

# DISEÑO DE ENTREPISOS DE HORMIGÓN POSTENSADO

**BIJAN O. AALAMI, S.E. Y GAIL S. KELLEY, P.E.**

## RESUMEN:

Este trabajo presenta los conceptos claves del diseño de entrepisos hormigón y destaca sus diferencias con el diseño utilizando otros materiales. Se tratan los tres métodos de análisis comúnmente empleados para entrepisos de hormigón: el Pórtico Simple, el Pórtico Equivalente y el método de los Elementos Finitos. Se demuestra que – independientemente del método de análisis - una asignación de la repartición de cargas es un prerequisite para el diseño de entrepisos de hormigón. Por su parte, la integración de las acciones sobre las bandas de diseño se presenta como un paso fundamental en la interpretación de la solución cuando se utiliza el método de Elementos Finitos. Se reseñan las características de diseño de los sistemas de entrepisos postensados y se enfatiza la importancia de interpretar tensiones representativas (hipotéticas) para el cumplimiento de los reglamentos. El trabajo concluye con la presentación de una opción de modelado estructural para el análisis de losas casetonadas.

## 1. CARACTERÍSTICAS DEL DISEÑO DE ENTREPISOS DE HORMIGÓN

### 1.1 Requisitos Generales

Las preocupaciones fundamentales de un ingeniero estructural son la Seguridad, Utilidad y Economía de las estructuras que diseña. Se entiende por Seguridad la capacidad de la estructura de soportar las cargas requeridas por los códigos sin un deterioro excesivo. Se logra Utilidad si la estructura se comporta como se pensó durante su vida útil. Se entiende por Economía el convencimiento, por parte de los propietarios, que los costos tanto a corto como a largo plazo han resultado razonables.

También es importante la legalidad del procedimiento del diseño, definida como el cumplimiento de los reglamentos de aplicación. No obstante, no siempre resulta fácil establecer tal legalidad, particularmente en estructuras postensadas. Los reglamentos, antes que guiarla tienden a ir por detrás de la práctica del postensado. Gran parte de lo que actualmente se considera una práctica adecuada para el diseño de entrepisos postensados no ha sido aún incorporada a los reglamentos.

### 1.2 Requisitos del Procedimiento de Diseño

Un tema importante que frecuentemente no es tenido en cuenta por quienes redactan los reglamentos es que a menos que los procedimientos de diseño sean simples y expeditivos, no serán adoptados por los profesionales. Esto puede ser importante cuando se solicita a

un profesional que evalúe y seleccione entre diferentes alternativas estructurales.

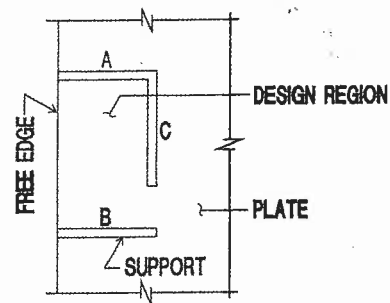
Un ejemplo es el uso del postensado en la construcción de edificios. Algunos ingenieros se resisten a seleccionar la alternativa del postensado dado que el diseño puede requerir más tiempo y esfuerzo que una estructura de hormigón convencional. Aunque la estructura postensada puede resultar más económica y tener un comportamiento superior, en general el ingeniero no puede incrementar sus honorarios. Consecuentemente, algunos ingenieros han desarrollado una aversión al postensado y buscan razones para no utilizarlo.

Otro aspecto tal vez más importante aún, que la industria del hormigón enfrenta en muchos países, es el papel que desempeña el diseñador al seleccionar los materiales de construcción, principalmente la elección entre acero y hormigón. Recientemente, el advenimiento de las computadoras y la automatización en el diseño y detallado tienden a favorecer a la industria del acero. La elección de estructuras de acero se vio beneficiada por la ventaja inicial de prestarse fácilmente a la automatización de diseño. Actualmente existen programas de computación que realizan un diseño de acero completo, incluyendo el detallado, con un ingreso de datos mínimo por parte del diseñador. En general, esto no ocurrió con las construcciones de hormigón que han carecido de programas de computación integrados. Además, los reglamentos de hormigón se han tornado más complejos y requieren mayor ingreso de datos por parte del diseñador.

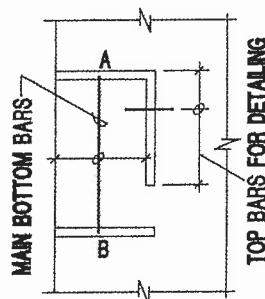
La parte más difícil en la automatización del diseño de estructuras de hormigón es el diseño de los entresijos. En la mayoría de los casos, se pueden analizar y diseñar fácilmente otras partes de las estructuras tales como vigas, columnas y pórticos. Este artículo analiza los conceptos de diseño de las losas de hormigón y presenta un método para automatizar el diseño de las losas tanto postensadas como armadas convencionalmente. Se anticipa que este método eliminará muchos de los problemas asociados con el diseño integrado de edificios de hormigón. Asimismo, se presenta un procedimiento para seleccionar la distribución de las cargas y se dan lineamientos para el layout de las armaduras.

### 1.3 Diseño de Entresijos de Hormigón en comparación con Otros Materiales

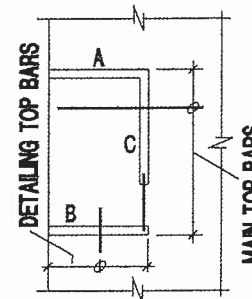
El ejemplo siguiente destaca las características principales que distinguen al diseño de entresijos hormigón respecto de otros. El ejemplo considera tres materiales: hormigón, acero y vidrio, donde cada uno tiene una característica distintiva respecto del diseño. Aún cuando el ejemplo es hipotético, ilustra la forma en que las propiedades de los materiales afectan los procedimientos y requisitos de diseño.



(a) PARTIAL PLAN



(b) SPAN BETWEEN WALLS A AND B



(c) CANTILEVER OVER WALL C

### MODELING OPTIONS OF A PLATE REGION

Figura 1.3.1

La Fig. 1.3-1 (a) muestra un plano parcial de una placa o losa bajo carga uniforme. El ejemplo analiza el diseño del área rodeada por los apoyos A, B y C denominada "Design Region" (Región de diseño). El objetivo es satisfacer los requisitos de Servicio y Seguridad (resistencia) de esta región.

#### A. VIDRIO

Consideremos primero una lámina de vidrio. La Serviceabilidad de una lámina de vidrio está determinada por la deflexión aceptable; su Seguridad se mide por la carga que provoca su fisuración. Esta fisuración ocurre cuando la resistencia a la tracción en la superficie alcanza un valor que es una propiedad característica del material vidrio. El vidrio es un material sumamente frágil; una vez que se inicia una fisura, ésta se difundirá inmediatamente y ocasionará la falla. Por consiguiente, el procedimiento de diseño consiste en:

- Estimar la deflexión bajo carga de servicio,
- Determinar la carga a la que la tensión máxima alcanza la resistencia a la fisuración del vidrio.

Para el diseño por serviceabilidad, se puede estimar

la deflexión utilizando métodos aproximados basados en la carga de servicio, propiedades del material, condiciones de los apoyos y geometría de la lámina. Como se ha puntualizado anteriormente, no obstante, la falla ocurre cuando la tensión en cualquier punto de la lámina alcanza la resistencia a la fisuración del vidrio. A fin de lograr una estimación confiable de la seguridad de la lámina de vidrio, es necesario determinar con precisión tanto la ubicación de la tensión máxima como el valor de la misma con relación a la carga aplicada.

Se deben modelar con precisión la geometría y los apoyos de la lámina de vidrio dado que afectan directamente la magnitud de la tensión máxima. En la mayoría de los casos, se debe determinar, ya sea en forma analítica o experimental, la repartición real de las cargas. Los métodos aproximados basados en una repartición supuesta de cargas, no darán resultados precisos.

La necesidad de determinar en forma precisa la tensión en un punto, a fin de garantizar la seguridad de la lámina de vidrio, es lo que diferencia la respuesta del vidrio bajo cargas incrementales respecto de la respuesta de otros materiales.

Las tensiones locales calculadas mediante elementos finitos son sensibles al número de divisiones de malla y a la precisión de la formulación de elementos finitos utilizada. Se debe utilizar una malla muy fina y una formulación adecuada, a fin de determinar el valor de tensión en un punto.

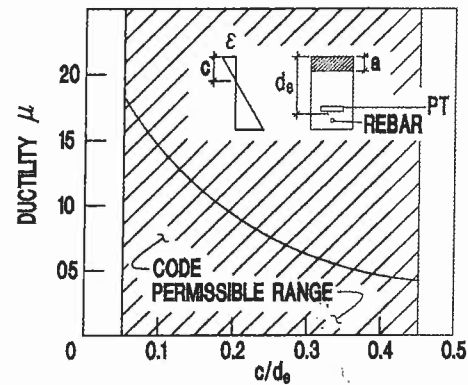
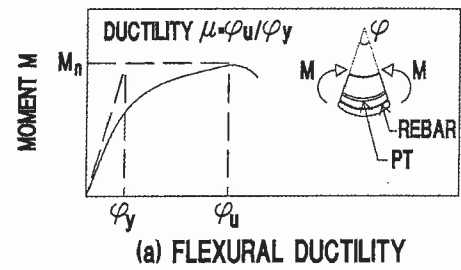
## B. Acero

Suponiendo que la región de diseño en la Fig. 1.3-1 (a) está formada por una placa de acero, su serviceabilidad está gobernada por su deflexión y deformación permanente bajo carga de servicio. Su seguridad o resistencia última, generalmente queda determinada por una deformación excesiva bajo las cargas factoreadas.

Aunque se puede utilizar un modelado aproximado a fin de estimar la deformación de la placa bajo carga de servicio, existirá una deformación permanente si ocurre fluencia local. La fluencia local es una función de la distribución de tensiones bajo carga de servicio. Utilizando el criterio de Von Mises, la fluencia ocurre cuando la combinación de tensiones en un punto alcanza un valor característico del material. A fin de evaluar la fluencia local, se deben utilizar técnicas experimentales o un análisis con una malla fina de elementos finitos. La confiabilidad del diseño depende de la exactitud con la que se calcula la ubicación y magnitud de las tensiones locales.

El procedimiento de diseño es el siguiente:

- Suponer condiciones de apoyo y espesor de la placa iniciales;



## FLEXURAL DUCTILITY OF PRESTRESSED SECTIONS

Figura 1.3.2

- Estimar la deflexión bajo carga de servicio utilizando métodos aproximados;
- A fin de evitar una deformación permanente, utilizar un método riguroso para determinar las tensiones locales y la posibilidad de fluencia local bajo cargas de servicio.
- Determinar el límite de resistencia (seguridad) utilizando un método aproximado para estimar la carga para la cual una plastificación general resulta en una deformación excesiva. (Puede utilizarse un método riguroso para esto, pero en general no se justifica).

La característica principal del diseño con acero es que típicamente existe un supuesto inicial sobre las condiciones de apoyo y el espesor de la placa. A partir de allí los cálculos apuntan a verificar la magnitud y ubicación de la tensión máxima de Von Mises. Si las tensiones calculadas son inferiores a los límites de tensión permitidos, los supuestos iniciales se consideran un diseño aceptable. El hecho de que el diseño sea esencialmente una verificación de los supuestos iniciales es una de las características claves que diferencian el diseño de placas de acero y de hormigón.

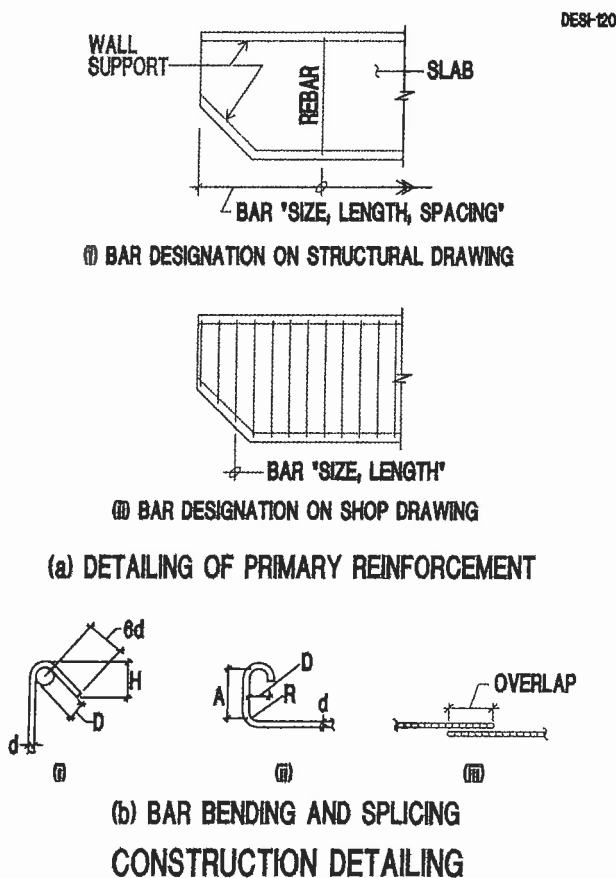


Figura 1.3.3

### C. Hormigón

Consideremos por último una placa de hormigón. Los criterios de diseño para la placa de hormigón son: (i) Las deflexiones y anchos de las fisuras y deben estar dentro de los límites aceptables bajo condiciones de servicio y (ii) la placa no debe colapsar bajo las cargas factoreadas estipuladas en los reglamentos.

Generalmente la determinación de tensiones locales no es significativa cuando se evalúan deflexiones y anchos de fisuras en el hormigón bajo carga de servicio. La microfisuración y la carencia de homogeneidad del material invalida el uso de un análisis elástico lineal simple y básicamente no se justifica un análisis riguroso.

Más aún, a diferencia del procedimiento de diseño para una placa de vidrio, la determinación de tensiones locales no necesita ser exacta. Una losa típica generalmente se modela y diseña siguiendo una distribución de solicitaciones asignada, a diferencia de las solicitaciones determinadas analíticamente que se utilizan en el caso de las placas de acero y de vidrio.

La capacidad de la sección de hormigón de fisurarse y sobrellevar una rotación finita antes de la falla es un reflejo de la ductilidad de la sección. A fin

de movilizar la distribución de solicitaciones supuesta y redistribuir la resistencia a las cargas en una planta, la losa debe poseer una cierta ductilidad. El reglamento ACI-318 garantiza una ductilidad mínima, limitando la cantidad de armadura en una sección; esto limita en forma efectiva la profundidad del eje neutro. Otros reglamentos imponen límites similares. La Fig. 1.3-2 es un esquema de una región típica de una viga postensada, diseñada de acuerdo con ACI-318. El coeficiente entre la curvatura última,  $\phi_u$ , y la curvatura de fluencia,  $\phi_y$ , brinda una medida de la ductilidad de la sección. Las secciones que cumplen con las restricciones del código sobre refuerzo y profundidad al eje neutro poseen una ductilidad en el rango de 4 a 18.

Para el ejemplo en la Fig. 1.3-1(a), se muestran dos opciones de trayectorias de aplicación de cargas (Fig. 1.3-1(b) y 1.3-1(c)). En la Fig. 1.3-1(b) la losa se modela como una faja que se extiende entre las paredes A y B. En otras palabras, el ingeniero indica una "trayectoria de aplicación de carga" para la transferencia de la carga de diseño a los dos soportes. Para esta trayectoria de aplicación de carga, las barras inferiores, llamadas refuerzo primario, entre las paredes A y B constituirán el refuerzo para la seguridad contra el colapso.

La pared C no es parte indicada de la trayectoria de aplicación de carga mostrada en la Fig. 1.3-1(b). No obstante, participará en soportar la carga; de este modo, posiblemente, la losa sobre ella ha de desarrollar elevadas tensiones de tracción. El ingeniero debe reconocer esto, y colocar una cantidad nominal de barras superiores sobre la pared para el control de fisuras bajo la carga de servicio. Este proceso de agregar acero en lugares seleccionados se llama "Detalle Estructural". El Detalle Estructural es un paso esencial en el diseño del hormigón y depende mucho de la experiencia y buen juicio del diseñador.

El Detalle Estructural se realiza después que se determina la cantidad y ubicación del refuerzo primario. Cumple con el concepto de diseño al garantizar que:

- La trayectoria de aplicación de carga concebida por el ingeniero se puede desarrollar con cargas iguales o superiores a los valores estipulados en los códigos;
- Los anchos de fisuras bajo carga de servicio están dentro de los límites aceptables.

Refiriéndonos nuevamente al diseño de la placa original, en la Fig. 1.3-1(c) la losa se modela como una viga en ménsula (cantilever) soportada por la pared C. Esta trayectoria de aplicación de carga requiere barras superiores sobre la pared C según se ilustra. Estas barras están suplementadas por barras superiores del

Detalle Estructural, colocadas sobre las paredes A y B para el control de fisuras.

Se conoce con el nombre de "Detalle de Construcción" al proceso de traducir las barras inferiores mostradas en la Fig. 1.3-3(a-i) al número, longitud y ubicación de las barras a ser colocadas en la losa, según se muestra en (a-ii). Otro ejemplo de Detalle de Construcción es la selección de correctos empalmes, ganchos, y detalles de curvaturas de barras, conforme se ilustra en la Fig. 1.3-3(b).

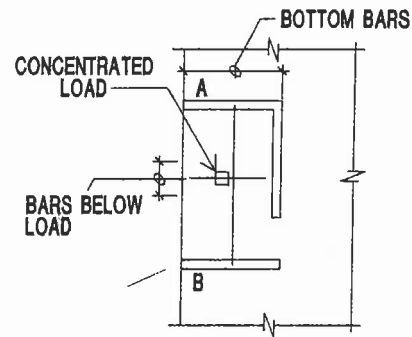
En Norte América el Detalle de Construcción se muestra en planos de fábrica, generados por los proveedores de materiales. Por otra parte, el Detalle Estructural es realizado por el ingeniero de diseño, y se muestra en planos estructurales. No obstante, en muchas otras partes del mundo, no hay diferencia entre el Detalle Estructural y el Detalle de Construcción. A diferencia de la costumbre en Norte América, los planos generados por el ingeniero de diseño también reflejan el Detalle de Construcción.

La Fig. 1.3-4(b) muestra un ejemplo del Detalle Estructural para control de fisuras. La Fig. 1.3-4(a) muestra un ejemplo del Detalle Estructural para el desarrollo de la trayectoria de aplicación de carga. En la Fig. 1.3-4(a) se distribuye una carga concentrada sobre el ancho de la supuesta trayectoria de aplicación de carga, mediante acero para distribución, ubicado bajo la carga. El refuerzo adicional garantiza que la trayectoria de aplicación de carga entre las paredes A y B pueda materializarse según lo concebido por el diseñador. No obstante, nótese que aunque se solicita este tipo de refuerzo tanto por seguridad como por servicio, no se refleja en muchos métodos de diseño, incluyendo el que presenta este artículo.

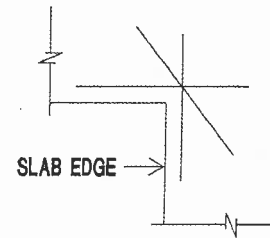
Se puede llegar a las siguientes conclusiones generales sobre el diseño de estructuras de hormigón:

- El diseño de hormigón no es sensible a las tensiones locales. La distribución de los momentos determinada a partir de la teoría de la elasticidad, será similar a los esquemas de la Fig. 1.3-5(a). Sin embargo, el momento equivalente, simplificado, que se muestra en la Fig. 1.3-5(b) generalmente se utiliza para los cálculos de la armadura. El refuerzo necesario para resistencia a la tracción en cada dirección es el requerido para resistir el momento total, es decir, la integral por debajo de la curva del momento. El layout del refuerzo básicamente no es crítico, siempre que las barras estén dentro de la región que corresponda al momento para el que están diseñadas. Esto se basa en la premisa que la falla sigue a la formación de una línea de articulación plástica y que la línea de articulación plástica movilizará todo refuerzo que la cruce.

Esto pone en evidencia otra característica del diseño de hormigón: se utiliza para el diseño el momento total.



(a) BARS FOR LOAD DISTRIBUTION



(b) CRACK CONTROL BARS AT RE-ENTRANT CORNER

### EXAMPLES OF 'STRUCTURAL DETAILING'

Figura 1.3.4

No es crítica la distribución del momento y de los valores locales del mismo. Se considera que el momento total es resistido por una "sección de diseño" a diferencia del diseño en vidrio y acero donde los momentos locales se verifican en los puntos de diseño. Esta característica da una gran ventaja computacional al hormigón, dado que los valores (integrales) totales de las acciones no son sensibles a la discretización de la malla de elementos finitos, tal como lo son los valores locales. El software de elementos finitos generalmente se formula a fin de satisfacer un equilibrio estático, independientemente de la densidad de la malla utilizada para discretizar la estructura. Una malla gruesa esencialmente produce el mismo momento "total" en una sección de diseño que una malla fina. Esta observación se trata más ampliamente en (Aalami, Bommer., 1999).

- Lo mismo que con el vidrio y el acero, las tensiones en las estructuras de hormigón pretensadas se deben verificar bajo carga de servicio. Con el vidrio el objetivo de la verificación de tensión es evitar la rotura, con el acero el objetivo es evitar la fluencia local y la deformación permanente. Con el hormigón, sin embargo, el objetivo es generalmente controlar, no evitar, la formación de fisuras.

Las tensiones de hormigón calculadas, utilizadas para el diseño, son "hipotéticas", dado que se basan en la aplicación del momento total, a toda la sección de diseño. En realidad, las tensiones sobre los apoyos se elevarán a valores muy superiores. En la mayoría de los casos, excederán el límite de fisuración del hormigón. De este modo, más que tensiones reales, las tensiones calculadas constituyen un indicador del alcance de la formación de fisuras en una región.

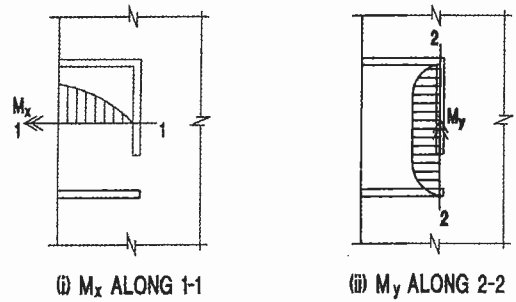
Es de notar que para los sistemas en una dirección, el límite en estas tensiones de tracción hipotéticas en ACI 318 es  $\sqrt{f_c'}$  ( $12 \sqrt{f_c'}$  en unidades pulgada-libra) aún cuando el límite de fisuración (módulo de ruptura) del hormigón se considera que está, típicamente, entre  $0,5$  y  $0,625 \sqrt{f_c'}$  ( $6$  a  $7,5 \sqrt{f_c'}$  en unidades pulgada-libra). Los límites hipotéticos de las tensiones de tracción son aún superiores en muchos otros códigos de construcción, como el código Canadiense (CAN 23.3, 1994).

#### 1.4 Característica de Diseño de los Pisos Postensados.

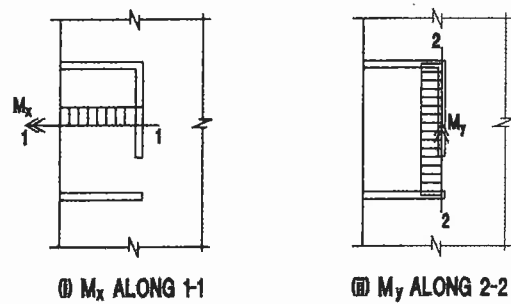
La necesidad de indicar una "trayectoria de distribución de carga" se identificó como una de las características que diferencia el diseño de hormigón postensado agrega otra carga de complejidad que requiere un ingreso adicional de información y evaluación ingenieril. Consideremos el ejemplo de la Fig. 1.3-1(b), donde se supone que la región de la losa se extiende entre las paredes A y B. En la Fig. 1.4-1 se muestra una alternativa de diseño postensado de esta región. La región se refuerza con cables de postensado entre las paredes A y B; el postensado se suplementa mediante acero común, según se ilustra.

La serviciabilidad y seguridad del diseño se controlan a través de dos parámetros principales: (i) cantidad de pretensado, y (ii) perfil del cable (la distancia entre el centro del cable y el centro de gravedad de la losa a lo largo de la longitud del cable). Básicamente, la cantidad de refuerzo de acero común dependerá de lo que se seleccione para estos parámetros.

En un piso no pretensado, la determinación del refuerzo requerido es prácticamente una rutina, una vez que se determinó la trayectoria de distribución de carga. Los resultados, en términos del refuerzo necesario, serán esencialmente los mismos, sin tener en cuenta la inclinación o experiencia del diseñador. No obstante, en un piso postensado, el ingeniero tiene considerable libertad para seleccionar la cantidad de pretensado y los perfiles de los cables. Según los supuestos del ingeniero y los criterios de diseño que utilice, resultarán diferentes diseños. De este modo, la automatización de un diseño de postensado



(a) ELASTIC DISTRIBUTION OF MOMENTS\*



(b) DESIGN DISTRIBUTION OF MOMENTS

\* POISSON'S RATIO DISREGARDED

#### ELASTIC AND DESIGN MOMENTS

Figura 1.3.5

requiere pasos adicionales a fin de seleccionar las fuerzas de postensado y perfiles de cables.

#### 1.5 Automación del Diseño de Hormigón

Resumiendo, el diseño de los entrepisos de hormigón según se practica hoy en día, requiere una "trayectoria indicada de distribución de carga" para la determinación de la armadura primaria. Si se postensa la losa, se necesitan supuestos adicionales, a fin de diseñar el postensado. Además, en las estructuras postensadas, es necesario verificar las tensiones bajo cargas de servicio. Sin embargo, a diferencia del acero y del vidrio, la tensión utilizada en el diseño de hormigón pretensado es una tensión "hipotética" cuando las secciones están fisuradas y son tensiones promedio cuando la sección no está fisurada. La tensión calculada para ser utilizada en el diseño, no nece-

DESI-104

## 2 PROCESO DE DISEÑO

### 2.1 Modelado Estructural y Análisis

El proceso de diseño para los entrepisos de hormigón se resume en el diagrama de flujo que se muestra en la figura 2.1-1. Esencialmente existen cuatro pasos: 1) modelado estructural; 2) análisis; 3) diseño; 4) Detallado Estructural. El modelado estructural implica la elección de las trayectorias de distribución de cargas.

El análisis determina las solicitaciones (momentos y esfuerzos de corte) resultantes de cada trayectoria de distribución de cargas. El diseño brinda la sección de armadura necesaria para resistir estas solicitaciones. El Detallado Estructural determina el layout de la armadura y si se requiere acero adicional para el control de fisuración o la distribución de cargas.

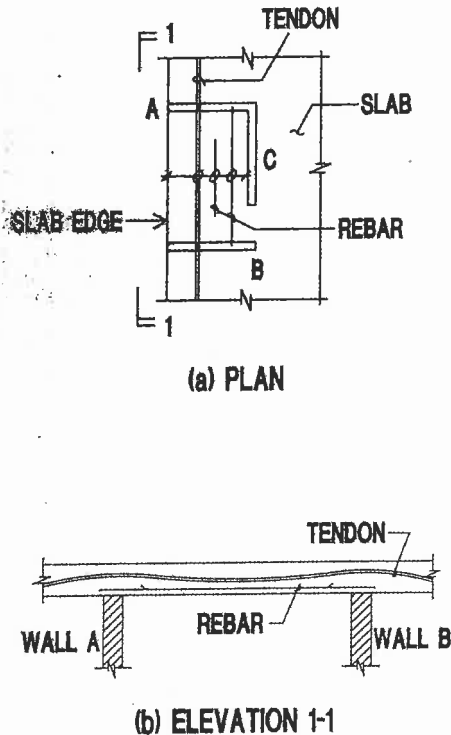
#### 2.1.1 Métodos de análisis

Los tres métodos comúnmente usados para el análisis de las estructuras de hormigón son: el método del Pórtico Simple, el método del Pórtico Equivalente, y método de los Elementos Finitos. En el método del Pórtico Simple, la losa se divide en fajas de diseño. Se modela exactamente la geometría de la estructura, es decir, se analizan los pórticos utilizando la rigidez de las columnas y losas vinculadas, según se las calculó a partir de su geometría. Como resultado, el análisis no tiene en cuenta la influencia de la flexión biaxial de la placa.

El Método del Pórtico Equivalente es un refinamiento del Método del Pórtico Simple. Es algo más exacto dado que se ajusta la rigidez relativa de la losa y columnas para tener en cuenta la curvatura biaxial de la placa. En general, la mayoría de los entrepisos sin vigas son analizados con el método del Pórtico Equivalente.

La información requerida respecto de condiciones de borde, cargas y geometría, es la misma tanto para el método del Pórtico Simple como para el método del Pórtico Equivalente. Aunque son métodos aproximados la solución obtenida se encuentra siempre en ambos casos del lado seguro. El grado de aproximación depende de hasta qué punto se desvía la planta en estudio respecto de una losa de espesor constante con un layout de columnas de apoyo ortogonal con distancias uniformes.

El tercer método de análisis, el método de Elementos Finitos, se basa en la división de la estructura en partes pequeñas (elementos) cuyo comportamiento se formula para capturar el comportamiento local de la estructura (Fig.2.1.1-1). La definición de cada elemento se basa en las propiedades de su material, geometría, ubicación en la estructura y vinculación con los elemen-



### POST-TENSIONED DESIGN OPTION

Figura 1.4.1

sariamente es la tensión local. En consecuencia, a fin de determinar las tensiones locales no es necesario utilizar una malla refinada en un análisis por elementos finitos.

Después de la indicación de la trayectoria de distribución de carga y de la determinación de la armadura primaria, debe seguir el Detallado Estructural. Hasta la fecha no hay referencias en la bibliografía de intentos de automatizar la indicación de las trayectorias de distribución de cargas o el Detallado Estructural. La sección que sigue presenta un procedimiento que automatiza gran parte del procedimiento de diseño para un piso no-pretensado y los pasos iniciales del diseño de un piso postensado. Los pasos adicionales necesarios para el diseño de postensado se tratan en (Aalami, Kelley 2001).

## FLOW CHART FOR CONCRETE FLOOR DESIGN

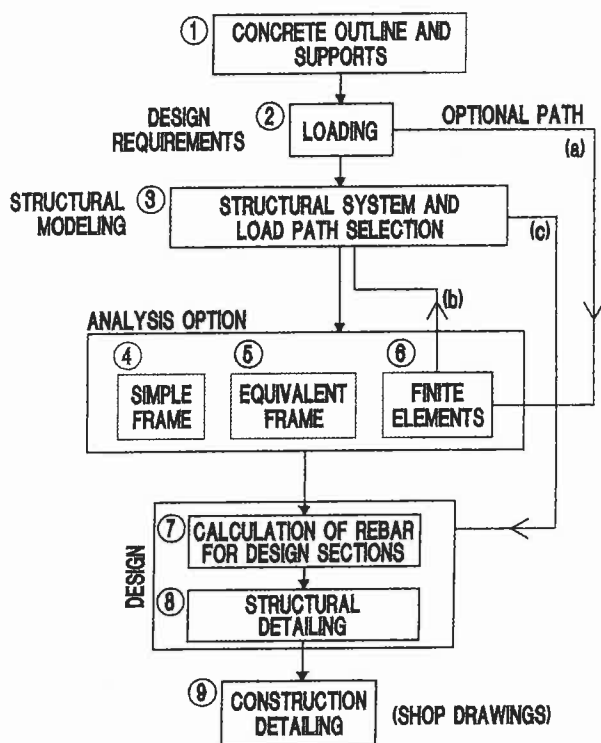


Figura 2.1.1

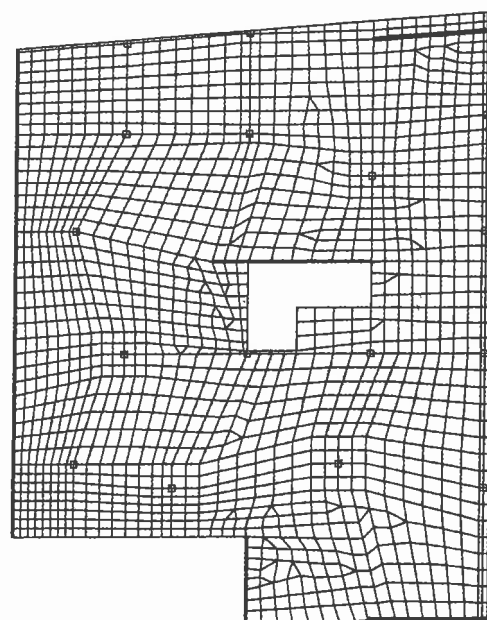
tos circundantes. El ensamble matemático de estos elementos en la estructura completa permite el cálculo automatizado de la respuesta de toda la estructura. El método de Elementos Finitos incorpora intrínsecamente el comportamiento biaxial del sistema en la determinación de las solicitaciones en el piso.

Las siguientes referencias dan una descripción general del Método de Elementos Finitos (Zienkiwecz, Taylor, 1989; Bathe, 1982). En (Aalami, Bommer, 1999) se brindan detalles del procedimiento con aplicación específica a los entreentresijos de hormigón.

## 2.2 Selección de las Trayectorias de Distribución de Cargas

El núcleo de la etapa de modelado estructural es la selección de las trayectorias de distribución de cargas. El sistema estructural está completo cuando el peso propio y la carga aplicada en cada punto tiene asociada una trayectoria explícita de distribución de las mismas hacia los apoyos.

La selección de una trayectoria de distribución de cargas se realiza en base al método de las fajas. Esto requiere que se divida el entrepiso en líneas de apoyo que se intersecan, cada una de las cuales tiene su propia área tributaria. Las líneas de apoyo indican las trayectorias supuestas



## DISCRETIZATION OF FLOOR SLAB

Figura 2.1.1.1

de distribución de carga; se llama "faja de diseño" a una línea de apoyo junto con su área tributaria. Para los entrepisos no pretensados la trayectoria de distribución de cargas está determinada por la posición y orientación de la armadura. Para los entrepisos pretensados, la trayectoria de distribución de carga está determinada por el layout de los cables postensados.

Para la mayoría de las estructuras la selección de la trayectoria de cargas es esencialmente independiente del método de análisis. Consideremos un entrepiso típico de un edificio de varias plantas con columnas y paredes por encima y por debajo según muestra la figura 2.2-1. A continuación se describe el modelado estructural del entrepiso y se ilustra el procedimiento para seleccionar las trayectorias de distribución de cargas y secciones de diseño.

### Definición de la Losa y los Apoyos

Como primer paso, el ingeniero define el contorno de la losa y cualquier abertura, escalones u otras discontinuidades. Luego, identifica la ubicación y dimensiones de las paredes y columnas sobre las que se apoya el piso.

Los apoyos en el caso de este ejemplo se muestran en la Fig. 2.2-1. Nótese que las vigas se consideran parte del

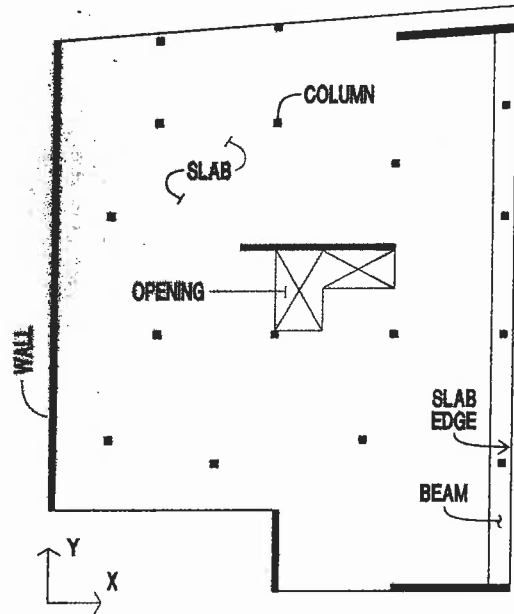


sistema de piso antes que del sistema de apoyo y por lo tanto se modelan y diseñan junto con la losa del piso.

### Definición de las Líneas de Apoyo

A continuación el ingeniero selecciona una serie de líneas de apoyo en cada una de las dos direcciones principales. Típicamente, estas son líneas que unen apoyos adyacentes a lo largo de las que, intuitivamente, un ingeniero experimentado colocará la armadura principal. La Figura 2.2-2 muestra las líneas de apoyo, rotuladas A a G, en la dirección X (F no es una línea de apoyo). La Fig. 2.2-3 muestra las cinco líneas de apoyo, rotuladas 1 a 5, en la dirección Y.

Las líneas de apoyo pueden resultar menos obvias si el sistema de piso es muy irregular, es decir, si las columnas están significativamente descentradas entre sí; no obstante, los criterios para la selección son los mismos que en una losa regular. Las líneas de apoyo son las líneas a lo largo de las que un ingeniero estructural experimentado posiblemente coloque la armadura principal para resistir las cargas gravitatorias.



PLAN OF FLOOR SLAB

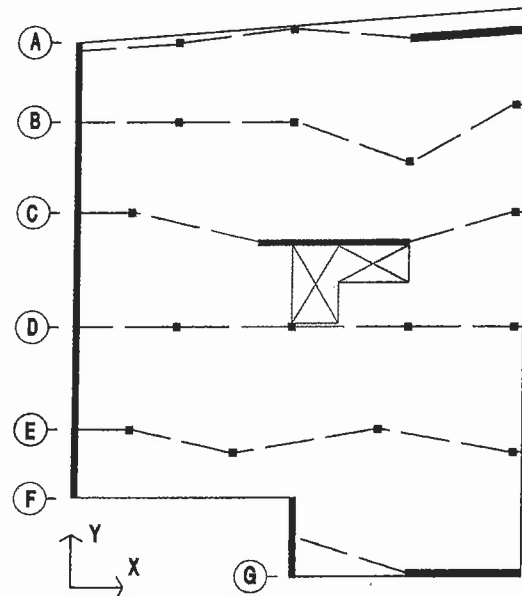
Figura 2.2.1

### Definición de Areas Tributarias y Fajas de Diseño

Básicamente los puntos medios entre líneas de apoyo se utilizan para definir las áreas tributarias hacia cada línea de apoyo. Los puntos medios se unen para identificar los límites del área tributaria. La Figura 2.2-4 muestra las líneas de apoyo en la Dirección X. Por ejemplo, los puntos 8 y 9 se utilizarán para determinar los límites del área tributaria hacia la línea de apoyo B. Las áreas tributarias para las fajas de diseño en la dirección X están sombreadas en la Fig. 2.2-5. La figura 2.2-6 muestra las líneas de apoyo en la dirección Y con sus áreas tributarias asociadas.

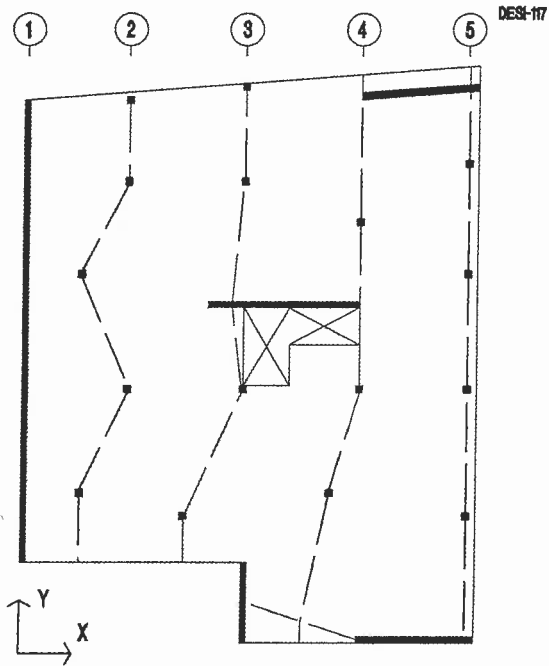
### Secciones de Diseño

Las secciones de diseño típicamente se dibujan a través de cada faja de diseño en los lugares donde las solicitaciones integradas a lo ancho de la faja son mayores. No hay límite para el número de secciones de diseño que se pueden especificar. Nótese que las solicitaciones de diseño máximas en la realidad pueden no estar en el punto medio de los tramos. Además, las solicitaciones de diseño pico para las verificaciones de serviciabilidad y resistencia pueden no ocurrir en el mismo lugar. La Figura 2.2-7 muestra las secciones de diseño para dos de las fajas de diseño en la dirección X. A lo largo del ancho de los apoyos, se pueden seleccionar secciones en la cara de los apoyos para aprovechar las solicitaciones reducidas más allá de los ejes de apoyos.



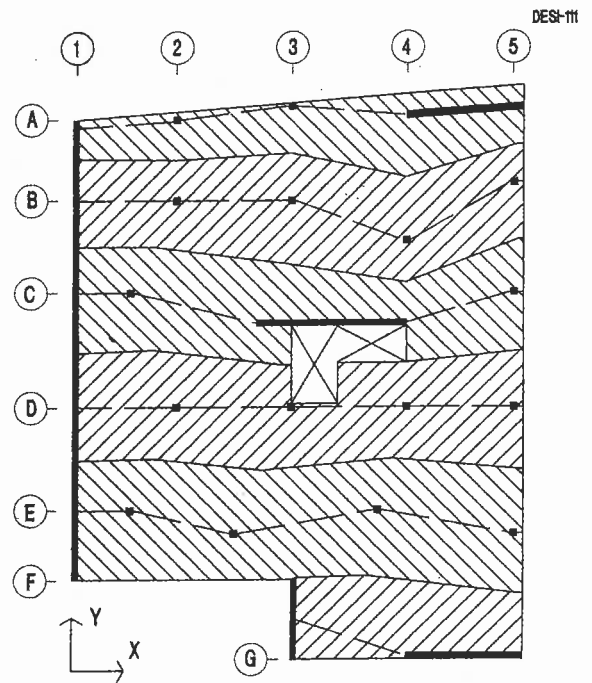
DESIGNATION OF LINES OF SUPPORT IN X-DIRECTION

Figura 2.2.1



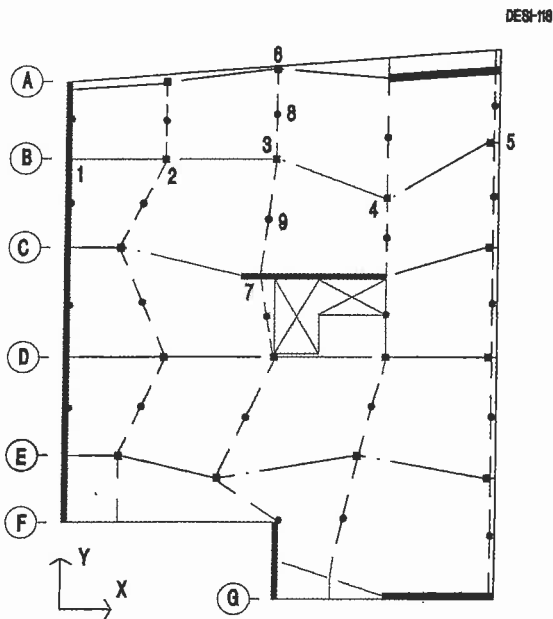
DESIGNATION OF LINES OF SUPPORT  
IN Y-DIRECTION

Figura 2.2.3



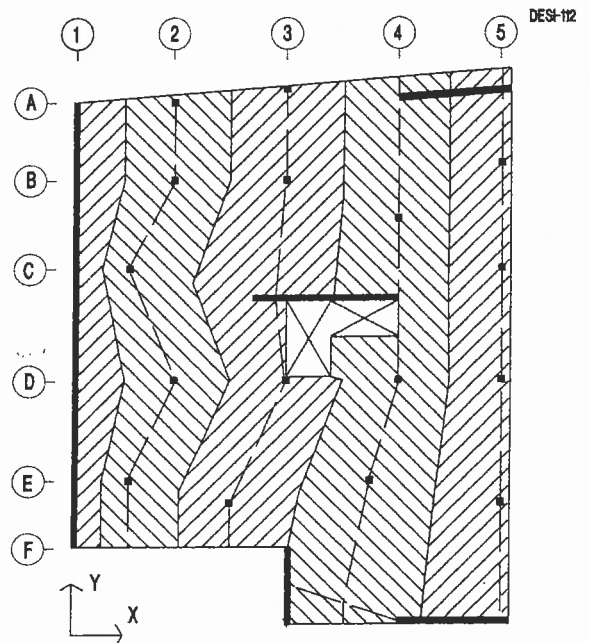
TRIBUTARIES FOR DESIGN STRIPS IN  
X-DIRECTION

Figura 2.2.5



SELECTION OF DEMARCATION  
POINTS FOR TRIBUTARIES (DESIGN STRIPS)

Figura 2.2.4



TRIBUTARIES FOR DESIGN STRIPS  
IN Y-DIRECTION

Figura 2.2.6

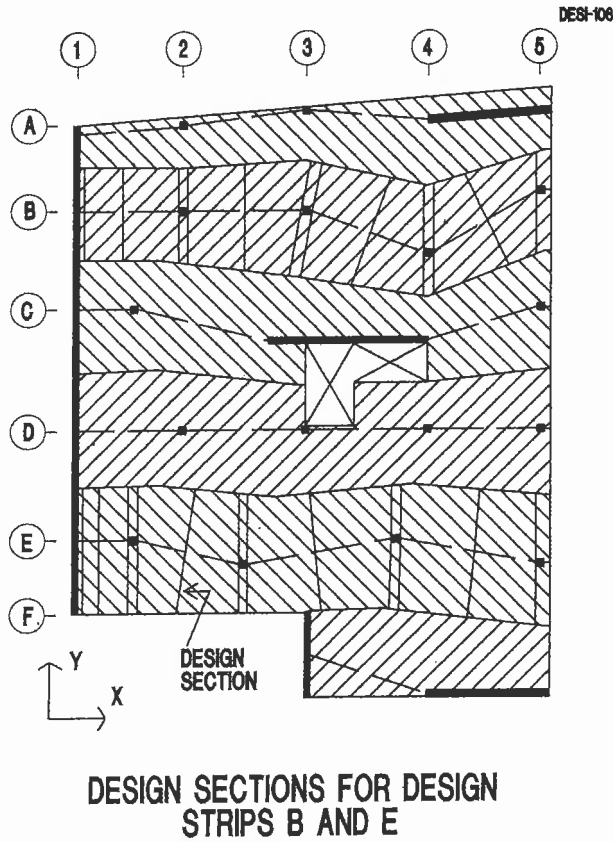


Figura 2.2.7

### 2.3 Opciones de Análisis

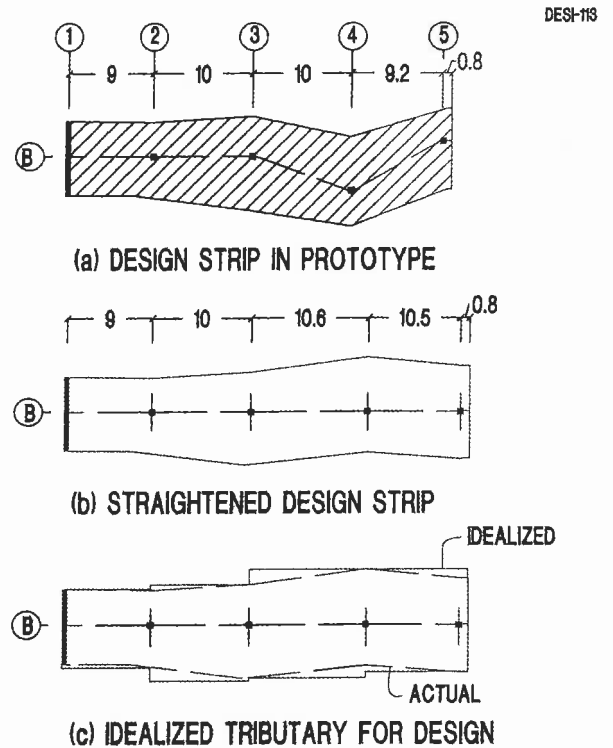
En la etapa de análisis se distribuyen las solicitaciones entre las trayectorias de distribución de cargas (fajas de diseño) cumpliendo con el equilibrio con la carga aplicada.

#### 2.3.1 Análisis Análisis del Pórtico Simple y del Pórtico Equivalente

Tanto en las opciones del pórtico Simple como Equivalente, cada faja de diseño se extrae del piso y se reconstruye con la carga y condiciones de apoyo apropiadas a fin de crear un modelo aporricado aproximado. Cada faja de diseño se analiza como un sistema estructural independiente, aislado de las fajas de diseño adyacentes.

Consideremos la faja de diseño B, que se muestra como una entidad separada en planta (Fig. 2.3.1-1) y en elevación (Fig. 2.3.1-2). A los efectos de realizar el análisis de una estructura plana, se endereza la faja a lo largo de su línea de apoyo según se ilustra en la Fig. 2.3.1-1 (b). De este modo, la longitud de tramo corresponde a la distancia inclinada entre soportes adyacentes. Es de notar que sobre un mismo tramo pueden variar los anchos tributarios. A fin de simplificar el análisis estas líneas

tributarias variables básicamente se idealizan con límites rectos (Fig. 2.3.1-1(c)). Generalmente, se elige de tal modo que el área tributaria idealizada sea ligeramente mayor que el área tributaria real. Si la modificación en el ancho tributario en cualquier tramo dado varía en más del 20%, puede resultar útil modelar el área tributaria como una serie de segmentos a fin de reducir la armadura requerida. Pueden resultar necesarias aproximaciones adicionales para otras condiciones que no sean estándar.



#### CONSTRUCTION OF DESIGN STRIP IN PLAN

Figura 2.3.1.1

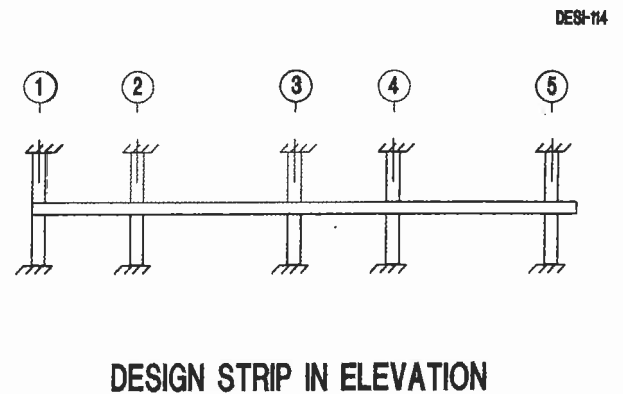


Figura 2.3.1.2

2.3.2 Análisis de Elementos Finitos

Como se ha puntualizado anteriormente, ya sea que se utilice el método del pórtico simple o el del pórtico equivalente, cada faja de diseño debe extraerse del sistema del piso y analizarse como una estructura plana. Con el método de los elementos finitos, por el contrario, se puede analizar todo el piso de una sola vez. Sin embargo, también en este caso se deben procesar los resultados como "fajas de diseño" y "secciones de diseño" a los efectos de las verificaciones de resistencia y serviciabilidad estipuladas en los reglamentos. Lo mismo que con los métodos de los pórticos simples y equivalentes, las fajas de diseño se basan en las trayectorias supuestas de distribución de solicitaciones. No obstante no se necesita seleccionar las fajas de diseño antes del análisis.

A veces esto puede resultar ventajoso dado que se pueden utilizar los resultados del análisis de elementos finitos para seleccionar fajas de diseño que estén más de acuerdo con la respuesta real (supuesta elástica) de la losa.

Idealmente, una faja de diseño debería estar limitada por las líneas de solicitaciones de corte cero dado que esto garantiza que cada faja de diseño sea diseñada para resistir sólo la carga que directamente se ubica sobre ella. Para la losa utilizada en el ejemplo, el flujo de las

DES-109

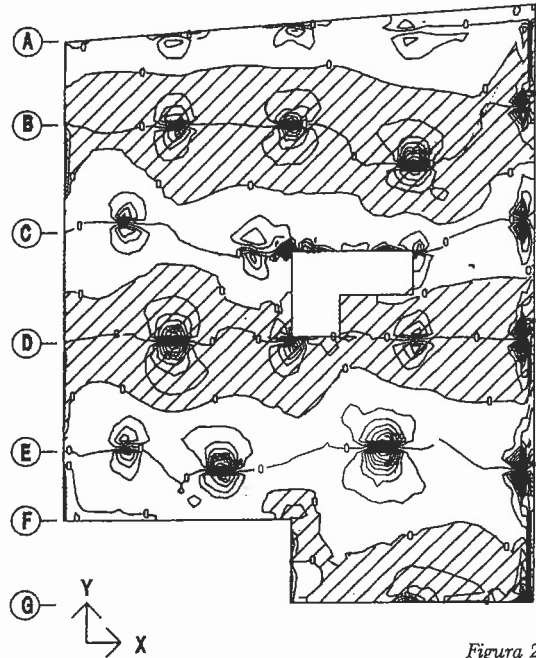


Figura 2.3.2.2

ZERO LINE OF SHEAR TRANSFER IN Y-DIRECTION

DES-108

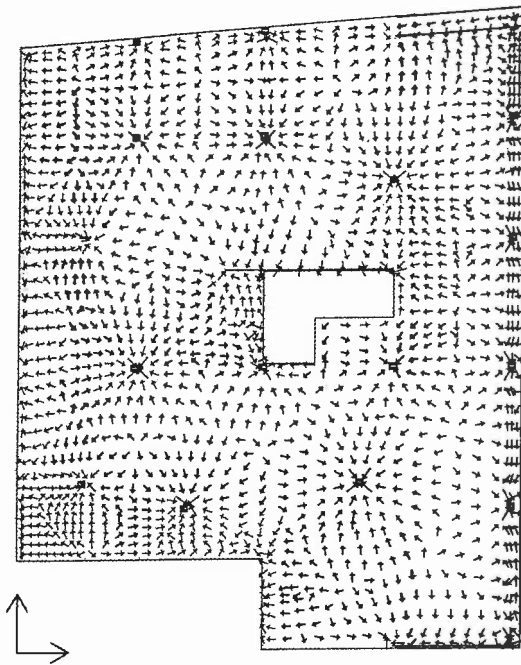


DIAGRAM OF LOAD FLOW UNDER SERVICE CONDITION

Figura 2.3.2.1

DES-110

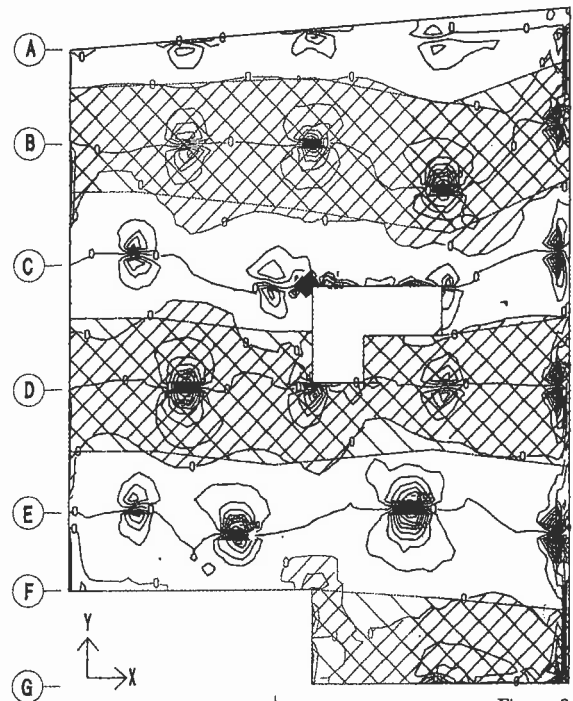


Figura 2.3.2.3

ASSUMED DESIGN STRIPS SUPERIMPOSED ON NATURAL TRIBUTARIES IN X-DIRECTION

cargas hacia los apoyos se muestra mediante flechas en la Fig. 2.3.2-1. Las flechas son normales a los planos de esfuerzo de corte máximo; la longitud de cada flecha indica la magnitud del esfuerzo de corte. La Fig. 2.3.2-2 muestra las líneas de esfuerzo de corte cero en dirección Y según se determinaron utilizando el flujo de cargas mostrado en la Fig. 2.3.2-1. Las regiones claras y sombreadas, alternas, indican las áreas tributarias naturales para las líneas de apoyo A a G.

Los gráficos como los de la Fig. 2.3.2-2 demuestran que las "áreas tributarias naturales", permiten que se asignen las solicitaciones calculadas a fajas de diseño de acuerdo con la respuesta elástica de la estructura. Un diseño basado en estas áreas tributarias posiblemente resulte más económico en cuanto al uso de materiales, especialmente si la configuración del piso es irregular. No obstante, típicamente las fajas de diseño se basan en las líneas de apoyo estándar y áreas tributarias descriptas anteriormente.

En la mayoría de los casos, el mayor esfuerzo de diseño requerido para seleccionar las áreas tributarias naturales supera los beneficios de utilizar estas fajas de diseño refinadas. La Fig. 2.3.2-3 muestra las fajas de diseño seleccionadas por el procedimiento de los pórticos, superpuestas a las áreas "tributarias naturales" del piso.

## 2.4 Métodos de los Pórticos vs Método de los Elementos Finitos

El procedimiento de diseño a partir de un análisis de elementos finitos es muy similar al utilizado a partir del método de los pórticos. Consiste en seleccionar trayectorias de distribución de cargas que conduzcan a fajas y secciones de diseño. A esto le sigue la determinación de la demanda en cada sección de diseño. La etapa de diseño consiste en la determinación de la armadura para satisfacer la demanda en las secciones de diseño respectivas.

Lo mismo que con los métodos de los pórticos, el objetivo de un análisis de elementos finitos es brindar información para un diseño que satisfaga los requisitos de servicio y seguridad conforme a los reglamentos en vigencia. Sin embargo, la cantidad de información obtenida de un análisis de elementos finitos es generalmente superior a la requerida por los reglamentos para la verificación de la serviciabilidad y seguridad.

El método de los elementos finitos brinda, especialmente, información más precisa sobre la respuesta de la losa a la carga aplicada.

### 2.4.1 Determinación del Momento de Diseño

A fin de realizar la evaluación de la resistencia de una sección de diseño, el momento del diseño en la sección se aplica a todo el corte transversal de la sección. Con el método de los elementos finitos, los momentos de diseño se determinan integrando la distribución del momento

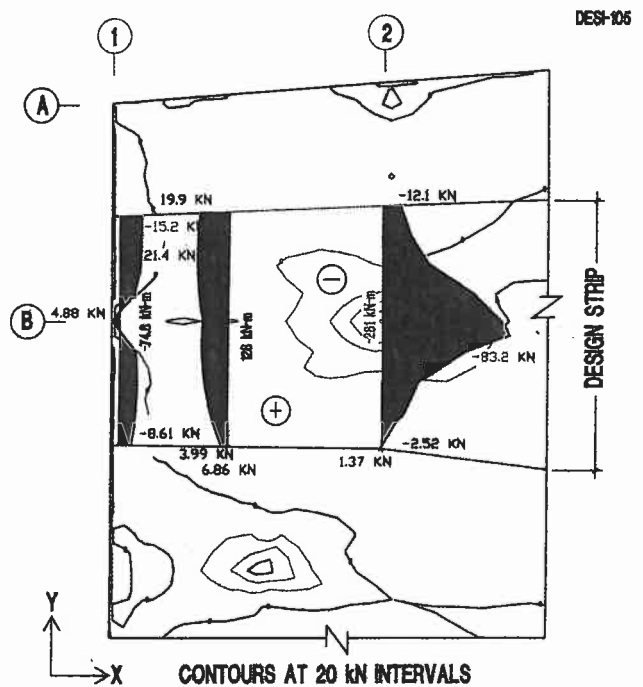
obtenida a través de la sección de diseño. En la Fig. 2.4-1 se puede ver una ampliación de una esquina de la losa tomada como ejemplo en este trabajo. Obsérvese la faja de diseño B, y la variación del momento  $M_y$  a lo largo de tres secciones de diseño, una en correspondencia con las caras de los apoyos y la restante en el centro del tramo 1-2. El momento utilizado para la determinación de la armadura y las tensiones en cada sección de diseño es el área (integral) de las distribución del momento mostrada en la Figura. Por ejemplo, en la cara del apoyo en la línea 2, el momento del diseño es  $M_y = 281 \text{ kNm}$ .

## 2.5 Detallado Estructural

Los pasos de análisis y diseño anteriormente tratados determinan el área de armadura primaria necesaria para cada faja de diseño. A fin de garantizar un rendimiento satisfactorio bajo condiciones de servicio es esencial que este refuerzo esté adecuadamente distribuido. A la distribución de la armadura primaria se la llama Detallado Estructural.

### 2.5.1 Entrepisos No pretensados

Las recomendaciones del ACI (ACI-318,1999) respecto del layout de armadura se basan en el concepto de "faja-media y faja-columna". Aún cuando estas



**PARTIAL VIEW OF IN-SERVICE MOMENTS  $M_y$  FOR DESIGN STRIP B OF PROSPERITY SLAB**

Figura 2.4.1

recomendaciones constituyen lineamientos valiosos, no siempre son de aplicación cuando la planta de columnas es irregular o existen discontinuidades en la losa tales como en el caso de grandes aberturas. A continuación se dan algunos de los principios fundamentales para determinar el layout de la armadura principal. Los mismos se pueden utilizar como lineamientos cuando no sea posible definir claramente una distribución en "fajas-media y fajas-columna".

- Distribuya la armadura requerida en forma tan exacta como sea práctico respecto de la distribución de momentos. No es importante seguir los porcentajes estrictos siempre que se cumpla con el área total de armadura necesaria. Por ejemplo, para la faja de diseño que se muestra en la Fig. 2.4-1, la armadura en la sección correspondiente con cara de la columna en la línea 2 deberá concentrarse en la región de la columna, mientras la distribución deberá ser esencialmente uniforme en la sección del centro, entre las líneas 1 y 2.
- En las columnas exteriores de una losa apoyadas sobre columnas, ubique toda la armadura dentro de la región de columnas. En las columnas interiores coloque la mayor parte de la armadura dentro de la región de columnas. El ancho de la región de columnas se deberá basar en el buen juicio ingenieril; generalmente, la mitad del ancho del tributario resulta ser un valor razonable.
- En todo lugar, a lo largo de la faja de diseño, tanto respecto del área como de la separación entre barras, la armadura debe ser por lo menos igual a la requerida por reglamento por temperatura y contracción.

### 2.5.2 Entrepisos Postensados

El layout de la armadura de acero común y postensado dentro de una sección de diseño es más flexible para los entrepisos postensados que para los entrepisos no pretensados. En (Aalami, 2000) se brinda un informe detallado del layout de refuerzo para sistemas de entrepisos postensados. A continuación se brindan los lineamientos principales para las losas postensadas en dos direcciones. Detalles adicionales se pueden consultar en el código (ACI-318,1999).

- Coloque una armadura superior de acero común en ambas direcciones en las bandas sobre las columnas. Estas bandas son típicamente más angostas que las regiones de columnas utilizadas para entrepisos no pretensados.
- Coloque la armadura inferior de acero común donde resulte conveniente para la construcción.
- Coloque los cables postensados donde resulte conveniente siempre que hayan por lo menos dos cables sobre las columnas en ambas direcciones, y el espaciamiento de los cables en una dirección (la dirección "uniforme") no sea superior a ocho veces el espesor de la losa.
- Provea acero común o una combinación de acero común y pretensado a fin de controlar la fisuración por

temperatura y contracción donde la compresión promedio sea inferior que un valor mínimo (aprox. 0,7 MPa).

### 2.5.3 Determinación de la Armadura Adicional de Acero Común (Armadura Pasiva)

El Detallado Estructural también incluye la determinación del acero de refuerzo adicional necesario tanto para el control de la fisuración como para el desarrollo de las trayectorias de distribución de cargas. Parte del acero adicional, por ejemplo el acero de ajuste alrededor de pequeñas aberturas, puede ser incluido en planos de detalles típicos. Sin embargo, en general el acero adicional debe ser determinado por un ingeniero con un buen conocimiento de como responderá la losa a todas las condiciones de carga posibles. Se necesita tanto experiencia como buen juicio ingenieril.

Típicamente, se requiere acero adicional sobre cualquier apoyo que no sea parte de una trayectoria de distribución de cargas seleccionada. Además, bajo cargas concentradas se requiere normalmente una armadura de distribución perpendicular al refuerzo primario. En entrepisos postensados puede ser necesario acero común adicional en áreas donde las restricciones de acceso o la geometría inusual dificultan la provisión de suficiente postensado.

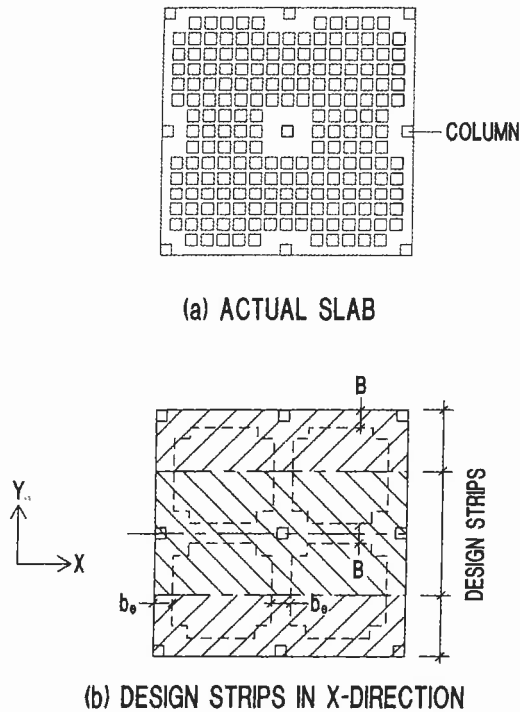
### 2.6 Losas Casetonadas

Las losas casetonadas postensadas (Fig. 2.6-1) brindan una economía adicional en los casos en que se dispone fácilmente de encofrados adecuados y el hormigón es relativamente caro. Las losas casetonadas se diseñan utilizando el concepto de selección de las trayectorias de distribución de cargas anteriormente tratado. Si se utiliza un método de análisis como Pórtico, cada faja de diseño se representa mediante una geometría idealizada según se muestra en la Fig. 2.6-1 (b). La geometría idealizada tiene la misma área y momento de inercia que la estructura real en la dirección del pórtico y tiene aproximadamente la misma rigidez a la torsión en la dirección perpendicular.

Cuando se utiliza el análisis por Elementos Finitos existen dos opciones. Se puede modelar fehacientemente el sistema de piso con cada casetón representado por su verdadera geometría. En forma alternativa, los nervios del casetón se pueden agrupar y ubicar a lo largo de las líneas de apoyo, para representar la misma área, momento de inercia y módulos resistentes que la estructura real (Fig. 2.6-2). Cuando se utiliza la segunda opción, a los efectos del diseño, los cables pretensados se colocan junto con los nervios agrupados a lo largo de las líneas de apoyo.

El layout de los cables en la construcción de losas casetonadas sigue el mismo procedimiento general que

ADP-728



WAFFLE SLAB MODELING OPTION

Figura 2.6.1

en las losas macizas. El procedimiento preferido es colocar un mínimo de un cable en cada nervio de casetón en una dirección. En la dirección perpendicular los cables se reúnen a lo largo de las líneas de apoyo. A diferencia del layout de cables típico para las losas macizas, también se utiliza mucho la distribución uniforme de los cables en los nervios de los casetones en ambas direcciones.

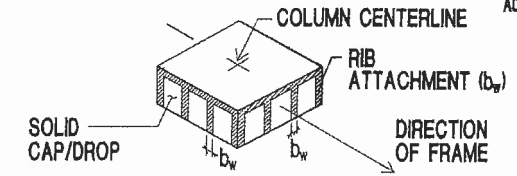
En el Anexo A se dan las dimensiones del modelo estructural para una losa casetonada.

Resumen

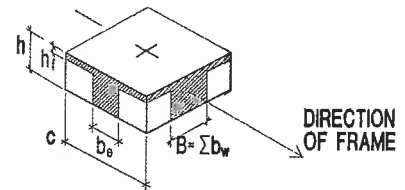
Las características claves del proceso de diseño de entreentrepisos de hormigón, son las siguientes:

- Existen tres métodos de análisis comúnmente utilizados: El método del Pórtico Simple, el método del Pórtico Equivalente y el método de los Elementos Finitos. El método del Pórtico Equivalente es un refinamiento del método del Pórtico Simple que reduce la rigidez de las columnas para tener en cuenta la flexión biaxial de la placa.
- Independientemente del método de análisis utilizado, el sistema de entrepisos debe pasar por una etapa del

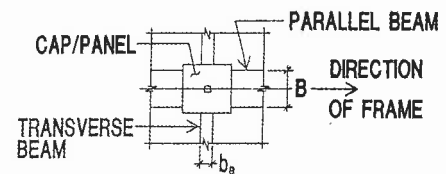
ADP-728



(a) THREE WAFFLE SOLID SUPPORT CAP



(b) IDEALIZED RIB ATTACHMENTS



(c) PLAN OF IDEALIZED STRUCTURAL MODEL

STRUCTURAL MODELING OF WAFFLE UNITS

Figura 2.6.2

modelado estructural, en la que deben seleccionarse las "Trayectorias de Distribución de Cargas para el Diseño". Estas trayectorias se deben seleccionar antes de realizar el análisis por el método del Pórtico Simple o Equivalente, pero se pueden seleccionar indistintamente antes o después de un análisis por Elementos Finitos.

- De acuerdo con las trayectorias seleccionadas de distribución de cargas se seleccionan las fajas de diseño. Los momentos y esfuerzos de corte que deben ser resistidos por cada faja de diseño son el resultado de esta etapa de análisis.
- En la etapa del diseño se calcula la integral de los momentos en cada sección de diseño para determinar la armadura necesaria.
- Luego del cálculo de la armadura necesaria sigue el "Detallado Estructural" que garantiza la serviciabilidad y la validez del concepto del diseño.

Los tres métodos de análisis son variaciones del experimentado "método de la faja" que requiere seleccionar un campo de tensiones estáticamente admisible que satisfaga el equilibrio. De este modo, los tres métodos conducen a una solución segura de acuerdo con el

Teorema Estático de la Plasticidad. Resulta esencial para la automatización del diseño de entrepisos de hormigón, el reconocimiento de los aspectos comunes a los tres métodos de diseño, en particular la necesidad de seleccionar "trayectorias de distribución de cargas".

### 3 CONCLUSIONES

Se trataron y compararon con el diseño utilizando otros materiales los aspectos característicos del diseño de entrepisos de hormigón. Se concluyó que la selección de una trayectoria de distribución de cargas es un requisito para el diseño de un entrepiso de hormigón. Utilizando los conceptos experimentales del método de la faja, se demostró que puede automatizarse la selección de las trayectorias de distribución de cargas, y por consiguiente el diseño de los entrepisos.

Sin embargo se requiere que la parte automatizada del diseño sea seguida por el Detallado Estructural. El Detallado Estructural implica ajustes en la posición de la armadura principal calculada y la colocación de una eventual armadura adicional necesaria para la validez del concepto de diseño. De este modo, depende, en alto grado, del buen juicio ingenieril. Se brindaron lineamientos para el Detallado Estructural tanto de entrepisos pretensados como no pretensados.

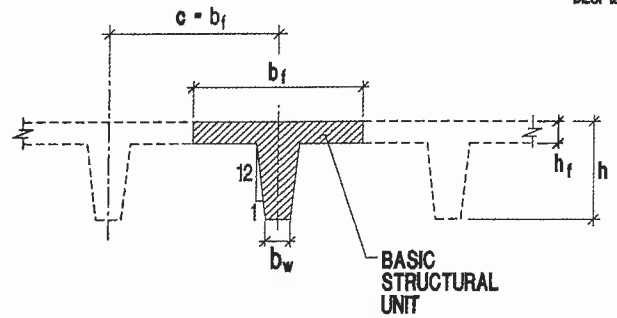
### 4 REFERENCIAS

- Aalami,B. "Layout of Post-Tensioning and Passive Reinforcement in Floor Slabs," Post-Tensioning Institute, Phoenix, AZ, Technical Notes, Issue 8, April 2000,pp.12.
- Aslami,B., and Bommer,A., "Design Fundamentals of Post-Tensioned Concrete Floors," Post-Tensioning Institute,Phoenix, AZ,pp.184,1999
- Aalami,B., and Kelley,G., "Structural Design of Post-Tensioned Floors," Concrete International, V.23, No. 1, January 2001
- ACI 318-99 (1999) "Building Code Requirements for Structural Concrete," American Concrete Institution, Detroit,M.I.,1999
- Bathe, K.J. (1982) Finite Element Procedures in Engineering Analysis, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J.
- Zienkiewicz,O.C. and Taylor, R.L. (1989) The Finite Element Method, Vol 1,4<sup>th</sup> ed.,McGraw-Hill, New York.

### ANEXO A

En la Fig. A-1 se muestra un corte transversal de una losa casetonada. Para el diseño, la losa casetonada se idealizó según se ilustra en las Figuras 2.6-1 (b) y 2.6-2.

El ancho de la viga en la dirección del análisis,  $B$ , es la suma de los nervios de los casetones y de cualquier



### CROSS-SECTION OF A WAFFLE SLAB

Figura A.1

otra región sólida. En la dirección transversal, se crea un miembro de torsión agrupando todos los nervios que se unen al bloque de la columna sólida en un rectángulo con ancho efectivo,  $b_e$ .

Se modela la región de apoyo en la columna según se muestra en la Fig.2.6-2(b) con una vista en planta en la Fig. 2.6-2(c). Se determina el ancho efectivo,  $b_e$  a fin de suministrar una rigidez torsional igual a la suma de las rigideces individuales de los nervios que llegan al bloque sólido en correspondencia con la columna. El ancho efectivo  $b_e$  del miembro de torsión, se determina usando el supuesto de que el miembro de torsión equivalente consiste de un ala relativamente delgada ( $c$ ,  $h_f$ ) y un alma delgada ( $b_e, h-h_f$ ). La constante de torsión de cada uno de los rectángulos componentes es un tercio de su longitud por su espesor al cubo.

La rigidez de torsión,  $J$ , de la losa real está dada por:

$$J = (ch_f^3/3) + \sum [(h-h_f)b_w^3]/3 \quad (1)$$

Dependiendo de la relación ancho/altura del modelo estructural, una de las dos ecuaciones siguientes se utiliza para calcular  $b_e$ , el ancho del miembro de rigidez de torsión equivalente:

$$(i) \quad \text{Si } b_e < (h-h_f) \\ J_e = (ch_f^3/3) + b_e^3(h-h_f)/3 \quad (2)$$

Haciendo  $J_e$  es igual a  $J$  [Eq. (1)] y resolviendo para  $b_e$  se obtiene:

$$b_e = (\sum b_w^3)^{1/3} \quad (3)$$

$$(ii) \quad \text{Si } b_e > (h-h_f) \\ J_e = (ch_f^3/3) + b_e(h-h_f)^3/3 \quad (4)$$

Estableciendo que:

Haciendo  $J_e$  es igual a  $J$  [Eq. (1)] y resolviendo para  $b_e$  se obtiene:

$$b_e = \sum b_w^3 / (h-h_f)^2 \quad (5)$$

Las dimensiones se muestran en la Fig. A-1 (E)