

COMPORTAMIENTO Y DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO

LOSAS Y SISMOS

Sergio M. Alcocer
Centro Nacional de Prevención de Desastres e
Instituto de Ingeniería

1. INTRODUCCION

En este capítulo se tratará el comportamiento de losas coladas en sitio en edificios sometidos a acciones inducidas por sismo. El comportamiento ante carga gravitacional se puede consultar en libros de texto de losas de concreto reforzado.

Se distinguen dos tipos de losas (Fig. 1). Las losas planas son aquellas que transmiten las cargas directamente a las columnas, sin la ayuda de vigas (Fig. 1a). Pueden ser macizas, o aligeradas por algún medio (bloques de material ligero, alvéolos formados por moldes removibles, etc.). Según la magnitud de la carga por transmitir, la losa puede apoyar directamente sobre las columnas o a través de ábacos, capiteles o una combinación de ambos.

A las losas que apoyan en vigas en los cuatro lados del tablero se les denomina losas en dos direcciones (Fig. 1b). Este es el caso de sistemas de piso compuestos por trabes primarias y vigas secundarias. Si la separación de las últimas es de 1 m, la losa trabaja en una dirección; a estas losas se les conoce como losas en una dirección. En este capítulo trataremos exclusivamente a las losas planas que son las que presentan problemas especiales cuando forman parte de estructuras sometidas a sismos.

2. RESISTENCIA AL CORTANTE EN LOSAS PLANAS

El cortante puede ser crítico en losas sobre las que se aplican cargas concentradas. Este es el caso de la transferencia de fuerzas de la losa a columnas en losas planas (con o sin capiteles o ábacos), de columnas a zapatas, o cuando las cargas son rodantes. En muchos casos los esfuerzos por corte controlan el diseño. Este es el caso particular en losas planas para las que la dimensiones de la columna (o capitel) y el espesor de la losa dependen de la magnitud de la fuerza cortante por ser transmitida. En esta discusión se supondrá que la distribución de esfuerzos cortantes alrededor de la columna es uniforme.

La resistencia está controlada por una de las dos condiciones siguientes:

1. Acción de viga.
2. Acción en dos direcciones o punzonamiento.

2.1 Acción de Viga

En la acción de viga, la losa falla como una viga ancha con una sección crítica de corte que se extiende a todo el ancho de la losa. La revisión de la resistencia se hace con las expresiones de diseño para vigas. Puesto que la resistencia al corte en vigas fue discutida anteriormente no se hace mayor énfasis en este capítulo.

2.2 Acción en Dos Direcciones

En las fallas por punzonamiento, la losa falla en torno a la carga o reacción concentrada. La sección crítica se extiende alrededor de la carga concentrada o de la columna (o capitel). La falla ocurre describiendo un cono truncado o pirámide (Fig. 2) formados por la grieta crítica a tensión diagonal alrededor de la carga concentrada o del apoyo.

Es importante notar que la sección crítica supuesta por los reglamentos, entre ellos las Normas Técnicas Complementarias de Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto (NTC-Concreto), está localizada a una distancia $d/2$ del perímetro de la columna, donde d es el peralte efectivo de la losa (Fig. 3b). La falla no ocurre como se ilustra en la Fig. 3a.

Una falla por punzonamiento puede traer consecuencias desastrosas, como se ha observado en edificios en construcción. La falla por cortante de una conexión losa-columna puede causar el colapso progresivo de una parte o del total de la estructura. Es clara, entonces, la necesidad de tomar precauciones para evitar una falla frágil de este tipo.

2.3 Mecanismo de Falla por Punzonamiento en Losas Planas

La primera grieta que se forma en la losa es, de manera simplista, circular y tangencial al perímetro del área cargada. Este fisuramiento es causado por los momentos flexionantes negativos que parten del apoyo en sentido radial. Se requiere de un incremento sustancial de carga para producir un agrietamiento que esté separado del apoyo. Cuando esto sucede, el cortante es resistido por la combinación de tres mecanismos: trabazón del agregado, acción de dovela, y la fuerza cortante que se transmite en la zona a compresión (cara inferior de la losa). La resistencia al corte por punzonamiento en losas es superior a la de vigas debido a la naturaleza tridimensional del mecanismo de falla. El mecanismo es tal que se producen fuerzas de compresión en el plano de la losa que contribuyen a incrementar las capacidades a flexión y corte, aunque disminuya la ductilidad.

En losas con bajas cuantías de refuerzo a flexión, el acero fluye formando líneas de fluencia. Una línea de fluencia se puede definir de manera simple como una articulación plástica a lo ancho del elemento. En estos casos es posible que ocurra una falla secundaria por punzonamiento. Cuando la cuantía es alta, puede presentarse una falla por punzonamiento acompañada por la fluencia o no del refuerzo que pasa por la columna.

Las variables que afectan la resistencia al corte por punzonamiento son:

1. La cantidad $\sqrt{f'_c}$. Esto es porque la resistencia a tensión del concreto es proporcional a $\sqrt{f'_c}$ y las fallas por corte están controladas principalmente por la resistencia a tensión del concreto.
2. La razón entre la longitud del lado del área cargada al peralte efectivo de la losa. Para un peralte efectivo dado, a mayor área cargada, mayor es la longitud de la sección crítica de manera que la resistencia aumenta. Esta variable explica el uso de capiteles y ábacos.
3. El cociente entre las longitudes de los lados de la zona cargada. Mientras más oblonga es ésta, la resistencia se reduce. Este efecto refleja el predominio de la flexión en una dirección, y el que la distribución de los esfuerzos alrededor de la columna no sea uniforme.
4. El agregado del concreto. Para una misma resistencia del concreto a la compresión, los concretos de peso normal tienen resistencias a la tensión mayores que los ligeros.

Es importante destacar que la resistencia al punzonamiento es independiente del índice de refuerzo ρf_y , donde ρ es la cuantía del refuerzo a tensión de la losa y f_y es el límite de fluencia del acero. Sin embargo, es recomendable concentrar el refuerzo de tensión en la franja de columna para mejorar el comportamiento a flexión ante cargas de servicio. Para evitar fallas progresivas es conveniente la colocación de acero en el lecho inferior que sea continuo a través de la columna. En caso de punzonamiento, estas varillas funcionarían como una red que

detendrá la losa sobre la columna. Es necesario destacar que el refuerzo superior no contribuye a la resistencia una vez alcanzada la falla porque tiende a desprenderse de la losa después del desconchamiento del recubrimiento.

3. RESISTENCIA AL CORTANTE DE UNIONES LOSA-COLUMNA QUE TRANSMITEN CORTANTE Y MOMENTO DE DESEQUILIBRIO

3.1 Comportamiento de Uniones Losa-Columna que Transmiten Cortante y Momento de Desequilibrio

En este caso el término momento de desequilibrio se refiere cuando la carga vertical no está uniformemente distribuida sobre la losa y/o cuando se aplican cargas laterales. En ambos casos la unión losa-columna debe transmitir momento flexionante y fuerza cortante.

La transmisión de un momento de desequilibrio en la unión losa-columna causa que la distribución de esfuerzos de corte en la losa alrededor de la columna no sea uniforme y reduce la resistencia al cortante de la junta. La fuerza cortante y el momento de desequilibrio se resisten por la combinación de flexión, torsión y cortante en las secciones críticas en la losa alrededor de la columna.

Si se alcanzara la resistencia al cortante, la losa fallaría por tensión diagonal en el lado de la columna donde el esfuerzo cortante vertical es máximo, lo que resultaría en el punzonamiento de la columna en la losa y en el desprendimiento del recubrimiento por el refuerzo en el lecho superior de la losa (Fig. 4). En la Fig. 4a se muestra una conexión losa-columna en un marco de carga después de la falla por corte debido a la transmisión de cortante y momento de desequilibrio. En la Fig. 4b se presenta un acercamiento de la región de falla de la losa una vez retirado el concreto fracturado.

Durante un sismo, las conexiones losa-columna pueden estar sujetas a momentos de desequilibrio alternados que pueden conducir a la falla en la losa alrededor de la columna debido a la degradación cíclica de la resistencia al cortante. Es necesario, entonces, colocar refuerzo por cortante para mejorar la ductilidad. Es importante destacar que no deben construirse estructuras a base de losas planas si se espera que éstas formen parte del sistema resistente a cargas laterales. Por tanto, este sistema se debe usar con marco rígidos o muros estructurales que eviten desplazamientos horizontales excesivos. Aun en estos casos se deberán detallar las uniones para que exhiban un comportamiento dúctil.

3.2 Método de Análisis y Diseño Basado en una Variación Lineal de Esfuerzos Cortantes

Este es el método en el cual están basados los requisitos de diseño de las NTC-Concreto. Se supone que los esfuerzos cortantes en el perímetro crítico varían linealmente con la distancia del eje centroidal del perímetro; estos esfuerzos son causados por una fuerza cortante y parte del momento de desequilibrio. El resto de este momento se resiste por flexión de la losa. Aunque este método es de carácter semiempírico sus resultados proporcionan estimaciones conservadoras de la resistencia medida. El método es válido para losas sin refuerzo especial por corte.

Sea V_u y M_u la fuerza cortante última y momento de desequilibrio último obrando con respecto del eje centroidal de la sección de la columna, respectivamente. La sección crítica se localiza a $d/2$ del perímetro de la columna; en general, el perímetro crítico será el mínimo pero separado no menos de $d/2$ del perímetro del apoyo (incluye capitel, si existe). Del momento de desequilibrio M_u , se supone que la fracción αM_u se transmite por la excentricidad del cortante con respecto del centroide de la sección crítica de la losa, y que $(1-\alpha)M_u$ se transfiere por

flexión de la losa donde

$$\alpha = 1 - \frac{1}{1 + 0.67 \sqrt{(c_1 + d) / (c_2 + d)}}$$

donde c_1 es el tamaño de la columna rectangular o equivalente o del capitel medido en la dirección del momento;

c_2 es el tamaño de la columna rectangular o equivalente o del capitel medido en la dirección transversal al momento.

La porción del momento de desequilibrio transmitido por flexión de la losa $(1-\alpha)M_u$, se debe resistir en un ancho efectivo de losa igual a c_2+3h , donde h es el espesor de la losa (incluyendo ábaco, si existe). Por tanto, puede ser necesaria la colocación de acero en ese ancho de losa para resistir el momento.

Se supone que la fracción del momento de desequilibrio transmitido por corte y el cortante último producen esfuerzos de corte que varían linealmente alrededor de la sección crítica. Se alcanza la resistencia nominal de la conexión al corte cuando el esfuerzo máximo por corte en la sección crítica iguala a (en kg y cm²)

$$(0.5 + \gamma) \sqrt{F_c} \leq \sqrt{F_c}$$

donde γ es la relación del lado corto al lado largo del área donde actúa la carga o reacción. En la Fig. 5 se muestran varios casos de conexiones con sus respectivas secciones críticas supuestas y variación de esfuerzos: a) uniones interiores, b) conexiones de orilla, c) juntas de esquina.

Para incrementar la capacidad a flexión de la losa se pueden ahogar vigas reforzadas transversalmente por estribos. El mejoramiento en la capacidad de flexión se debe al aumento en resistencia a la fuerza cortante y a la torsión que proporcionan las vigas. El refuerzo transversal de las vigas ahogadas se calcula con expresiones para vigas simples.

3.3 Ductilidad de Conexiones Losa-Columna

Si la conexión losa-columna no posee refuerzo por corte bien diseñado y detallado, su falla será frágil. Se debe tener especial cuidado en estructuras localizadas en zonas sísmicas. Ensayes de laboratorio (Fig. 6) han indicado que el uso de estribos cerrados en la losa alrededor de las varillas que pasan por la columna mejoran notablemente la capacidad de deformación de la conexión cuando se somete a deformaciones inelásticas. Esta solución ha mostrado ser superior al empleo de viguetas de acero ahogadas en la losa. El comportamiento exitoso con estribos se atribuye a que mantienen los lechos superior e inferior de las varillas de la losa cerca de la columna. Este fenómeno evita que las barras superiores se desprendan de la losa y que ella sea penetrada por la columna. En la Fig. 6c se muestra que el daño se concentró en los lados de la columna debido a momentos torsionantes. Es importante notar que aunque el refuerzo por corte mantiene la ductilidad del sistema, la rigidez de la conexión disminuye drásticamente por el agrietamiento por tensión diagonal. Por tanto, la conexión no contribuirá significativamente a disipar energía durante un sismo. Los colapsos de este tipo de estructuras durante los sismos de México de 1985 confirman la aseveración anterior.

4. DISEÑO DE LOSAS PLANAS SEGUN NTC-CONCRETO

Los requisitos de diseño de losas planas según las NTC-Concreto se basan en el método discutido en la sección anterior. Las NTC-Concreto prohíben que las columnas de orilla sobresalgan de la losa. Esto se debe a que la dimensión de la sección crítica disminuye considerablemente lo que hace más vulnerable a este tipo de conexión a una falla por corte.

En losas aligeradas, se requiere la colocación de una zona maciza alrededor de la columna o capitel para incrementar el perímetro de la sección crítica por punzonamiento y lograr así un aumento en la resistencia. Con objeto de favorecer el trabajo de marco ante cargas laterales, se señalan anchos mínimos de nervaduras localizadas en ejes de columna.

Las NTC-Concreto permiten el uso de losas planas en edificios sometidos a acciones sísmicas. Cuando el edificio es bajo o se emplean muros estructurales se puede emplear un factor de comportamiento sísmico $Q=3$. En otros casos, $Q=2$. En estos diseños se requiere que las columnas tengan detalles dúctiles (estribos cerrados con baja separación, traslapes lejos de zonas con posibilidad de incurrir en deformaciones inelásticas, etc).

Las NTC-Concreto señalan cantidades mínimas de refuerzo que deben colocarse en la franja c_1+3h y a través de la columna (lecho inferior). Lo anterior es para garantizar una adecuada transferencia del momento de desequilibrio por flexión y para prevenir el colapso progresivo en caso de falla por punzonamiento.

Finalmente, se permite el uso de refuerzo por corte en las losas en forma de vigas ahogadas y se dan reglas para calcular la separación máxima de los estribos de las vigas.

5. EJEMPLO DE UN COLAPSO DE UN EDIFICIO CON LOSAS PLANAS

En esta sección se presenta como ejemplo las características del colapso de un edificio con losas planas que falló durante la construcción. La meta es destacar la importancia que tiene la supervisión durante la construcción para garantizar un comportamiento adecuado del edificio.

5.1 Descripción de la Estructura

El edificio tenía cinco pisos destinados a uso habitacional. El sistema de piso estaba hecho con losas planas coladas en sitio. En las Figs. 7 y 8 se presentan los detalles de la planta del edificio. Las columnas tenían secciones de 25 x 45 cm excepto en los ejes A y K en donde eran de 25 x 30 cm, y en los extremos de las escaleras en donde eran de 20 x 30 cm. El espesor de la losa era de 20 cm. El espesor de la losa de los balcones en el lado Oeste varió de 18 cm en la columna a 16.5 en la punta. El espesor de la losa (medido de los planos) en el corredor era de 19 cm. El núcleo de elevadores estaba desligado del edificio. La altura de entrepiso era de 2.6 m. En la cimentación, las columnas estaban apoyadas en dados con entre dos y nueve pilotes. Los dados estaban ligados por zapatas continuas.

El refuerzo de las losas y columnas era Grado 400 (se refiere a $f_y = 400 \text{ MPa} = 4,200 \text{ kg/cm}^2$). En las Figs. 7 y 8 se muestran los armados de los lechos superior e inferior respectivamente. La resistencia de diseño a la compresión del concreto era igual a 280 kg/cm^2 .

El costo estimado del proyecto era de 5.5 millones de dólares americanos.

5.2 Colapso

El edificio falló el 27 de marzo de 1981. El colapso ocurrió durante la colocación de concreto en la losa de azotea. Once obreros fallecieron y 23 resultaron heridos.

5.3 Dictámenes

Varias firmas de ingeniería fueron contratadas por las diferentes partes para revisar el diseño estructural y los procedimientos constructivos. Una de ellas señaló que en la memoria de cálculo no existía evidencia de que se hubieran revisado los estados límite de punzonamiento, esbeltez en columnas y flechas en losas. Otra empresa comentó que la falla por punzonamiento fue la causa del colapso total. Su razonamiento se basó en cálculos que indicaban que bajo las cargas muertas de servicio se excedía la capacidad por corte en dos columnas. Considerando la carga viva más la muerta, se encontró que todas las conexiones losa-columna fallarían por punzonamiento.

El National Bureau of Standards, NBS, (Oficina Nacional de Normas) de los Estados Unidos determinó que fueron dos las causas de la deficiente resistencia al punzonamiento de las losas:

1. Error de diseño ya que no se revisó el estado límite de punzonamiento.
2. Error de construcción, puesto que se emplearon silletas muy altas (en lugar de 3/4 pulg se emplearon 1-3/4 pulg).

Un análisis detallado del edificio confirmó las observaciones hechas por NBS.

Supongamos que el error en diseño no hubiese existido pero que el de construcción sí. El uso de silletas más altas aumentaría el recubrimiento del lecho inferior, lo que se traduciría en la disminución del peralte efectivo de la losa. Como se indicó en la sección 2, la resistencia al punzonamiento depende del peralte efectivo. Por tanto, para este caso, el error en la construcción conduciría a una reducción de la capacidad a corte de 15%.

6. BIBLIOGRAFIA

1. Departamento del Distrito Federal, "Normas técnicas complementarias para diseño y construcción de estructuras de concreto," Gaceta Oficial del Departamento del D.F., 26 de noviembre de 1987, 73 pp.
2. Jirsa, J.O., "Reinforced concrete structures," notas de clase, Universidad de Texas en Austin, 1987.
3. Park, R., y Gamble, W.L., "Reinforced concrete slabs," John Wiley & Sons, Nueva York, 1a. ed., 1980, 618 pp.

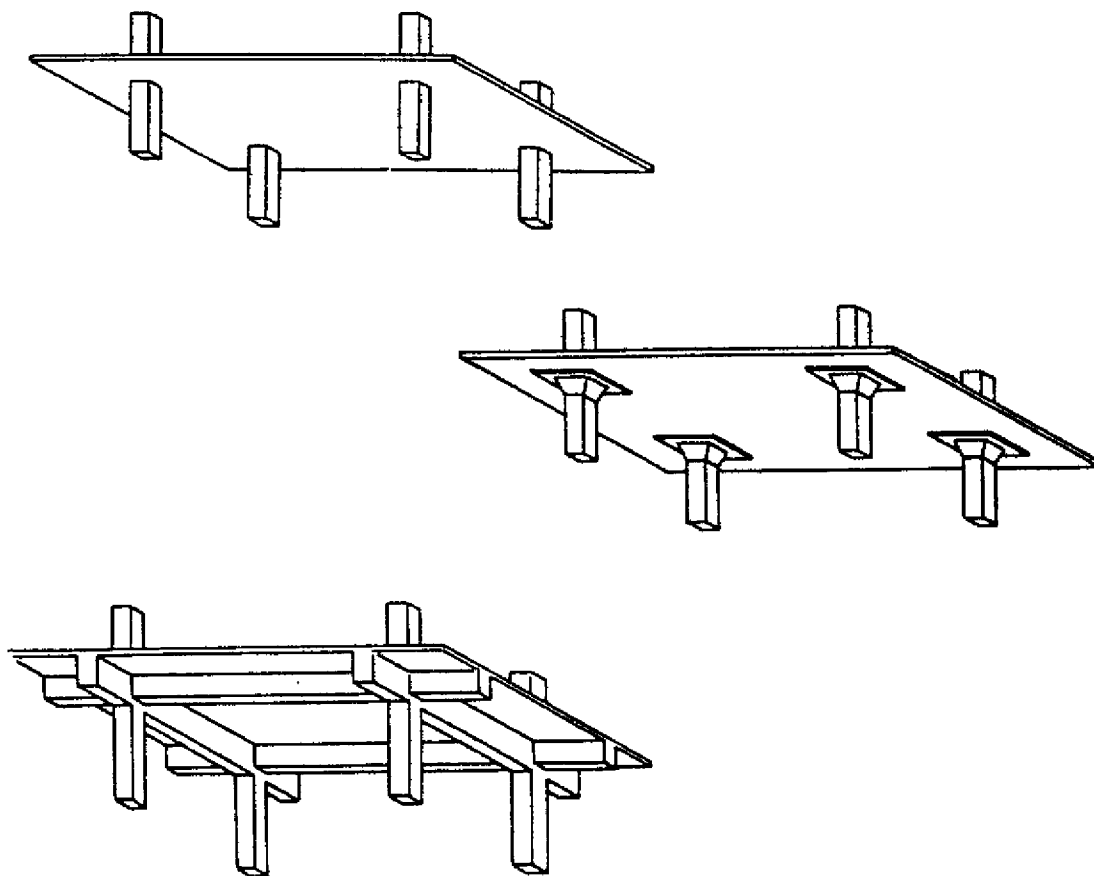


Fig. 1 Tipos de losas

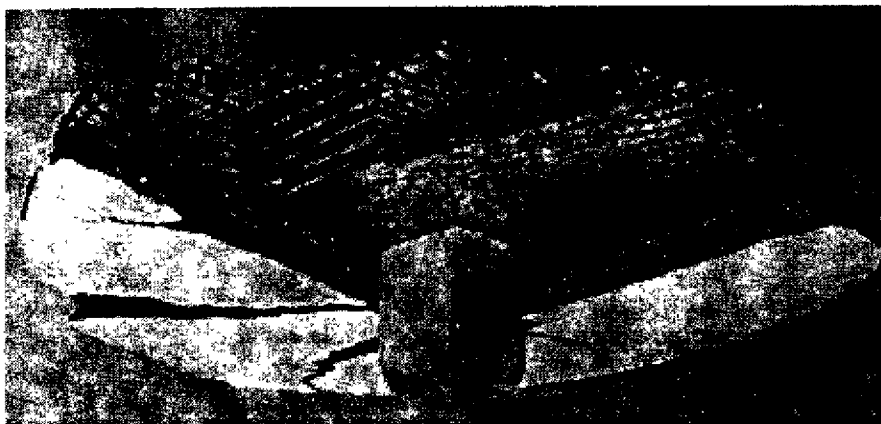


Fig. 2 Modelo losa-columna de concreto reforzado después de la falla por punzonamiento debida a la carga axial en la columna

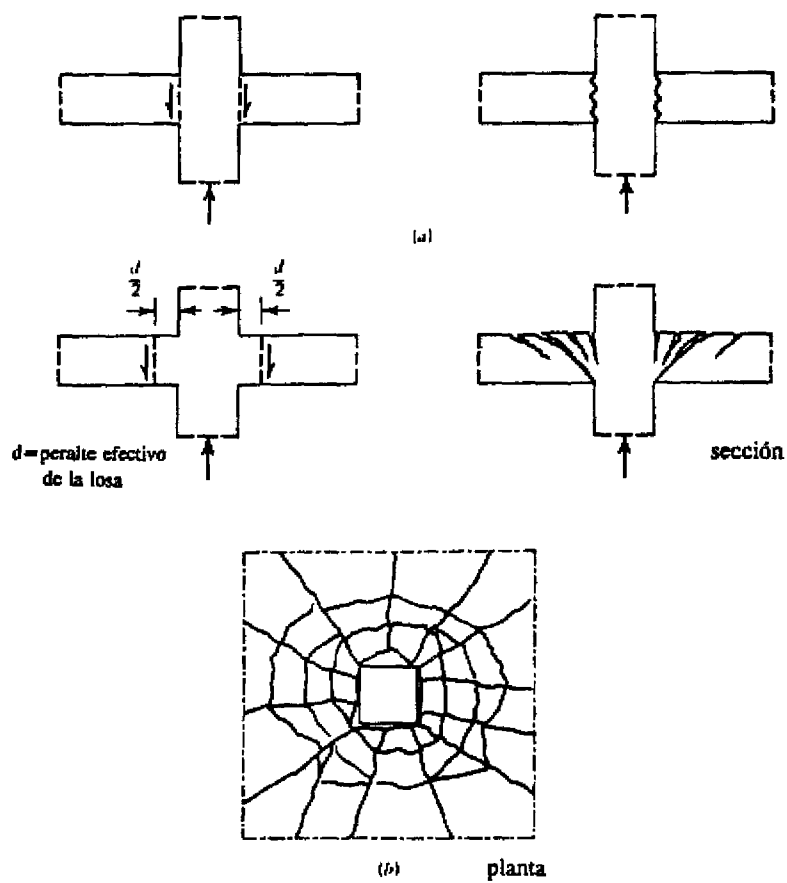


Fig. 3 Falla por punzonamiento en una conexión losa-columna de concreto reforzado

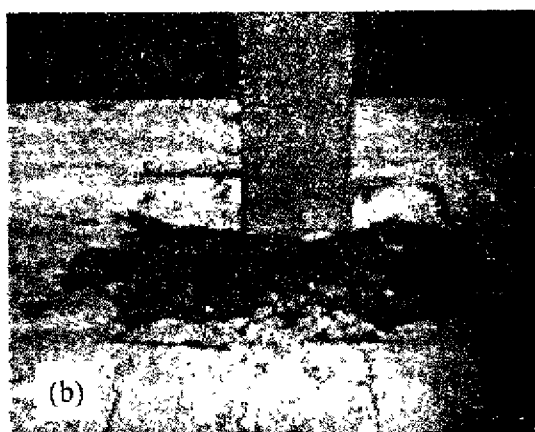


Fig 4 Espécimen losa-columna de concreto reforzado después de la falla que transmitía cortante y momento de desequilibrio

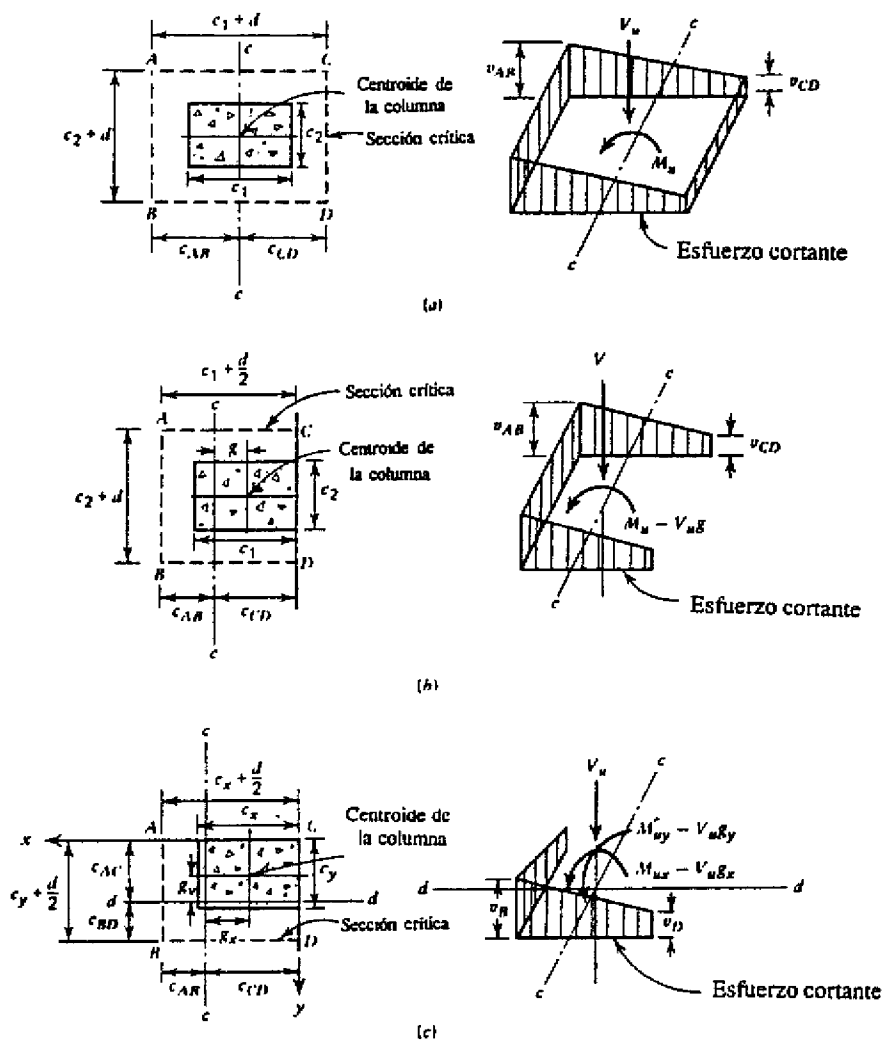


Fig. 5 Sección crítica supuesta y distribución de esfuerzos cortantes en la losa para uniones que transmiten cortante y momento de disequilibrio

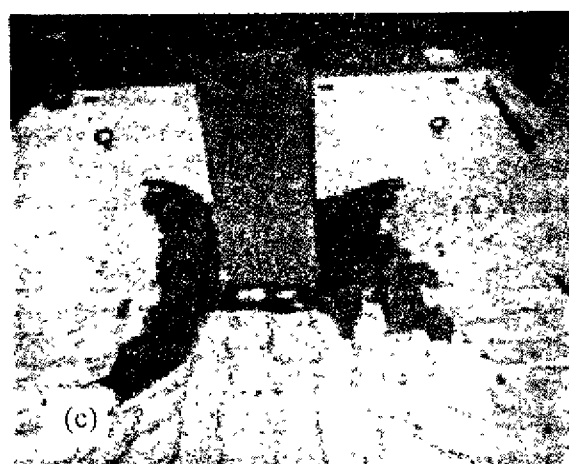
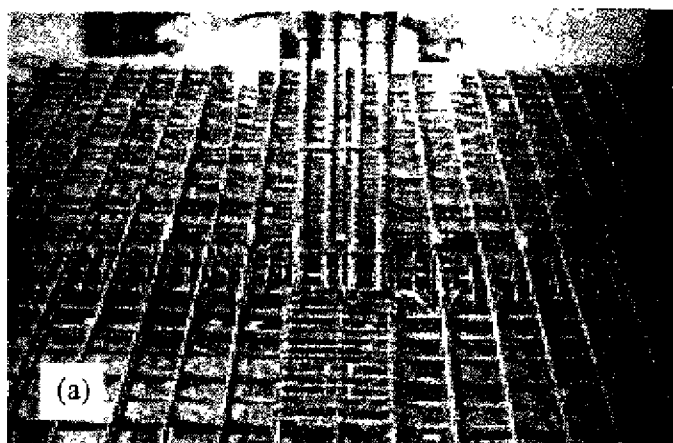


Fig 6 Ensayo de una conexión interior losa-columna con
refuerzo por cortante en forma de estribos

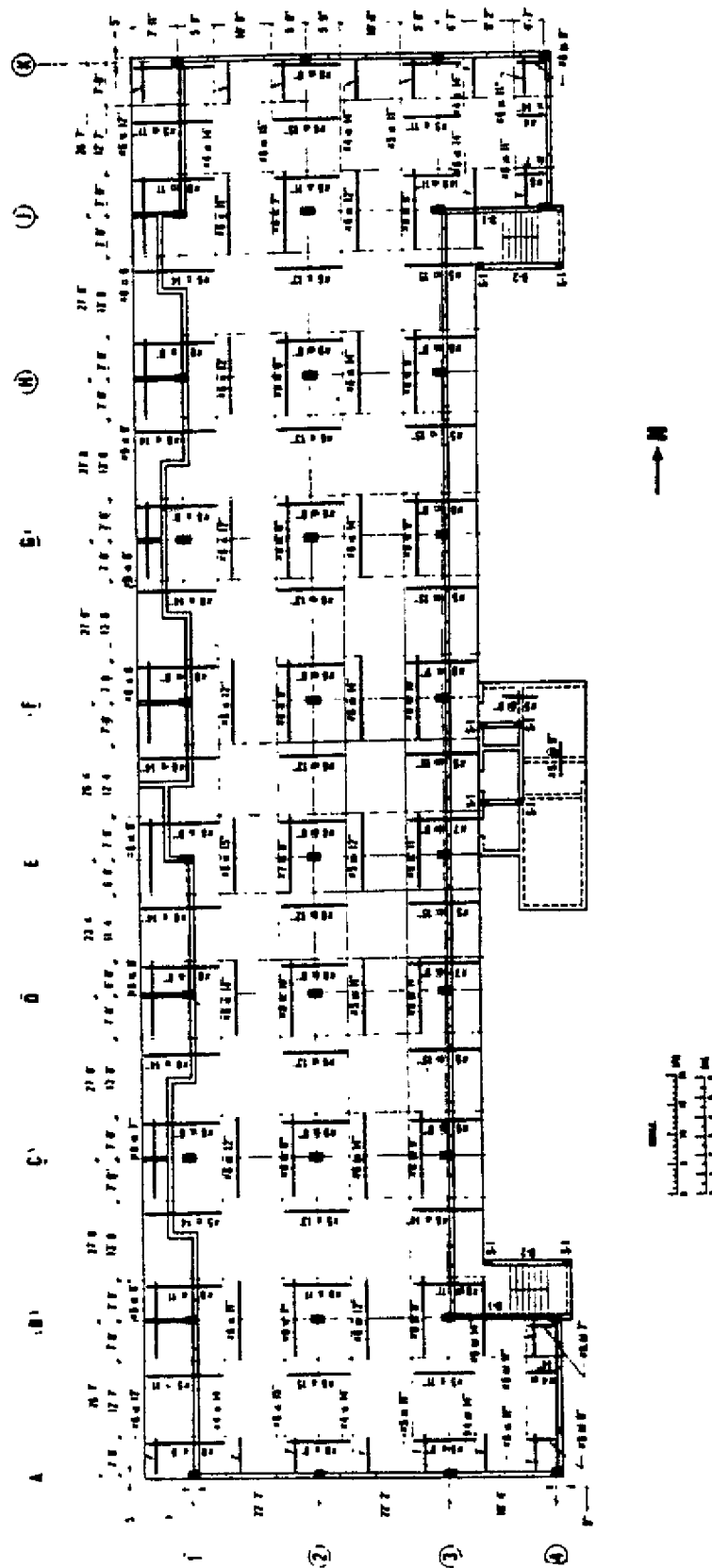


Fig. 7 Refuerzo en el lecho superior de la losa plana de un edificio de condominios en Cocoa Beach, Florida

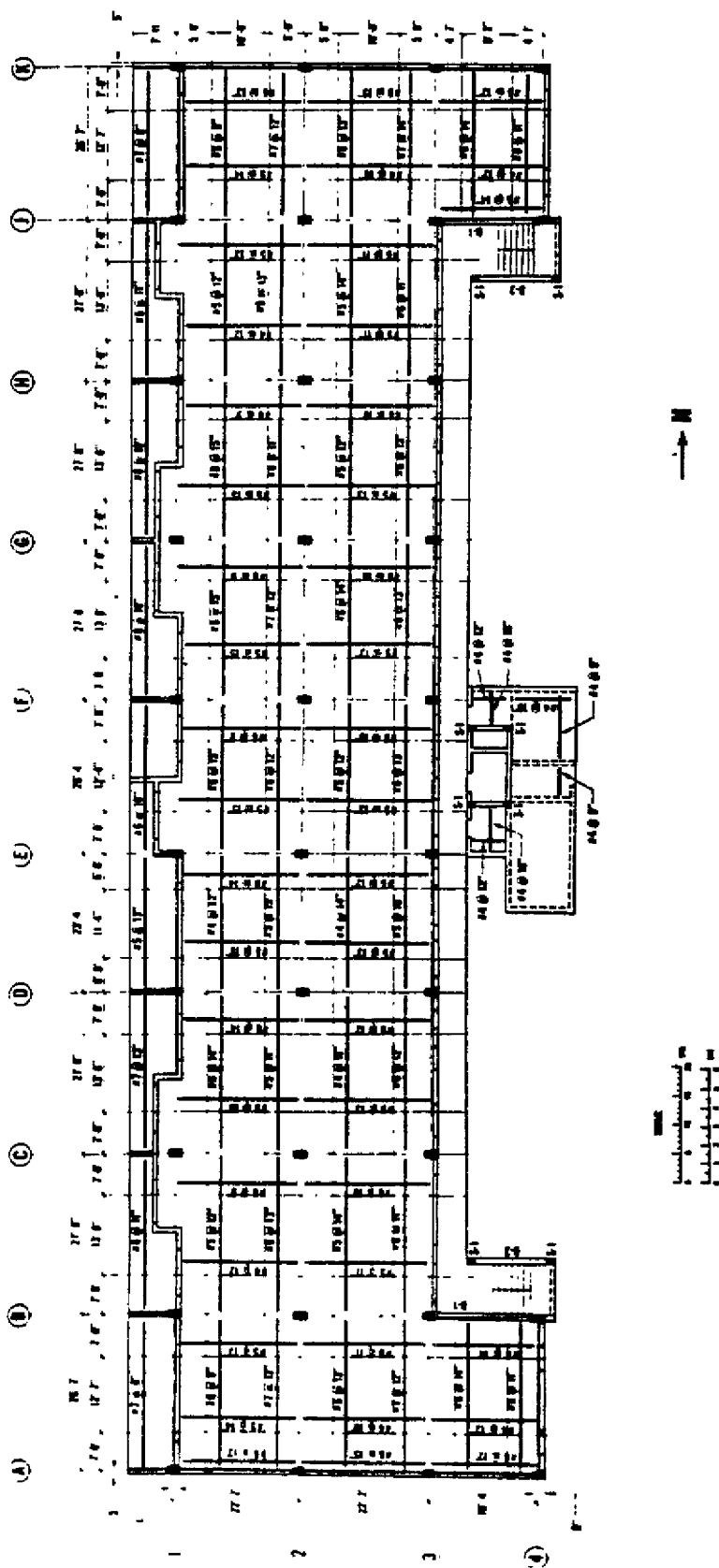


Fig. 8 Refuerzo en el lecho inferior de la losa plana de un edificio de condominios en Cocoa Beach, Florida