARTE

No debemos perder de vista que la ingeniería, a pesar de ser ciencia aplicada, sigue siendo un arte; un arte que requiere ingenio profesional para concebir y crear una obra. A pesar de la avanzada tecnología, la construcción de obras continúa requiriendo del arquitecto y del ingeniero una inclinación hacia lo artístico, un placer por crear formas estéticamente agradables y sentido común para concebir obras estructuralmente sanas. Poco sirven los resultados de un análisis dinámico complejo, si la estructura ha sido mal concebida y cuando el sistema resistente

adoptado no es adecuado ni eficiente para resistir las sollicitaciones sísmicas.

Si antiguas culturas, mucho antes del advenimiento de la técnica, lograron erigir imponentes obras que han sobrevivido las inclemencias y avatares de los siglos, ha sido porque los constructores de ese tiempo desarrollaron un conocimiento intuitivo de como las partes reaccionan ante las cargas impuestas. No olvidemos que ni los arquitectos romanos en la construcción de sus grandiosas y osadas cúpulas y acueductos, ni los conquistadores árabes que crearon obras de gran belleza y gracia, cuyo valor estético sigue teniendo vigencia en nuestros días, contaron con medios matemáticos para diseñarlas. Los hombres del gótico, en la edificación de sus imponentes catedrales con sus atrevidas torres y altas naves, sólo contaron con ingenio creativo, audacia y mucha intuición, que son cualidades que deben caracterizar al verdadero constructor. Nuestros antecesores de la Antigüedad y del Medioevo tenían en común un conocimiento intuitivo del flujo de las fuerzas y de como conducir las pesadas cargas en la forma más directa y eficiente hacia las fundaciones, como lo atestiguan los arbotantes que daban estabilidad a las altas naves y conducían las fuerzas ejercidas por las cúpulas hacia la cimentación. Los maestros-albañil del gótico, antecesores de nuestros arquitectos, aprendieron a través de generaciones a combinar la forma estructural con la función arquitectónica y estética, como lo atestiguan las atrevidas torres, que en la catedral de Ulm, Alemania, alcanzaron la impresionante altura de 180 metros. Pasarían seis siglos hasta que el hombre moderno lograra sobrepasar estas sorprendentes realizaciones del hombre medieval, que según lo perciben algunos historiadores, vivía en el oscurantismo. ¡Que desconocimiento de la capacidad creativa del hombre de antaño!

También las nuevas generaciones de profesionales deben aprender, abriéndose paso a través del laberinto casi impenetrable de conocimientos que les brindan la ciencia y la técnica, a cultivar el placer por crear formas estructurales y a percibir intuitivamente el comportamiento de las obras que proyectan y que desean construir. En nuestro siglo, dos grandes hombres sobresalen como ejemplo de ese constructor que he idealizado: Pier Luigi Nervi en Italia, y Eduardo Torroja en España, ingenieros con inspiración de arquitectos, que poseían genio creativo y la intuición para concebir y diseñar sus obras. Estos eminentes hombres continúan sirviendo de inspiración a las generaciones jóvenes.

Las consideraciones anteriores se resumen a continuación:

* En la estructuración de edificaciones sismorresistentes, debe prevalecer el aspecto conceptual sobre las formulaciones matemáticas y el análisis numérico.

* La percepción intuitiva del comportamiento sísmico de las edificaciones es fundamental para poder concebir una estructura capaz de resistir las sollicitaciones impuestas por la violenta sacudida del terreno.

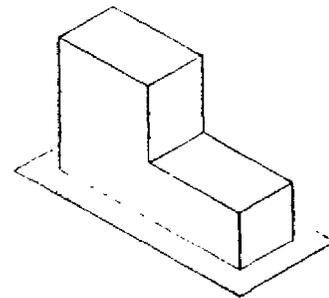
* En regiones expuestas al riesgo sísmico, olvidar el aspecto conceptual y el detalle constructivo puede tener consecuencias fatales.

El análisis y el cálculo numérico son sólo instrumentos para comprobar si la forma arquitectónica concebida y el sistema resistente adoptado son adecuados para la función a que se destinan y para resistir las cargas impuestas. En el campo del diseño sismorresistente, ¿"cuantas veces no se comienza con el análisis de una estructura, antes de haber meditado si la misma es apta y eficiente para cumplir con la función de resistir las sollicitaciones sísmicas"?

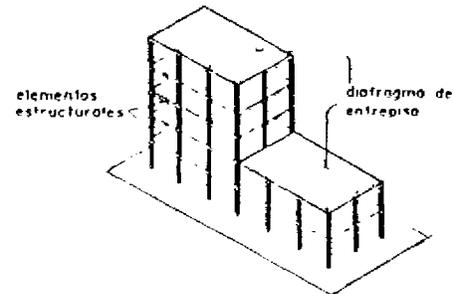
DISEÑO SISMORRESISTENTE : LABOR DE EQUIPO

Es tarea del arquitecto definir la configuración de una edificación, entendida la configuración en general como la forma geométrica del edificio y la disposición del sistema resistente y de los componentes no-estructurales (Figura No.1). La distribución funcional del espacio físico en áreas de actividad principal, de servicios y de circulación define esencialmente la configuración de la obra; pero también intervienen otros factores: la tendencia en el estilo arquitectónico, aspectos de estética, los requerimientos de diseño urbano, la geometría y topografía del sitio de emplazamiento, las condiciones climáticas, y aun el capricho del propietario. La escogencia de la configuración es un proceso lento de toma de decisiones que considera todos estos factores. Sin embargo, en este proceso, en el cual frecuentemente el ingeniero no interviene, el arquitecto define de antemano el tipo del sistema estructural, por lo tanto, influencia la forma en que éste va a ser efectivo en resistir las sollicitaciones sísmicas.

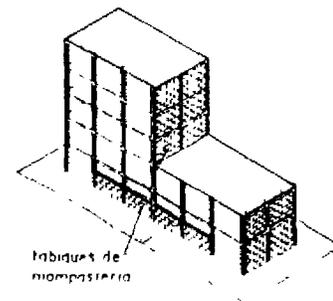
El tipo y disposición de



FORMA GEOMETRICA DEL EDIFICIO



DISPOSICION DE LOS ELEMENTOS ESTRUCTURALES



DISPOSICION DE ELEMENTOS NO-ESTRUCTURALES

Figura No.1 Configuración de un edificio; a) forma geométrica, b) disposición elementos estructurales y c) elementos secundarios

los elementos no estructurales: paredes y tabiques, ductos de elevadores y escaleras y núcleos de servicios, tienen influencia en el comportamiento sísmico de la edificación; a su vez, la elección del tipo de acabados, elementos de fachada, revestimientos y cielos, puede incidir significativamente en la cuantía de daños a causa de un sismo. Muchos fracasos de diseño: daños severos y aun colapso de una obra, se deben a la elección de una configuración inapropiada o equivocada o a la interacción de los elementos no-estructurales. Significa que en la etapa inicial de la concepción de la obra, aún antes de que discutan aspectos relacionados con el diseño estructural, el arquitecto ya está tomando decisiones que pueden afectar el comportamiento general de la obra.

Se concluye que es necesario que desde el inicio de la concepción del proyecto intervenga el ingeniero y que exista una relación estrecha entre diseñador estructural y arquitecto, pues

*** el diseño sismorresistente es una responsabilidad compartida por ambos profesionales: arquitecto e ingeniero.**

Ambos deben comprender los problemas del otro y estar anuentes a hacer mutuamente concesiones para lograr la solución arquitectónica y estructural óptima. No se trata de imponer criterios, sino de convencer al colega de la bondad de la solución propuesta y de las consecuencias que se pueden derivar de una elección equivocada.

El Edificio ENALUF en Managua es un ejemplo de buena colaboración y entendimiento entre arquitecto e ingeniero, lo que tuvo como resultado un excelente comportamiento durante el terremoto de Managua en 1972. El diseño sísmico correspondiente, que se realizó en la oficina del autor, se puede tildar de rudimentario y se realizó en aquel entonces con regla de cálculo y aplicando fuerzas equivalentes, pues no se disponía de computadoras y programas para realizar análisis dinámicos complejos; además, se simplificó el análisis: se despreció la interacción muros y pórticos y se consideró que todas las fuerzas laterales las resistían dos núcleos rígidos de hormigón armado. El éxito del buen comportamiento lo atribuye al autor a que el arquitecto concibió una configuración y distribución ideales que facilitaron la adopción de una estructuración muy eficiente: dos áreas de servicios y de circulación vertical (elevadores y escaleras), con una disposición simétrica, que se prestaron para estructurar la obra con dos núcleos rígidos de hormigón armado, una disposición similar a la mostrada en la parte inferior derecha de la figura No.2, que exhibe gran resistencia a la torsión y es muy eficiente para resistir las fuerzas laterales.

Fijar el tipo de sistema resistente a fuerzas sísmicas y la disposición de los elementos estructurales es, pues, una labor de equipo en la cual deben colaborar estrechamente el arquitecto y el ingeniero desde el momento en que se inicia la concepción del proyecto. El arquitecto debe estar consciente de las consecuen-

cias de los terremotos y los daños producidos por estos eventos naturales, debe tener conocimiento básico sobre el comportamiento de los diferentes sistemas estructurales y saber cuales factores tienden a incrementar la vulnerabilidad de una edificación y la cuantía de daños a esperar; asimismo debe estar consciente que en el diseño sismorresistente

se deben respetar ciertas reglas de estructuración para lograr un buen comportamiento sísmico, que las mismas imponen ciertas limitaciones a la libre creatividad y, a su vez, que el no respetarlas puede tener consecuencias funestas en caso de ocurrir un sismo. Al **equipo de diseño: ingeniero y arquitecto**, corresponde convencer al cliente sobre las consecuencias de los terremotos, el riesgo en que se incurre al elegir determinado tipo y forma de estructura, y los factores económicos involucrados para lograr un buen comportamiento sísmico.

ASPECTOS CONCEPTUALES EN EL DISEÑO

El autor, al igual que muchos ingenieros estructurales de larga experiencia, está convencido que los aspectos conceptuales al definir la configuración de la edificación y en la elección del sistema resistente, asimismo las consideraciones sobre el tipo y disposición de elementos no-estructurales, son quizá más importantes que una extremada exactitud en la determinación de la demanda sísmica y en los resultados de un complejo análisis dinámico. A partir de una solución arquitectónica equivocada, lo más que un buen ingeniero puede hacer es introducir ciertas mejoras, que serán un tanto relativas, pues no le permitirán lograr una solución óptima y una obra con comportamiento sísmico satisfactorio. En cambio, como se mostró en base al ejemplo del Edificio ENALUF en Managua, si el concepto arquitectónico y estructural es correcto, aún incertidumbres en la determinación de la demanda sísmica, simplificaciones en el análisis y pequeños errores de diseño y ejecución, no afectarán sensiblemente el comportamiento de la obra.

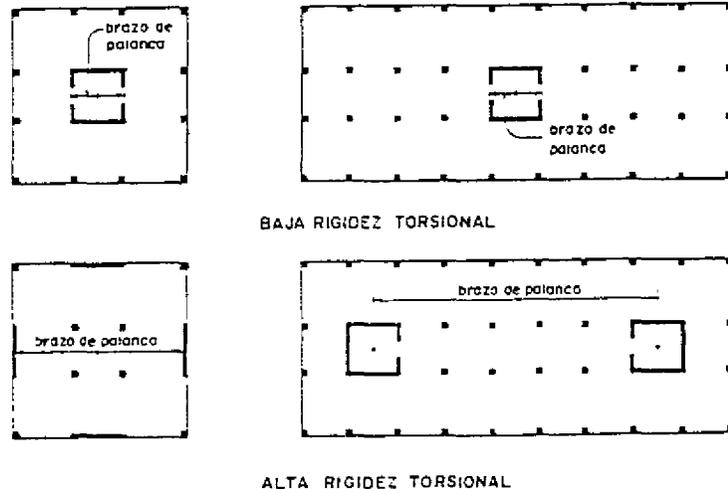


Figura No.2 Rigidez torsional según disposición de los muros estructurales

La premisa para que una obra sea capaz de resistir la violenta sacudida del terreno es que la configuración y la forma estructural sean sanas y adecuadas, aspecto que se debe tener presente en la concepción arquitectónica, pues, citando a D.J.Dowrick:

- * Un ingeniero estructural no puede lograr que una forma estructural pobre se comporte satisfactoriamente, o dicho de otra forma:
- * un análisis dinámico, por más sofisticado y complejo que sea, no puede hacer que una estructura mal concebida muestre buen comportamiento sísmico.

No existe una forma estructural ideal, pero si existen ciertos principios básicos que rigen en el diseño sismorresistente, y que son bien conocidos. Resumido, la estructura debe satisfacer en lo posible las siguientes condiciones:

- * Forma simple
- * Simetría en planta
- * Uniformidad en altura
- * Uniformidad en distribución de rigideces y resistencia.
- * Esbeltez limitada
- * Forma no muy elongada

Desde luego, no siempre se es afortunado de poder analizar y diseñar una obra que reúna todas las anteriores características. Frecuentemente, el arquitecto le somete al diseñador proyectos que muestran varios grados de irregularidad, tanto en planta como altura y que deben ser resueltos estructuralmente en forma satisfactoria (Figura No.3). También se encuentran en la práctica proyectos con características de concepción y estructuración irregular que se conoce conducen a un comportamiento sísmico desfavorable (Figura No.4): interrupción de elementos estructurales tales como muros, en caso de mezzanines columnas de gran longitud, edificios con piso blando y aquellos construídos en las laderas o en terrenos con pendiente

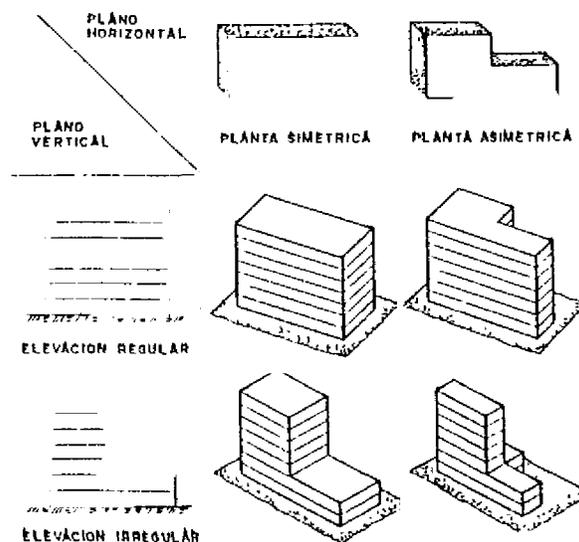


Figura No.3 Grados de irregularidad en planta y altura

pronunciada, y otros casos más que no se agotan en la figura mostrada. En otros casos, la disposición de los elementos no-estructurales rígidos (Figura No. 5), tales como paredes de mampostería, pueden distorsionar la concepción del

sistema resistente e introducir efectos desfavorables de momentos de volcamiento, fuerzas axiales y torsión que pueden fácilmente conducir a la falla o colapso de la edificación.

Lo expuesto anteriormente, como el efecto de torsión, no es novedad para la mayoría de los lectores y no viene al caso ahondar en ello. En estos casos, le corresponde al diseñador convencer al arquitecto de introducir modificaciones en la configuración y en la disposición de los elementos estructurales y no-estructurales. No obstante, dada las condiciones del proyecto y debido a requerimientos funcionales, el arquitecto no siempre puede satisfacer las demandas del diseñador y hay que buscar un compromiso entre los requerimientos estéticos, funcionales y estructurales.

Conviene, además, hacer énfasis en que la forma de afrontar

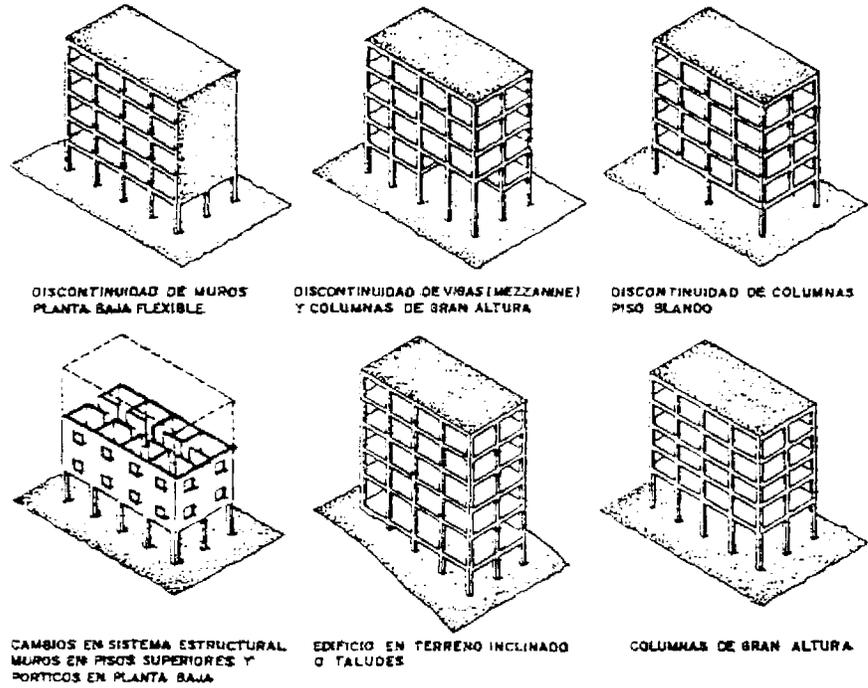
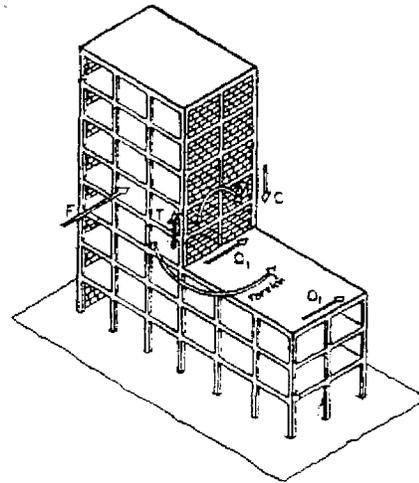


Figura No.4 Grados de irregularidad en el sistema resistente



MUROS DE MAMPOSTERIA INTERRUPTIDOS

Figura No.5 Interacción de elementos no-estructurales

y resolver el problema en proyectos irregulares o asimétricos, no consiste necesariamente en realizar un análisis dinámico, sofisticado y complejo para tratar de predecir el comportamiento de la obra. Debido al alto grado de incertidumbre en la estimación de las sollicitaciones sísmicas, y la dificultad de evaluar correctamente la respuesta inelástica de la estructura, este análisis no siempre arrojará resultados confiables.

En muchos casos, es preferible recurrir a la imaginación para estructurar adecuadamente el edificio con el objeto de reducir el efecto nocivo de dichas irregularidades y asimetría. Introducir juntas de separación (Figura No.6.b) es, desde luego, una solución válida, pero en edificios muy altos no siempre es factible. Introducir elementos que compensen la asimetría y ciertas irregularidades en la configuración tales como muros estructurales, como se muestra en la figura No.6.c, es una solución a la que el autor recurre frecuentemente, pues edificios que incluyen muros en el sistema resistente son de hecho menos vulnerables a sufrir falla y colapso que los sistemas a base de pórticos.

Igualmente importante, es proveer en la estructuración del sistema resistente el mayor grado de redundancia posible. Entre mayor número de líneas de resistencia posea una estructura, mayor será la probabilidad de sobrevivir un evento destructivo sin sufrir colapso. La continuidad es un factor importante, sobre todo para estructuras prefabricadas. A mayor grado de hiperestaticidad, mayores las posibilidades de redistribuir las fuerzas de

secciones altamente esforzadas o falladas a otras secciones menos esforzadas. Los sistemas estáticamente determinados son, obviamente, más vulnerables a colapso debido a que dependen de la resistencia de un elemento para su estabilidad; la falla de una sección conduce al colapso de la estructura. **Sistemas con varias líneas de resistencia y alta redundancia son menos vulnerables a sufrir falla o colapso debido a sismos.**

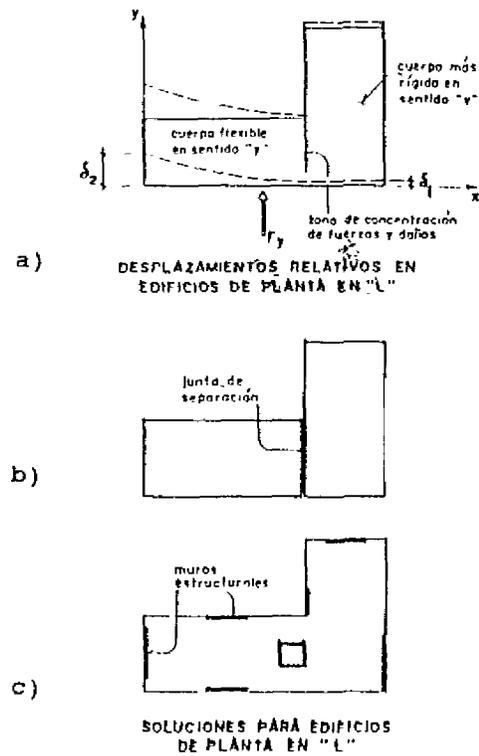


Figura No.6 Soluciones a la asimetría de una a) planta en forma de "L", b) juntas de separación y c) muros estructurales para compensar asimetría en rigideces

SISTEMA RIGIDO VRS. SISTEMA FLEXIBLE

En en este capítulo se aborda un campo polémico que se discute actualmente, a veces acaloradamente, entre ingenieros estructurales: ¿cual sistema es más eficiente para resistir las acciones sísmicas? un debate alrededor del cual se han formado dos escuelas de diseño sismorresistente:

- * sistema estructural flexible a base de pórticos vrs.
- * sistema estructural rígido a base de muros

existiendo una escuela que adopta una posición intermedia entre los dos extremos:

- * sistema de flexibilidad modificada, sea sistema compuesto por muros y pórticos

O sea, la discusión se centra sobre la bondad de los sistemas aporricados respecto a los sistemas compuestos que incluyen muros estructurales. Así, los ingenieros estructurales se dividen, según su criterio, entre los que

- * prefieren sistemas flexibles

y los que

- * favorecen estructuras rígidas

Se reconoce que sistemas flexibles a base de pórticos dúctiles tienen mayor capacidad de absorber y disipar energía por deformación inelástica, que sistemas rígidos a base de muros estructurales (Figura No.7). Por esta razón, en Estados Unidos de Norteamérica, en general, predominó por mucho tiempo, y sigue teniendo muchos defensores, la filosofía de los sistemas flexibles. En Japón, en cambio, se ha favorecido por mucho tiempo los sistemas rígidos, pues en

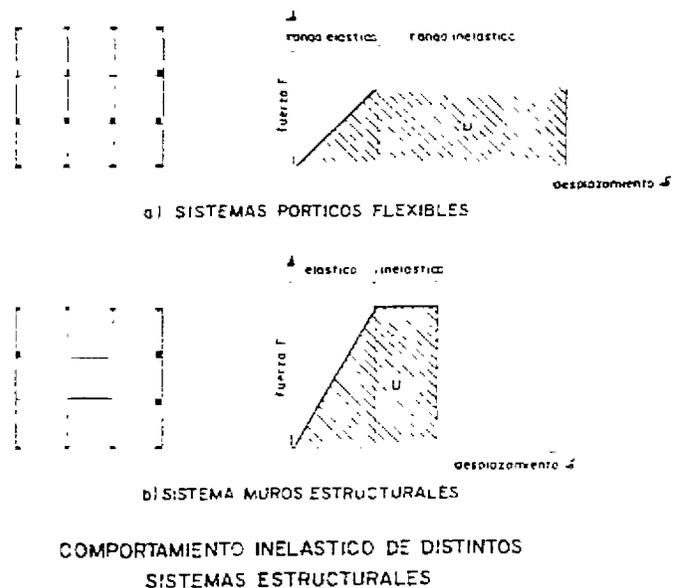


Figura No.7 Disipación de energía sísmica por deformación inelástica: a) pórticos, b) muros

estos los desplazamientos son menores y son capaces de resistir grandes deformaciones del terreno sin daño estructural (Figura No.8).

Los sistemas aporticados, si poseen ductilidad adecuada, tienen gran capacidad de disipar energía por deformación inelástica y pueden ser diseñados para coeficientes sísmicos y fuerzas laterales menores. No obstante, debido a su flexibilidad, el desplazamiento relativo entre pisos o la deriva, aun en sismos de intensidad moderada, puede ser significativa y conducir a daños secundarios mayores en paredes (Figura No.9), cielos, revestimientos e instalaciones; las pérdidas económicas pueden ser muy cuantiosas. En sistemas aporticados se han observado frecuentemente desplazamientos permanentes. La experiencia ha demostrado que este sistema estructural es el más vulnerable a daños secundarios mayores, falla estructural y colapso (Figura No.10).

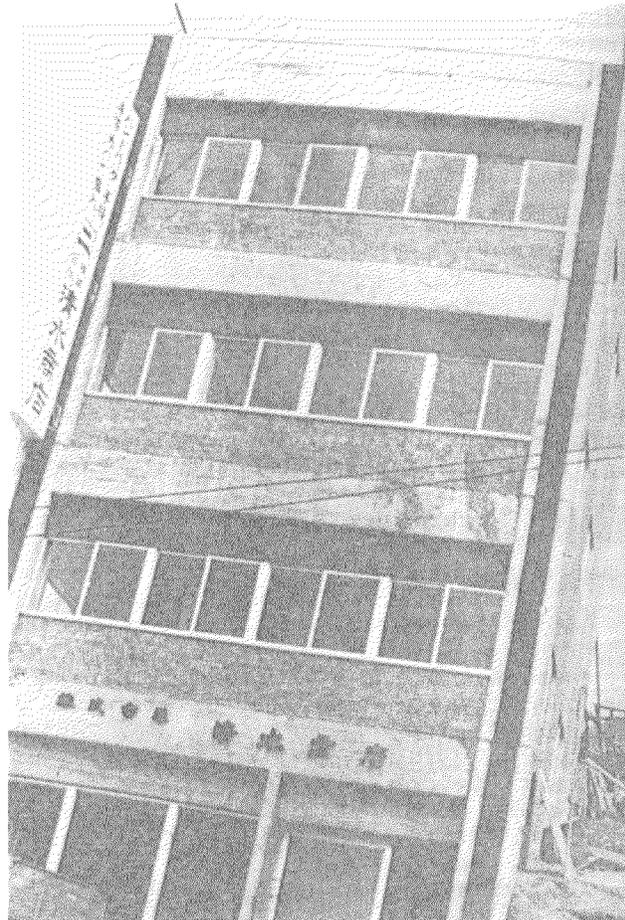


Figura No.8 Asentamiento y volcamiento de un edificio rígido por licuefacción del suelo, Niigata, Japón, 1964

Por otro lado, estructuras aporticadas, que han mostrado un buen comportamiento sísmico sin daño estructural, han resultado un fracaso al salir fuera de funcionamiento y al ser declarados inhabitables debido a daños secundarios severos. En edificios altos (Figura No.11), los grandes desplazamientos en estructuras aporticadas obligan a dar debida consideración del efecto P - delta, o sea al efecto de flexión secundaria debido a la excen-