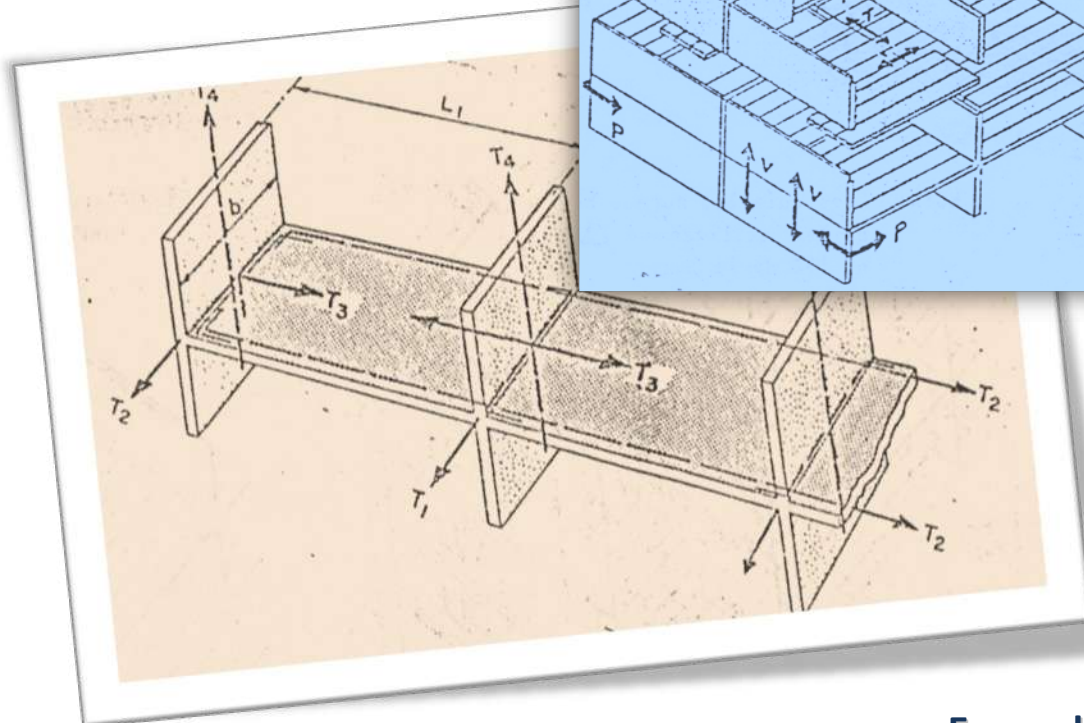
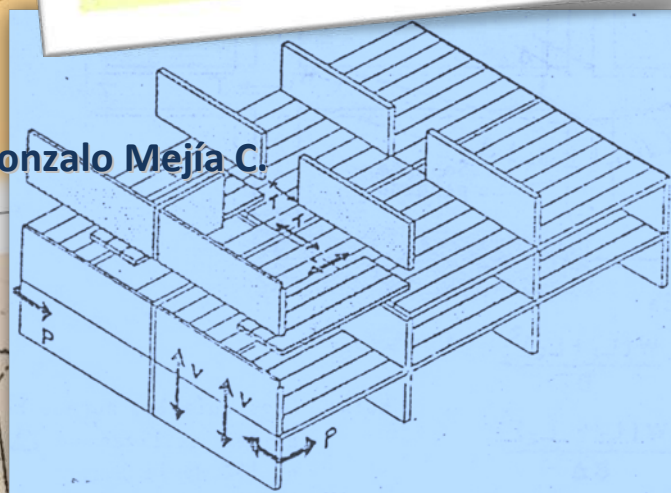


**APLICABILIDAD DE LAS RECOMENDACIONES PARA COLAPSO
PROGRESIVO EN ESTRUCTURAS PREFABRICADAS EN ZONAS
SISMICAS**

Ing. Luis Gonzalo Mejía C.



Enero de 1981

APLICABILIDAD DE LAS RECOMENDACIONES PARA COLAPSO PROGRESIVO EN ESTRUC- TURAS PREFABRICADAS EN ZONAS SISMICAS

Por: LUIS GONZALO MEJIA C.
Ingeniero Civil
Universidad Nacional - Universidad de Karlsruhe.

INTRODUCCION

El aumento constante de los costos de construcción, ha movido a ingenieros y arquitectos a buscar nuevos sistemas constructivos, que por sus características reduzcan el tiempo de construcción, pues debido a los altos costos financieros se pretende ante todo, economizar tiempo.

Muchos sistemas se han ensayado, algunos de los cuales requieren una alta tecnología como el del lift-slab.

La prefabricación completa de las placas de piso, ha acelerado el desarrollo del sistema de edificios con muros portantes, pues las uniones en éste son más simples que en el caso de placas prefabricadas apoyadas en columnas y vigas vaciadas en el sitio.

En general los muros y placas son macizas (estructuras de grandes paneles), sin embargo, se está incrementando últimamente el uso de muros portantes en mampostería reforzada.

El colapso del Ronan Point Apartment Building,^{1*} figura 1, llamó la atención, sobre la susceptibilidad de este tipo de construcciones a sufrir lo que se ha denominado colapso progresivo (CP).

El objeto de este artículo es discutir algunos puntos importantes sobre este tipo de falla y estudiar la aplicabilidad de los amarres propuestos para prevenirlo, como amarres sísmicos, de tal forma que provean este tipo de estructuras de la continuidad y ductilidad necesarios para un buen comportamiento bajo cargas sísmicas.

CARGAS ANORMALES Y COLAPSO PROGRESIVO

Se entiende por cargas anormales, aquellas cargas que por su baja probabilidad de ocurrencia, no son consideradas generalmente en los diseños. Entre

* Se refiere a la bibliografía al final del artículo.

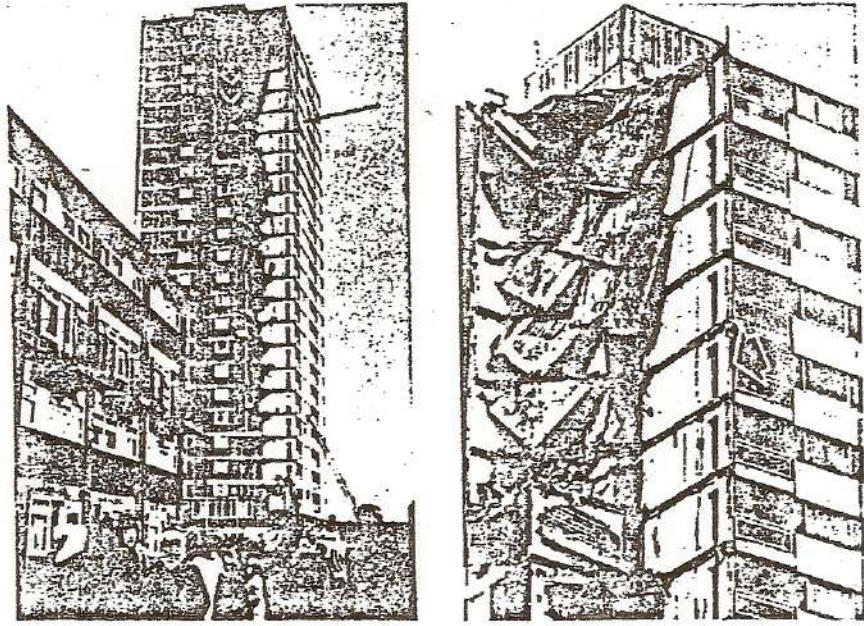


Fig. 1 Colapso del Ronan Point

estas se cuentan explosiones de gas, explosión de bombas, choque de vehículos con edificios, errores en diseño, construcción, falta de mantenimiento, etc.

Este tipo de cargas son las causantes del colapso progresivo, el cual se puede definir como "un fenómeno en el cual una falla local, causada por una carga anormal se expande y eventualmente resulta en el colapso de todo el edificio o de una parte desproporcionada de él".² En la figura 2, se muestra esquemáticamente el colapso progresivo del Ronan Point².

FILOSOFIA DEL DISEÑO CONTRA CP

El riesgo del colapso progresivo es mayor en estructuras de grandes paneles y de mampostería estructural, que en las estructuras tradicionales monolíticas, debido especialmente a la falta general de ductilidad y continuidad de la estructura, causados por los sistemas de unión.

En vista de esto, todas las recomendaciones para prevenir el colapso progresivo buscan obtener un determinado grado de continuidad a través de las uniones y de ductilidad en ellas.

Estos dos puntos, continuidad y ductilidad, coinciden a su vez, con dos de las premisas fundamentales de la filosofía antisísmica actual³. Por esto, consideramos que los resultados de las investigaciones contra el colapso progresivo, que tienden a buscar lo que se ha denominado como Integridad Estructural General (IEG) representan una ayuda muy valiosa en el diseño de las estructuras en mampostería reforzada o sobre muros de concreto macizo, pues la continuidad es fundamental para la redistribución de cargas y la ductilidad para la absorción de energía bajo cargas dinámicas.

Aunque en nuestro medio, poca o ninguna atención se le ha prestado al colapso progresivo, se describirán brevemente los principios que se deben utilizar para prevenirlo.

INTEGRIDAD ESTRUCTURAL GENERAL (IEG)

Según Fintel y Shultz,² cuando una estructura posee suficiente continuidad y ductilidad para "puentear" una falla local se dice que posee IEG.

Se busca por tanto, diseñar la estructura, del tal forma que se pueda asegurar una trayectoria

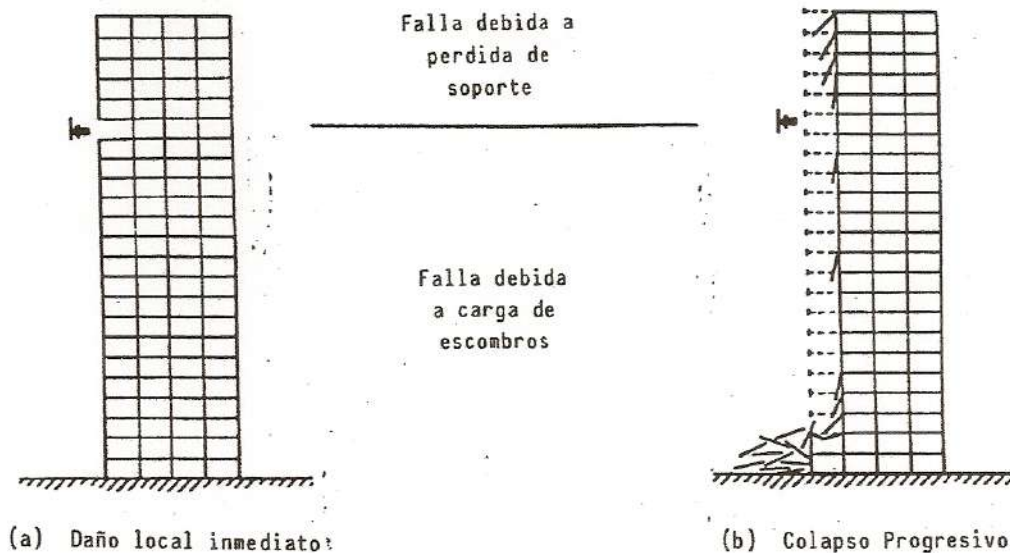


Fig. 2 Daños en Ronan Point

alterna para las cargas. Dicho de otra forma, la estructura debe mantener una configuración estable luego de un daño importante o pérdida de un apoyo. Las figuras 3a y 3b, tomadas de las referencias 8, 4, muestran esquemáticamente este concepto.

Para obtener la IEG, se plantean algunas diferencias entre la Escuela Americana y Europea, debidas principalmente a una disposición estructural diferente: en Europa se utilizan muros espaciados de 4,0 a 6,0 m, mientras que en América, éstos están de 7,0 a 12,0 m.

Por este motivo, algunas reservas de la estructura, como la acción de catenaria (que se verá más adelante), que exige tener en cuenta una luz igual

al doble de la luz existente, se vuelve imposible para la disposición Americana.

Por otro lado, en Europa se considera que la pared falla en su totalidad y hablan de considerarla "imaginariamente removida", mientras que en América, con paredes mucho mayores, se considera que solo parte de la pared es afectada y se habla por tanto de "pared inefectiva". Esta diferencia, aunque parece mínima, tiene gran importancia, cuando se consideran las cargas de escombros, pues en el primer caso es necesario considerarlas todas, mientras que en el segundo sólo en parte. Sin embargo, todos los investigadores, coinciden en que la integridad de la estructura depende de las características de las uniones y que la

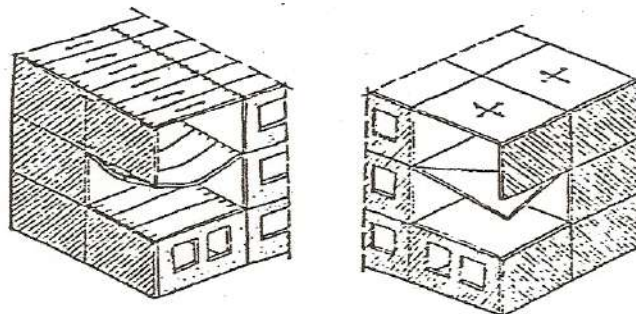


Fig. 3a Comportamiento de estructuras de grandes paneles y muros al fallar los muros cargueros y rigidizadores.

resistencia de los miembros no puede utilizarse, si la resistencia de las uniones es insuficiente.

Se busca por tanto, como se mencionó antes, por medio de amarres horizontales y verticales, proveer la estructura de un grado de continuidad a través del nudo y de ductilidad dentro de él.

"Por su naturaleza, en estas estructuras, se presentan en las uniones sólo fuerzas de compresión, tracción y cizalladura, pues no es necesario técnicamente ni económicamente desarrollar una

La presencia de este refuerzo, elimina por tanto, la posibilidad de fallas frágiles, las cuales pueden ocurrir cuando solo existe fricción para soportar las cargas.

FUNCION DE LOS AMARRES

La observación de las figuras 5 y 6 tomadas de las referencias 5 y 2,4 respectivamente, nos muestran

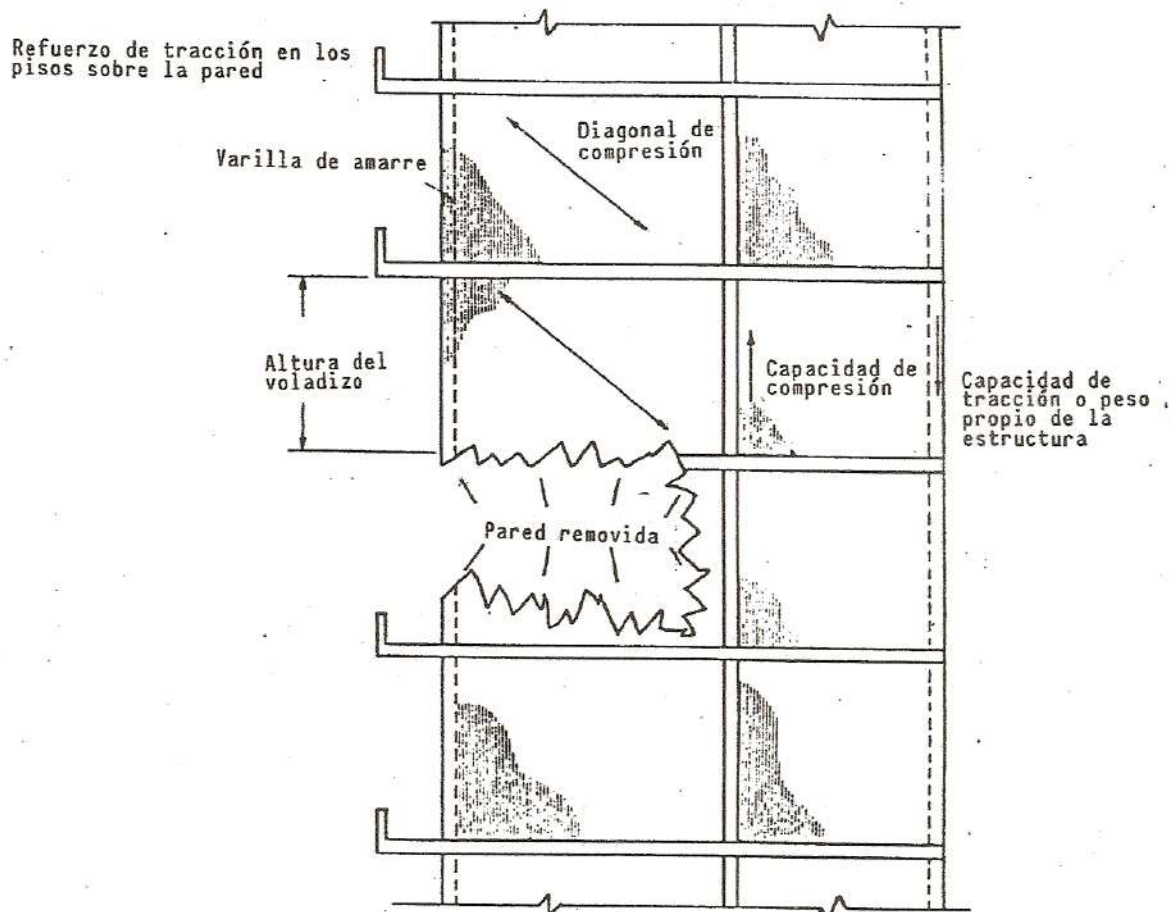


Fig. 3b Puenteo en estructuras sobre muros

continuidad de momentos de los elementos individuales. En general para cargas normales, las uniones poseen capacidad a compresión y cizalladura, pero la capacidad a tracción entre los diferentes elementos, es usualmente muy pequeña, siendo por tanto necesario proveer capacidad de tracción a través de las uniones horizontal y verticalmente. Esta capacidad se puede obtener por medio de cuatro tipos de amarres: transversal, longitudinal, vertical y periférico".² En la figura 4, se muestra esquemáticamente, la disposición de dichos amarres.²

las trayectorias de carga alternas y la función de los amarres:

- Los amarres transversales y verticales son indispensables para que pueda producirse una acción de voladizo o viga (Figuras 5a, 5b y 5c), mejorando además la resistencia a la cizalladura de las uniones horizontales, así como asegura una resistencia suficiente a la tracción y flexión de los mismos.

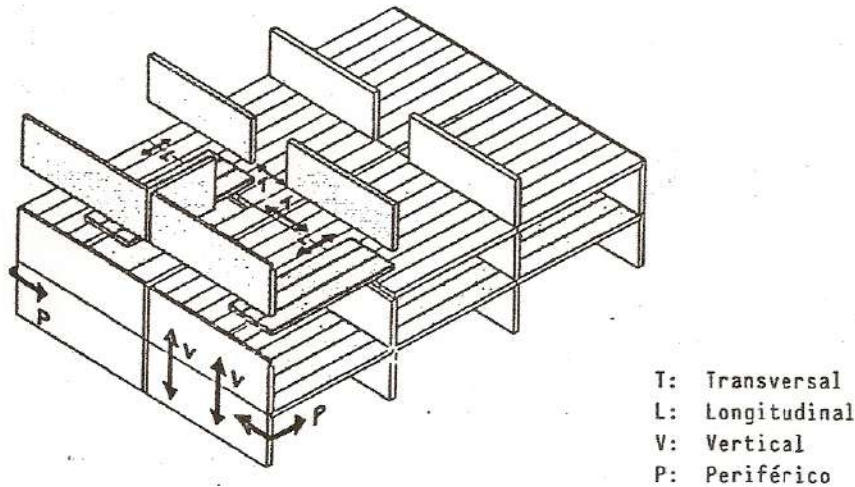


Fig. 4 Localización esquemática de los amarres de tracción de estructuras sobre muros

- Los amarres longitudinales (Figura 6), permiten una acción de catenaria manteniendo los diferentes paneles unidos, evitando la propagación de escombros. Mejoran apreciablemente la resistencia a la cizalladura de la placa misma, especialmente cuando se colocan como refuerzo ortogonal.
- El amarre perimetral es fundamental para anclar en él los amarres transversales y longitudinales y para permitir el trabajo de la placa como un diafragma rígido.

FUNCION DE LOS AMARRES, COMO AMARRES SISMICOS

El diseño de edificios para cargas sísmicas, difiere mucho del diseño convencional para fuerzas gravitacionales y de viento, debido principalmente a que: se desconoce la magnitud de las cargas, existe gran incertidumbre sobre el comportamiento de los materiales y el comportamiento de la estructura está determinado más en el rango de carga última que de cargas de servicio (La ley de superposición de fuerzas, esfuerzos y deformaciones, no es aplicable a estructuras plásticas). No se debe olvidar, además que en el diseño sismo-resistente no es suficiente que los miembros posean resistencia, sino que deban poseer una gran reserva de ductilidad.

Esta gran incertidumbre hace que las fuerzas sean indeterminadas, lo cual se suma al hecho, de que

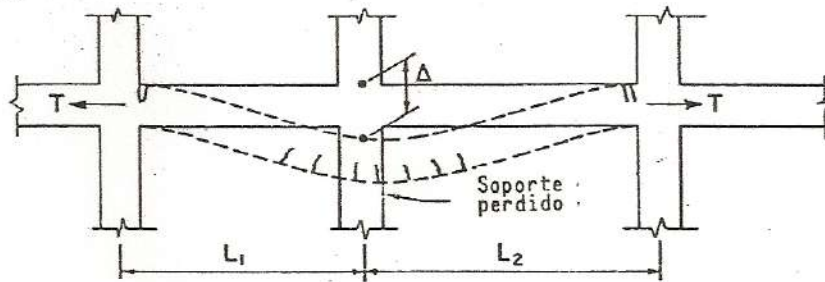
estas, son mucho mayores que las fuerzas de diseño.

Lo expuesto anteriormente, es expresado magistralmente por Degenkolb⁹, cuando dice: "Se debe recordar que las cifras exactas dadas por el computador, tienen solo poca relación con la realidad". Es necesario por tanto, fuera de cifras, tener un sentido común, capacidad de apreciación y conocimientos básicos, en el diseño antisísmico.

Por esto, los códigos modernos han variado su filosofía, "se han vuelto más realistas, al incluir algunos de estos requerimientos no especificados que son fundamentales para un buen comportamiento antisísmico, pero que fueron omitidos en códigos presentes y pasados. Muchos de nosotros creemos que esos requerimientos de diseño no mencionados tienen un mayor efecto en el comportamiento de un edificio durante un sismo importante, que el valor específico del coeficiente sísmico".⁹

Sin duda alguna, sentido común, ductilidad, y redundancia, constituyen los puntos principales en el diseño antisísmico.

La aplicación ciega de normas puede resultar en diseños curiosos como el descrito en la referencia 10, en el cual, según el mismo calculista, refiriéndose a las columnas, "nosotros creamos un sistema para facilitar la labor de los inspectores del refuerzo. Les dábamos un canario que deberían colocar en el fondo de la columna que se iba a vaciar. Si el canario se volaba, sabíamos que al contratista le había faltado algo de refuerzo".¹⁰



Acción de Catenaria

$$T \cdot \Delta = \frac{W(L_1 + L_2)^2}{8}$$

$$T = \frac{W(L_1 + L_2)^2}{8\Delta}$$

NOTA: Como guía las normas británicas exigen utilizar un Δ igual a un 15% de la luz.

Fig. 6a Determinación de los amarres asumiendo una acción de catenaria en dos direcciones.

Las medidas adoptadas para prevenir el colapso progresivo, y las medidas para lograr un buen comportamiento antisísmico buscan lo mismo: ductilidad y redundancia. Por esto el refuerzo adicional recomendado para el primer caso, es aplicable sin lugar a duda para el segundo. Breen⁴ anota "énfasis en ductilidad y continuidad, similar al usado para el diseño sísmico y de viento, es la técnica más útil para prevenir el colapso progresivo". Lógicamente la proposición inversa es absolutamente válida: énfasis en ductilidad y continuidad, similar al usado para colapso progresivo es la técnica más útil para asegurar un buen comportamiento antisísmico".

Estructuras diseñadas con estos requerimientos mínimos, poseen grandes reservas, tal como lo demuestran los ensayos de Reagan⁷, ver figura 7, quien estudió la acción de membrana que se producía en losas reforzadas en una dirección, y con refuerzo de distribución en la otra dirección, cuando se suprimía una columna interior.

Consideramos por lo tanto, que edificios de grandes paneles o de mampostería estructural con losas prefabricadas, deben diseñarse mínimo con este tipo de amarres, los cuales sin duda alguna, mejorarán su comportamiento bajo la acción de cargas dinámicas. No sobra recalcar, estos amarres deben considerarse como absolutamente mínimos, especialmente en zonas sísmicas.¹⁶

FUERZAS PARA DETERMINAR LOS AMARRES MINIMOS

Como se explicó antes, se consideran cuatro tipos de amarres: transversal, perimetral, longitudinal y vertical. En la figura 8, tomada de la referencia 6, se muestra esquemáticamente la posición de ellos.

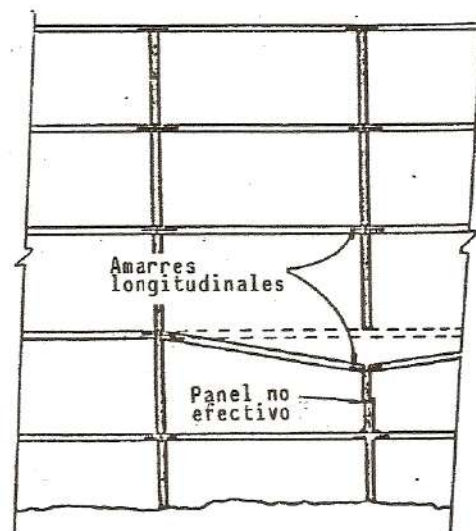


Fig. 6b Acción de membrana parcial de los elementos de piso, en la zona de pared inefectiva.

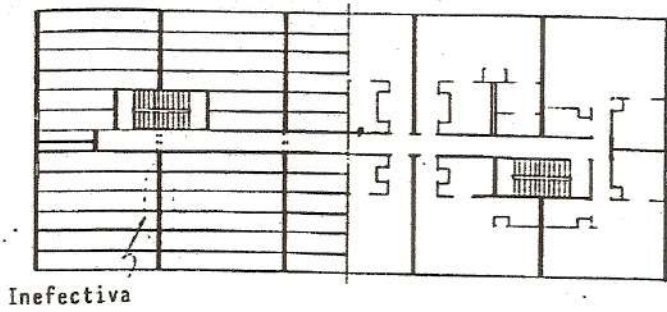


Fig. 5a Disposición

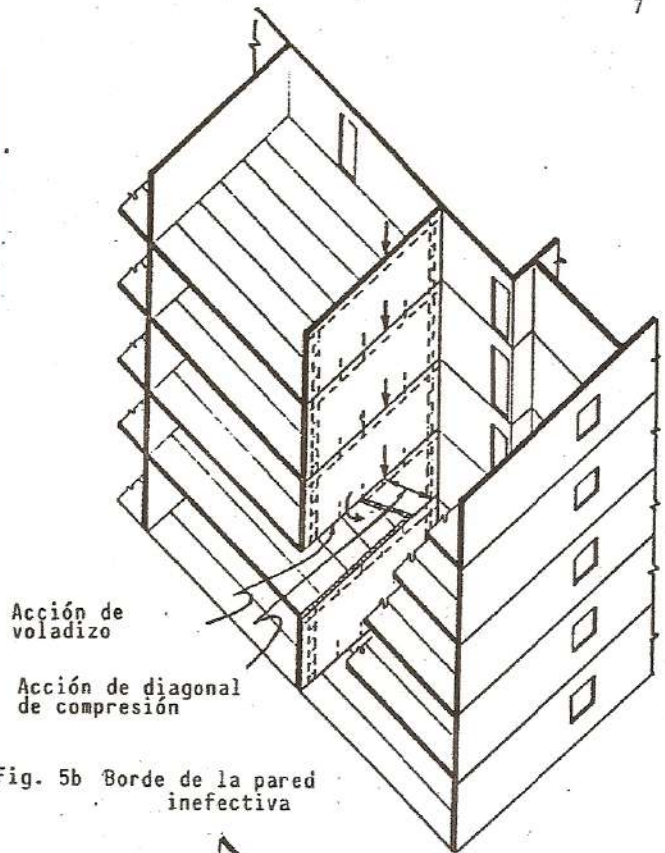


Fig. 5b Borde de la pared inefectiva

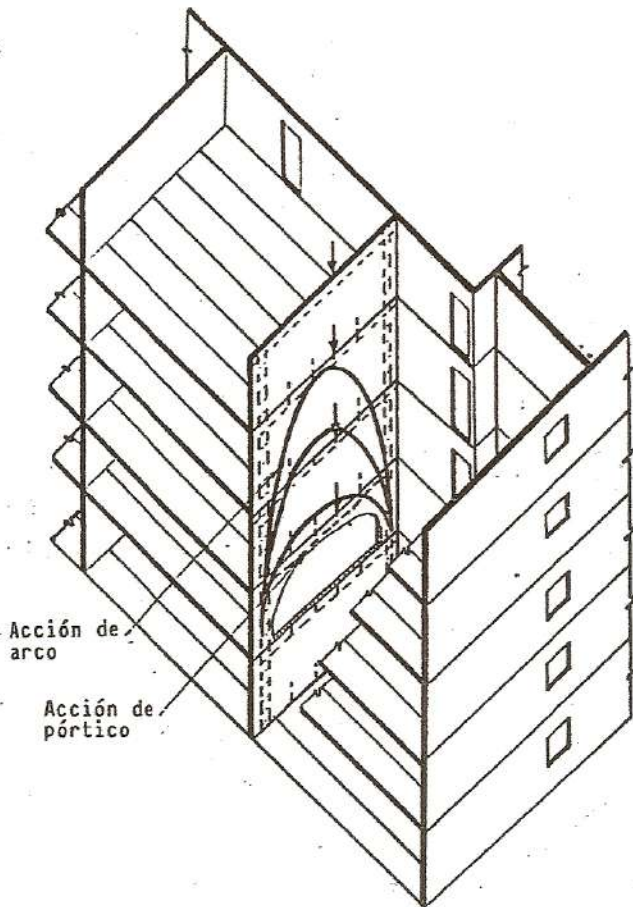


Fig. 5c Porción central de la pared inefectiva

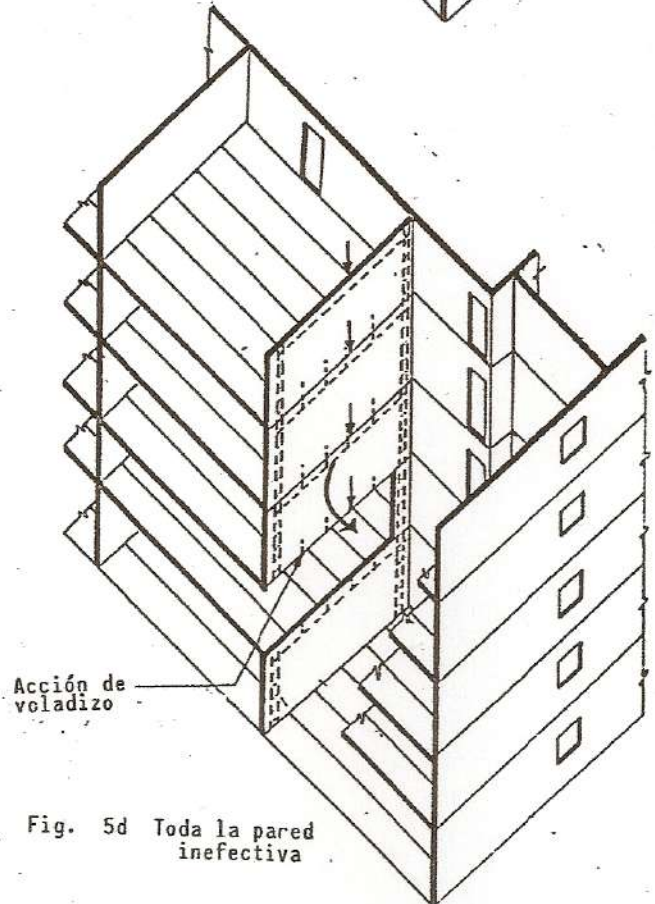


Fig. 5d Toda la pared inefectiva

Fig. 5 Mecanismos de resistencia en un edificio sobre muros

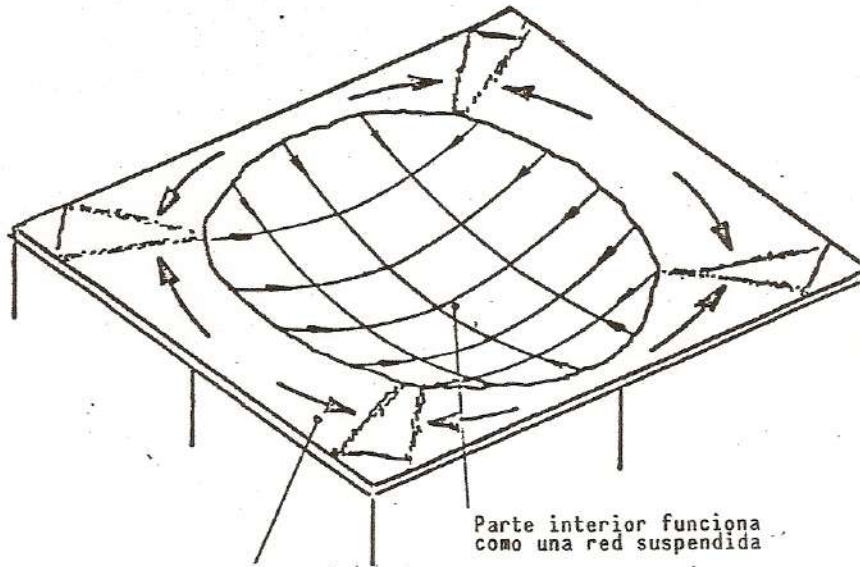


Fig. 7 Comportamiento de una placa al suprimir una columna interior.

Fig. 8 Representación esquemática de los amarres

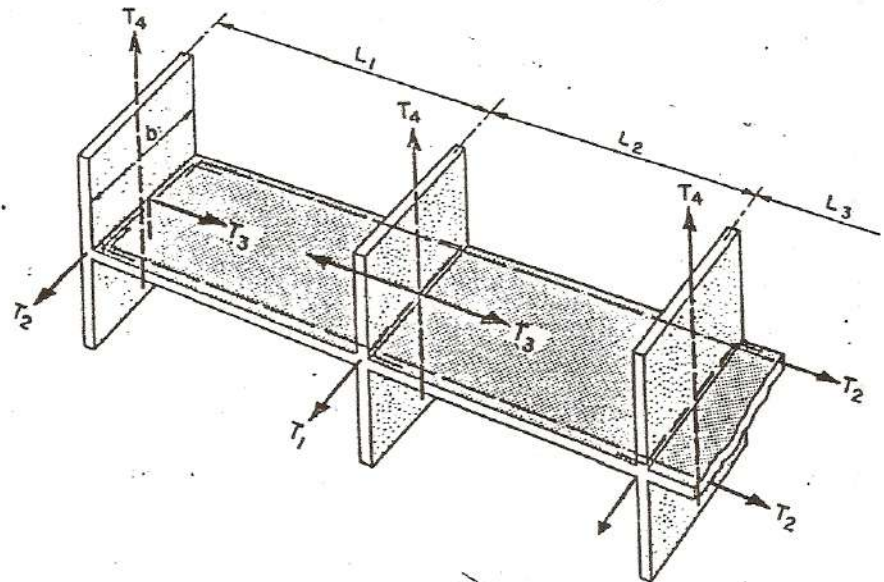
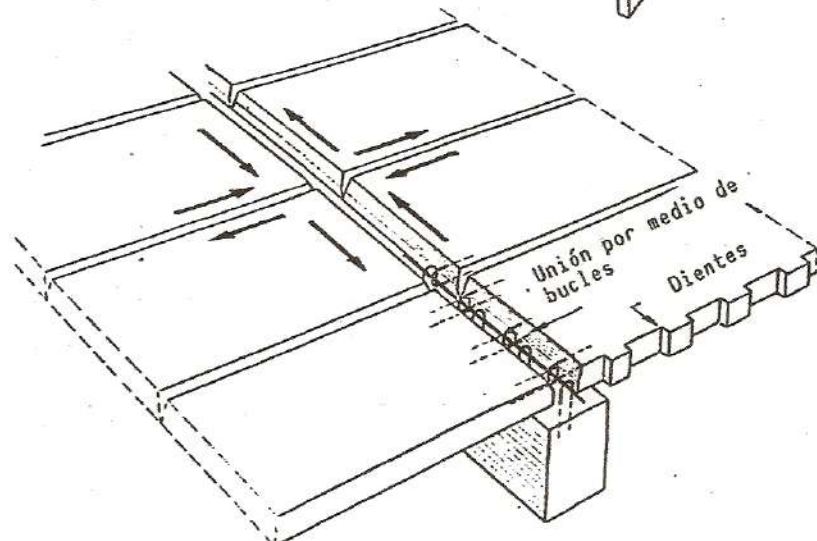


Fig. 9 Juego de fuerzas en un prefabricado



Las fuerzas para determinar los amarres varían en las diferentes normas. La tabla 1 (ligeramente modificada por nosotros para mejorar su comprensión) tomada de la referencia 11, nos muestra los valores recomendados por cuatro códigos distintos.

En estructuras en las cuales las losas están compuestas por piezas prefabricadas sin ningún recubrimiento estructural y de los cuales no sale ningún refuerzo, se debe dar especial cuidado al amarre general. Apoyar 3 ó 4 cm el prefabricado en el muro, no es suficiente (Figura 9b). La fricción estática no es confiable para transmitir

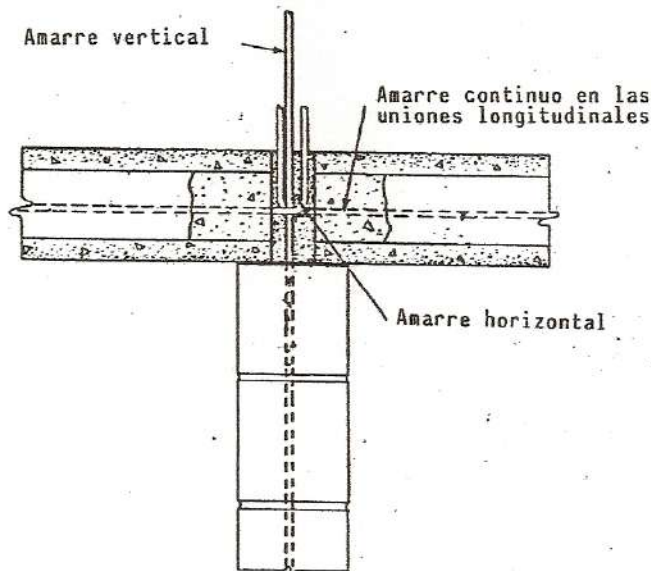


Fig. 10a Amarre entre las uniones longitudinales

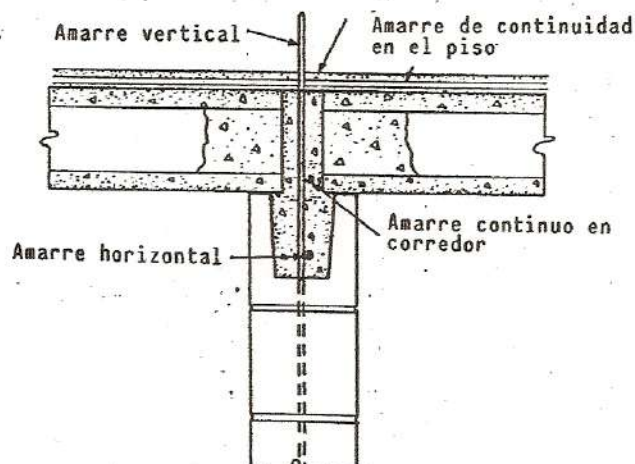


Fig. 10b Amarres en el recubrimiento estructural

Fig. 10 Continuidad entre los elementos de la placa

cargas sísmicas.¹² Por eso, y por lo expuesto en la referencia 13, es necesario que en este tipo de placas, se deje refuerzo saliente del prefabricado o se disponga en la junta entre prefabricados refuerzo suficiente y suficientemente anclado; siendo indispensable que la unión esté diseñada para absorber las fuerzas de diafragma que se presentan en ella.

En la figura 10, se ven dos detalles recomendados para el caso en que exista un recubrimiento estructural y cuando no exista. Vale la pena mencionar por último que el comportamiento de estructuras prefabricadas en zonas sísmicas, ha sido muy satisfactorio, como se desprende de reportes de sismos recientes.¹⁴ Especial cuidado en las uniones es fundamental.¹⁹

RECOMENDACIONES MINIMAS

Perimetralmente se debe vaciar una viga del ancho del muro y del espesor de la placa, con 4 $\emptyset \frac{1}{2}$ ", continuas, traslapo 50 cm, en lo posible alternado y estribos $\emptyset \frac{1}{4}$ " a 20 cm en toda la longitud. Sobre los muros interiores este refuerzo podría eventualmente disminuirse, recomendamos sin embargo que se disponga igual que en los muros exteriores.

En dirección de la luz, se debe dejar que el refuerzo del prefabricado salga de él y anclarlo suficientemente en la viga transversal o alternativamente si existe un recubrimiento estructural, y no se deja refuerzo saliente, colocar en él, para luces hasta 4,0 m, varillas de $\emptyset \frac{1}{2}$ " a 0,50 m y $L = 1,5$ a 2,0 m centradas. En los muros exteriores tendrán $L = 1,0$ m y se anclarán debidamente en la viga perimetral. Sin este refuerzo, el trabajo de la placa como diafragma rígido es muy improbable y por tanto inseguro, bajo la acción de cargas sísmicas.¹⁷

En los muros paralelos a la luz (rigidizadores), ya sea que el prefabricado se apoye o no en ellos y en las uniones entre prefabricados se deben colocar también amarres, los cuales se pueden determinar por la teoría de la cizalladura por fricción,¹⁸ pues la fricción estática no es suficiente.

El refuerzo vertical en muros, lo dará el diseño estructural, siendo los valores de la tabla 1, mínimos absolutos.

T A B L A 1 (Ref. 11)

	DIN 1045	CP 110	PCI	CIB-W23A
T 2 Perimetral	5,3	Ft *	7,3 pero mayor que fuerza de diafragma	4,0 t, pared exterior 15,0 t
T 1 Transversal	2,6 t en cada unión	$Ft \frac{(gD + PD)}{750} \cdot \frac{1}{5}$ en (t/m) y gD, PD en (kg/m)	2,2 (t/m)	Sobre muros cargue- ros 15 (t) y empo- trado en la pared Paralelo a la Luz 3 (t/m)
T 3 Longitudinal y amarre en la pared exterior	1,2 (t/m)	El valor mayor de: a) 2Ft (t/m) $\left(\frac{l_0}{2,5} \right) FT$ b) 3% de la carga vertical del elemento en el nivel conside- rado.	** 2,5% de la carga de servicio del elemento o 2,2 (t/m) Espaciamiento del refuerzo $\leq 2,4 \text{ m}$	3,0 (t/m)
T 4 Vertical	—	Para edificaciones con más de 5 pisos $As = 0,4\%$ del área de la pared	Para edificaciones de más de 2 pisos 4,5 (t/m)	—

** Para las estructuras utilizadas en nuestro medio no controla este requerimiento.

* $Ft \geq 2 + 0,4 n$ n: número de pisos
 $< 6,0 \text{ t}$

NOTA: El refuerzo mínimo 0,004 exigido por el CP 110 (normas británicas) parece muy alto. Como punto de comparación damos las cuantías mínimas según otros códigos:

U B C requiere mínimo 0,002 del área de la pared, colocado ortogonalmente y de ninguna forma menos de 1/3 en cada dirección.

El California Administrative Code requiere un área total de 0,003.

Las normas mexicanas exigen una cuantía mínima de 0,002, pero ninguna de las dos cuantías (horizontal y vertical) puede ser menor que 0,0007.

CONCLUSIONES

Se recomienda usar amarres horizontales y verticales, para lograr un trabajo de conjunto en edificios prefabricados y proveerlos a su vez de redundancia y ductilidad, fundamentales para un buen comportamiento bajo cargas sísmicas. Estos amarres deben considerarse como mínimos, debiendo aumentarse si las circunstancias lo exigen.

Dada la incertidumbre inherente al fenómeno sísmico, se resalta la importancia de proyectar y diseñar la estructura con sentido común, observando siempre las buenas reglas de la ingeniería. Puesto que sin duda en un futuro próximo se estarán utilizando en nuestro medio las placas planas (Flat - Slabs), es necesario profundizar en el estudio de colapso progresivo, pues este tipo de placas son susceptibles de padecerlo.¹⁵

.....

Sugerencias y observaciones serán gratamente apreciadas.

Pueden dirigirse a:
Luis Gonzalo Mejía C.
Carrera 70A 51-31
Medellín - Colombia

BIBLIOGRAFIA

1. Leyendecker, E. V., Breen, J. F., Somes, N. F. and Swatta, M. Abnormal Loading on Building and progressive Collapse. NBS, Building Sciences Series N°. 67, May 1975.
2. Fintel, Mark and Donald M. Schultz. "Structural Integrity of Large Panel Buildings". ACI Journal, v.76, N°.5, pp.583-620, May 1979.
3. Freeman, Sigmund A. "Seismic Design Criteria for Multistory Precast Prestressed Buildings". PCI Journal, v.24, N°.3, pp.62-68. May-Jun 1979.
4. Breen, John E. "Developing Structural Integrity in Bearing Wall Buildings". PCI Journal, v.25, N°.1, pp.42-73. Jan-Feb 1980.
5. Fintel, Mark and G. Annamalai. "Philosophy of Structural Integrity of Multistory Load-bearing Concrete Masonry Structures". Concrete International, v.1, N°.5. pp.27-35. May 1979.
6. Speyer, Irwin J. "Considerations for the Design of Precast Concrete Bearing Wall Buildings to Withstand Abnormal Loads". PCI Journal, v.21, N°.2, pp.18-51. Mar-Abr 1976.
7. Reagan, P.E. Catenary Action in Damaged Concrete Structures. en: Industrialization in Concrete Building Construction. 1975. 229p. (ACI Publication SP-48).
8. Manleitner S. "Richtlinien und Bestimmungen der neuen DIN 1045 für Großtafelbauten". Betonwerk + Fertigteiltechnik. Hef 1, 1973.
- 9a. Degenkolb, Henry J. Earthquake engineering-Design Philosophy and Codes. 1970. 56p.
- 9b. Müller, F. P. Husq. "Erdbebensicherung von Bauwerken". Seminar U. Karlsruhe 1974.
10. Mast, Robert. "Seismic Design of 24-Story Building with Precast Elements". PCI Journal, v.17, N°.4. Jul-Aug 1972.
11. Melhorn, G. Schwing H. "Tragverhalten von aus Fertigteilen Zusammengesetzten Scheiben". Innenministerium des Landes Nordrhein Westfalen.
12. Prestressed Concrete Institute. PCI Design Handbook, Precast Prestressed Concrete. 2ed. 1978. p.v.
13. Mejía C., Luis Gonzalo. Algunos aspectos importantes en el diseño de estructuras prefabricadas. Medellín, ICPC-Camacol, 1979. 54p.
14. Fintel Mark. "Performance of Precast Concrete Structures During Rumanian Earthquake of March 4, 1977". PCI Journal, v.22, N°.2, pp.10-15. Mar-Abr 1977.
15. Hawkins, Neil and Mitchell Denis. "Progressive Collapse of Flat Plate Structures". ACI Journal, v.76, N°.7. Jul 1979.

16. Popoff, Alexander. "Connections and Integration of components in precast Bearing Wall Buildings". PCI Journal, v.21, Nº.4, pp.38-43. Jul-Aug 1976.
17. "CEB-Empfehlungen für Großtafelbauten". Beton Und Stahlbetonbau 6 1968.
18. American Concrete Institute. Building Code Requirements for Reinforced Concrete ACI 318-77. 1977. 102p.
19. Müller, Keintzel. "Erdbebensicherung von Hochbauten". Verlag. W. Ernst&Sohn Berlin.