

tricidad de las cargas axiales en las columnas deformadas. La ductilidad del sistema y los detalles constructivos tendientes a proveer confinamiento del hormigón, adquieren especial importancia. Las conexiones viga-columna son zonas de gran concentración de esfuerzos y son sumamente vulnerables a falla.

El mecanismo de falla de sistemas aporticados requiere especial consideración, pues se debe dimensionar en tal forma que las rótulas plásticas se formen en las vigas (Figura No.12), para evitar la falla de los elementos verticales o columnas que conduce al colapso. Al modelar una estructura aporticada no se pueden olvidar los elementos no-estructurales rígidos, especialmente las paredes y tabiques de mampostería que, si están integradas al sistema resistente, interactúan con el mismo restringiendo la deformación y desplazamiento del sistema resistente. Si se pretende analizar la estructura como un pórtico libre, se deben adoptar medidas para separar la mampostería.

El sistema de losas planas y reticuladas, en combinación con columnas esbeltas, es el ejemplo del

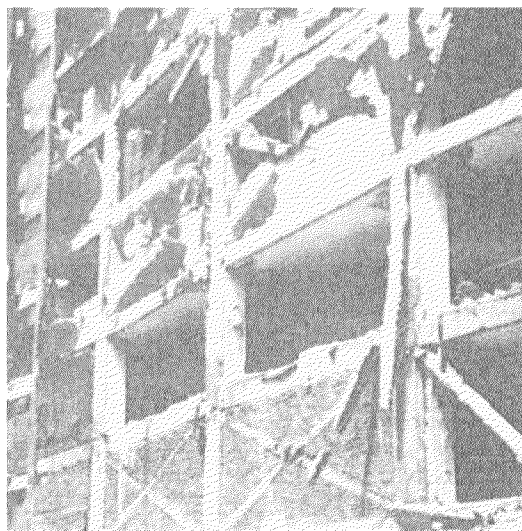


Figura No.9 Daños secundarios en sistemas flexibles en: desprendimiento de paredes - Terremoto México 1985

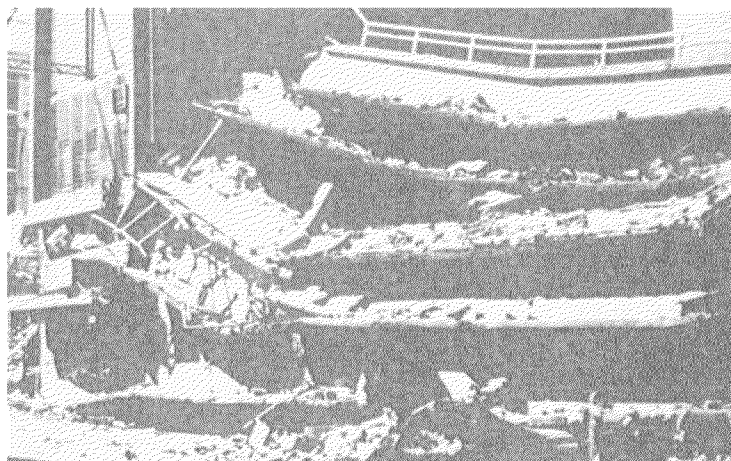
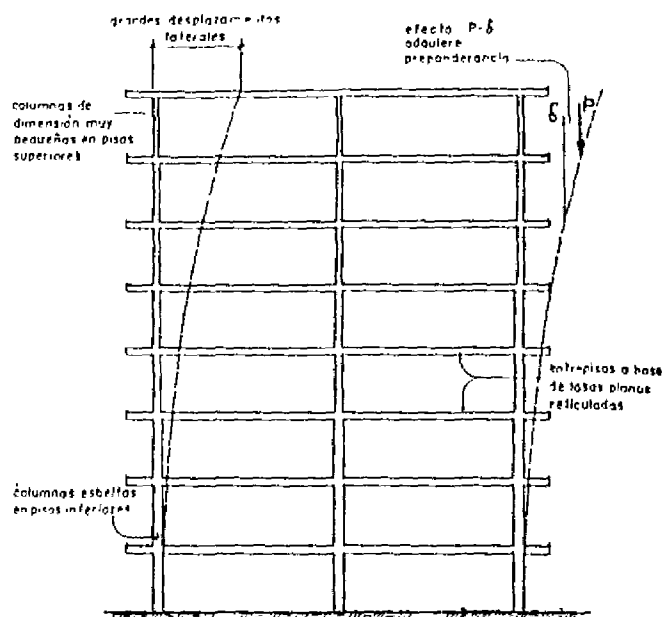


Figura No.10 Colapso de sistema flexible a base de losas planas: edificio Rubén Darío - Terremoto San Salvador 1986

sistema de extrema flexibilidad. Este sistema ha tenido gran difusión en México, Venezuela y otros países de Latinoamérica. El comportamiento de este tipo estructural ha sido desastroso como se comprobó en los terremotos de México 1985 y San Salvador 1986 (Figura No.10). El sistema de losa plana no es un sistema adecuado para resistir las fuerzas inducidas por sismo y no se recomienda su empleo en zonas de alto riesgo sísmico, excepto que se combine con muros estructurales o núcleos rígidos que proveen la estabilidad y resistencia ante fuerzas laterales.



SISTEMA FLEXIBLE A BASE DE LOSAS PLANAS Y COLUMNAS ESBELTAS

Figura No.11 Efecto P- δ en edificios con estructura flexible

Sistemas rígidos tipo cajón y sistemas compuestos de flexibilidad modificada que incluyen pórticos en combinación con muros estructurales de cortante, tienen la ventaja que en ellos se limitan los desplazamientos laterales y la deriva debido a las cargas sísmicas, y como consecuencia, se reducen los daños secundarios y las pérdidas económicas. Los sistemas compuestos tienen mayor redundancia y un grado de hiperestaticidad mayor que sistema aporricados, y generalmente tienen gran capacidad para redistribuir los esfuerzos en caso de falla local, por lo tanto, son menos propensos a sufrir colapso. Los muros pueden sufrir agrietamiento moderado a severo, pero éste es más fácil de reparar que los elementos fallados en los pórticos.

Un ejemplo clásico que confirma las consideraciones anteriores e ilustra el comportamiento sísmico de sistemas a base de muros de cortante, lo representan varios edificios de condominios en Viña del Mar, Chile. En el terremoto de 1985, sufrieron daños de consideración en los muros de cortante, pero éstos no pusieron en peligro la estabilidad de los edificios.

El autor, al igual que muchos ingenieros sísmicos de experiencia, es un defensor entusiasta de la estructuración a base de muros estructurales y considera la inclusión de estos elementos en edificios a base de pórticos, una medida eficaz para modificar

la rigidez del sistema, para reducir los desplazamientos laterales, los daños secundarios y las pérdidas económicas, para aumentar la redundancia del sistema e introducir mayor resistencia, asimismo para eliminar el peligro de falla y colapso debido al efecto P-delta.

Bien es cierto que sistemas flexibles a base de pórticos, debidamente diseñados de acuerdo con los requerimientos de los códigos sísmicos y cuando poseen ductilidad adecuada, han mostrado buen comportamiento estructural durante eventos destructivos. No obstante, los sistemas aporticados han mostrado ser el sistema más vulnerable a falla y colapso. Esta condición se da especialmente si no se da atención a los mecanismos de falla y a la formación de las rótulas en las vigas, para evitar la falla de los elementos verticales (Figura No.12). En edificaciones de hormigón armado, el mayor número de obras colapsadas lo es en estructuras aporticadas, como lo demuestra la experiencia de recientes eventos destructivos.

Concluimos que sistemas flexibles a base de pórticos sin muros estructurales, cuando no han sido debidamente concebidos, diseñados, detallados y construidos son más vulnerables a sufrir daños estructurales, desplazamientos permanentes y aun colapso, por carecer de suficiente redundancia y contar con menos eslabones de resistencia. Sistemas de flexibilidad modificada, en cambio, tienen mayor redundancia y capacidad para redistribuir las fuerzas sísmicas, asimismo mayor reserva de resistencia.

El colapso de edificios es más frecuente y generalizado en edificios flexibles; el colapso de edificios con muros estructurales sólo ha sido observado en casos aislados. Se puede resumir la experiencia, generalizando groseramente desde luego, como sigue:

- * No todos los edificios aporticados sufren colapso, pero todos los colapsos son estructuras a base de pórticos

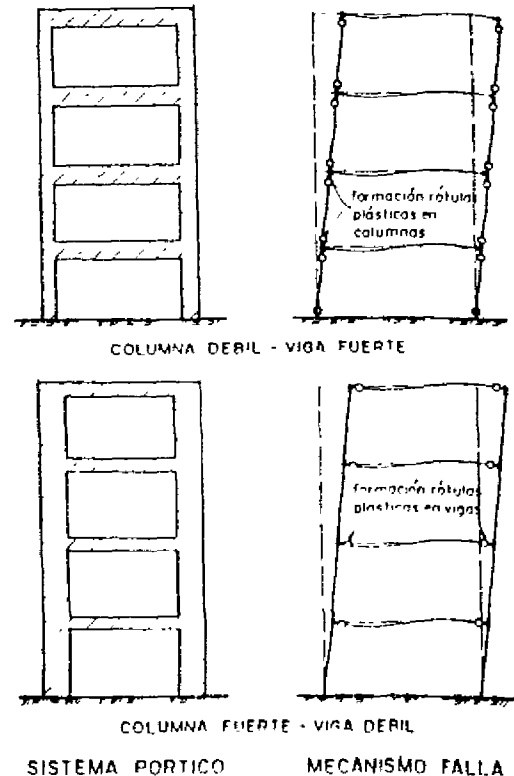


Figura No.12 Formación de rótulas plásticas en vigas y columnas:
a) sistema columna débil-viga fuerte,
b) sistema columna fuerte-viga débil

LOS TERREMOTOS DE CHILE Y MEXICO EN 1985

Una buena oportunidad de comparar el comportamiento de estructuras diseñadas según las dos escuelas o filosofías antes mencionadas: **sistema rígido o sistema flexible**, nos lo dan los terremotos recientes ocurridos en la zona central de Chile en marzo de 1985, y en la capital de México en setiembre del mismo año.

Chile se caracteriza por una práctica de diseño sismorresistente conservadora; el empleo de muros estructurales como parte integral del sistema resistente es ampliamente generalizado. Chile es un exponente de la escuela del diseño rígido o de flexibilidad modificada. El terremoto comprobó la bondad de esta filosofía y confirmó que la estructuración adoptada en dicho país es confiable y segura. Aun cuando se produjeron daños y colapso de algunas estructuras modernas de hormigón armado, estos casos fueron aislados. La buena concepción estructural y el empleo de muros como parte del sistema resistente a fuerzas laterales, demostraron su bondad, como lo comprueba el buen comportamiento de edificios en Viña del Mar, una región en la cual el movimiento alcanzó una intensidad alta, grado VIII en la escala Mercalli Modificada, y donde se registraron aceleraciones del 29% de la gravedad.

México, en cambio, se caracteriza por una práctica de construcción que en edificaciones hace uso extensivo de sistemas flexibles a base de pórticos, losas planas y columnas esbeltas; el empleo de muros estructurales no se ha generalizado aun. Todo el daño y todos los casos de colapso lo fueron en edificios de construcción moderna a base de pórticos y losas planas. El tipo de estructuración empleado demostró un comportamiento desfavorable durante el terremoto de 1985. De los 350 edificios que sufrieron colapso y los más de 400 que debieron ser demolidos por daño estructural severo, todos tenían estructuras de pórticos flexibles y losas planas. Dos secciones del edificio Nuevo León de 15 pisos, situado en el complejo habitacional Tlatelolco, sufrieron colapso total; el número de muertos se estima en 500; la estructuración era a base de losas planas, un sistema, como se ha visto, muy flexible y vulnerable. A 500 metros del edificio se localizan dos edificios tipo torre con muros estructurales formando parte del sistema resistente; a pesar de que uno de ellos se inclinó ligeramente debido a asentamiento de la fundación, los daños estructurales y secundarios fueron insignificantes. La comparación del comportamiento de los dos edificios mencionados, es una confirmación elocuente de la bondad del sistema rígido respecto al sistema flexible.

Las consideraciones anteriores se resumen como sigue:

- * Edificios rígidos y de rigidez modificada son menos vulnerables a sufrir daños secundarios y falla estructural que sistemas flexibles.

- * En regiones epicentrales donde el movimiento es de alta intensidad y en suelos blandos, los sistemas estructurados a base de muros de cortante integrados a pórticos, han demostrado su bondad respecto a sistemas aporricados flexibles.

La preferencia del autor por los sistemas estructurales rígidos o de flexibilidad modificada, se basa en el estudio del comportamiento de estructuras en numerosos eventos destructivos, pero sobre todo en la experiencia personal. En la oficina de consultoría del autor se diseñaron numerosas obras que se construyeron en Managua, previo al trágico terremoto de diciembre 1972. Edificios estructurados con muros de hormigón armado mostraron un comportamiento excelente. El Hotel Intercontinental, en el cual se incluyeron muros estructurales en la planta baja para evitar el efecto nocivo de "piso blando", resistió la violenta sacudida del terreno, con intensidad de IX en la escala de Mercalli y aceleraciones estimadas en el orden de 50% de la gravedad, con daños estructurales menores; tres meses después del evento, el hotel fue puesto nuevamente en operación. El edificio ENALUF, cuyo sistema resistente a fuerzas laterales, está constituido por dos ductos rígidos, dispuestos simétricamente, resistió el sismo en forma igualmente satisfactoria. El buen comportamiento de estas edificaciones se atribuye a la inclusión de muros estructurales de corte.

REFERENCIAS

1. Arnold, Christopher and Reitherman, Robert (1982) - **Building configuration and seismic design**, John Wiley & Sons, New York
2. Blume, John A., Newmark, Nathan M. and Corning, Leo H. (1961) - **Design of multistory reinforced concrete buildings for earthquake motions**, Portland Cement Association, Chicago, Illinois
3. Davidovici, Victor et al (1985) - **Genie parasismique**, V.Davidovici, editor, Presses de l'Ecole Nationale de Ponts et Chaussées, Paris.
4. Dowrick, David J. (1977) - **Earthquake resistant design; A manual for engineers and architects**, John Wiley and Sons, New York
5. Fintel, Mark and Gosh, S.K (1983) - **Earthquake resistant structures - Handbook of structural concrete**, edited by F.K Kong et al, McGraw-Hill Book Company, New York, N.Y.
6. Grases, José (1987) - **Concreto armado en zonas sísmicas**, Divisider, División Siderúrgica de Empresas Sivensa, Caracas, Venezuela

7. Grases, José, López, Oscar A. y Hernández, Julio Javier (1984) - **Edificaciones sismorresistentes; manual de aplicación de la norma**, Fondur, Caracas, Venezuela
8. Newmark, Nathan and Rosenblueth, Emilio (1971) - **Fundamentals of earthquake engineering**, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.
9. Sauter, Franz (1989) - **Interacción mampostería-estructura**, Memorias 5.Jornadas Chilenas de Sismología e Ingeniería Sísmica, Vol.II, Santiago, Chile, agosto 1989
10. Sauter, Franz (1989) - **Conceptos de estructuración sismorresistente**, Seminario de Diseño Sismorresistente de Estructuras de Hormigón Armado, Instituto Eduardo Torroja del Cemento y la Construcción, Madrid, España, noviembre 1989
11. Sauter, Franz (1989) - **Estructuras prefabricadas en regiones sísmicas**, Seminario de Diseño Sismorresistente de Estructuras de Hormigón Armado, Instituto Eduardo Torroja del Cemento y la Construcción, Madrid, España, noviembre 1989
12. Sauter, Franz (1988) - **Catastrophic risks of nature**, Proceedings VI.Third World Insurance Conference, Quito, Ecuador, junio 1988
13. Sauter, Franz (1987) - **The San Salvador earthquake of october 10, 1986: structural aspects of damage**, Earthquake Spectra, Vol.3, No.3, Earthquake Engineering Research Institute, El Cerrito, California, agosto 1987
14. Sauter, Franz (1985) - **El riesgo sísmico en la perspectiva del consultor**, Congreso de Ingeniería Civil, Colegio de Ingenieros Civiles, San José, Costa Rica, mayo 1985
15. Sauter, Franz (1984) - **Criterios de diseño sismorresistente para estructuras prefabricadas**, Memorias IV.Congreso Venezolano de Sismología e Ingeniería Sísmica, Barquisimeto, Venezuela, noviembre 1984
16. Sauter, Franz (1984) - **Earthquake resistant design criteria for precast concrete structures**, Proceedings VIII. World Conference on Earthquake Engineering, San Francisco, California, julio 1984.
17. Torroja, Eduardo - **Razón y ser de los tipos estructurales**, Artes Gráficas MAG S.L, Madrid.
18. Wakabayashi, Minoru y Martínez, Enrique (1988) - **Diseño de estructuras sismorresistentes**, McGraw-Hill Co., México D.F.

arch:fsf/conferencias/concepto.s1