

Hormigón Prefabricado

CONSIDERACIONES GENERALES

Para el Código 1995 el Capítulo 16 se rescribió por completo. Las ediciones anteriores del Código se orientaban en gran medida hacia el comportamiento. El nuevo Capítulo 16 es más prescriptivo, aunque quizás sea más adecuado utilizar el término "instructivo", ya que le proporciona al diseñador muchos más lineamientos para las estructuras que incorporan elementos de hormigón prefabricado. Pero el Capítulo 16 no sólo contiene más requisitos y lineamientos, sino que además el Comentario contiene alrededor de veinticinco referencias, a diferencia de las cuatro incluidas en el Código 1989. La intención es alentar al diseñador a maximizar el aprovechamiento de la literatura disponible.

El aumento de la cantidad de material instructivo es más evidente en el artículo 16.5, Integridad Estructural. Los primeros requisitos para integridad estructural se introdujeron en el artículo 7.13 del Código 1989. Para las construcciones prefabricadas, este artículo sólo requería proveer estribos cerrados de tracción en las tres direcciones ortogonales (dos horizontales y una vertical) y alrededor del perímetro de la estructura, y no contiene muchos otros lineamientos. Luego, para las estructuras con muros portantes de hormigón prefabricado se incluyó la Referencia 23.1. Las recomendaciones encontradas en dicha referencia ahora han sido codificadas en el artículo 16.5.2. El artículo 16.5.1 se aplica fundamentalmente a las estructuras con elementos de hormigón prefabricado que no constituyen tabiques portantes y, como en el caso de la mayor parte de los nuevos requisitos del Capítulo 16, refleja las prácticas utilizadas por la industria desde hace tiempo. Observar que las estructuras con elementos izados ("tilt-up") también son una forma de hormigón prefabricado. La Referencia 23.3 trata específicamente todas las fases del diseño y la construcción de las estructuras con elementos izados.

16.2 REQUISITOS GENERALES

El código exige que los elementos prefabricados y sus uniones se diseñen para "...todas las condiciones de carga y vinculación a las que estarán sometidos, desde su fabricación inicial hasta su ubicación final en obra..." Con frecuencia, especialmente en el caso de los paneles de tabiques, las condiciones durante la manipulación son mucho más severas que aquellas que el elemento experimentará en servicio. Por este motivo, y también porque las prácticas y los detalles varían mucho de un fabricante a otro, los elementos de hormigón prefabricado generalmente son diseñados por ingenieros especializados contratados por el fabricante. Luego la documentación técnica se le presenta al proyectista estructural para su aprobación (16.2.4). El mismo procedimiento se sigue para el diseño de las uniones. Para obtener mayor información sobre la relación entre el proyectista estructural y el ingeniero especializado, ver las Referencias 23.4 y 23.5.

Como se dijo anteriormente, a partir de la edición 1995 el código alienta el uso de otras publicaciones para el diseño de estructuras con elementos de hormigón prefabricado. Las Referencias 23.2, 23.6 y 23.7 le serán de particular ayuda el diseñador. De estas publicaciones, la más utilizada es la Referencia 23.7, *PCI Design Handbook*.

El artículo 16.2.3 establece que es necesario especificar tolerancias admisibles. Esto generalmente se hace por referencia a documentos utilizados en la industria^{23.8,23.9,23.10}, como se observa en el comentario. El diseño de los elementos prefabricados y sus uniones es particularmente sensible a las tolerancias. Por lo tanto, éstas se deben especificar en los documentos contractuales junto con las resistencias requeridas del hormigón en las diferentes etapas de la construcción [16.2.4(b)].

16.3 DISTRIBUCIÓN DE LOS ESFUERZOS ENTRE LOS ELEMENTOS

El artículo 16.3.1 se ocupa de la distribución de los esfuerzos que son perpendiculares al plano de los elementos. La mayoría de las investigaciones a las cuales se hace referencia se relacionan con losas huecas, y también son aplicables a las losas macizas conectadas mediante juntas hormigonadas. Luego de largo tiempo se ha concluido que los elementos que están unidos entre sí por otros medios, como por ejemplo por medio de placas soldadas a las dobles T, son capaces de distribuir cargas concentradas a los elementos adyacentes. Para los propósitos del diseño, es habitual asumir que hasta 25% de una carga concentrada se puede transmitir a cada elemento adyacente, y por lo tanto las uniones se deben diseñar de conformidad con esto. Debido a que la transmisión de cargas depende de la compatibilidad de las deformaciones, cerca del apoyo hay menos distribución, como se ilustra en la Figura 23-1(a) para losas huecas. Las alas de las doble T también se diseñan para distribución transversal de la carga en un ancho efectivo como se ilustra en la Figura 23-1(b). Aunque es posible que otros tipos de tablero no sigan el mismo esquema (debido a sus propiedades torsionales), los mismos principios son aplicables. En el Ejemplo 23.1 se presenta un ejemplo típico de diseño.

La compatibilidad de las deformaciones de las unidades o elementos adyacentes es una consideración importante para el diseño. Por ejemplo, en el carril de circulación de un tablero construido con dobles T de hormigón prefabricado, aún cuando la resistencia de cada elemento sea adecuada para soportar la totalidad de la carga de rueda, no es deseable que dicha unidad se deforme de manera independiente del resto. Una práctica habitual en estos casos consiste en utilizar uniones menos separadas, de manera de asegurar la distribución de la carga y eliminar las deformaciones diferenciales entre los elementos.

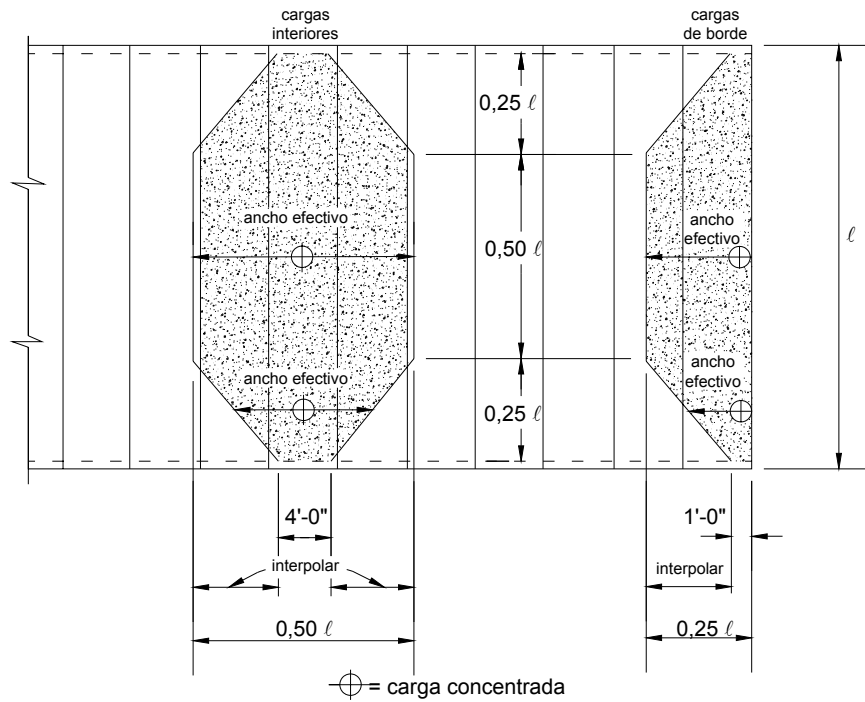
El artículo 16.3.2 se ocupa de la distribución de los esfuerzos en el plano. Este artículo requiere que para estos esfuerzos haya un recorrido de cargas continuo. Si estos esfuerzos son de tracción, deben ser resistidos mediante una conexión continua de acero o mediante armadura de acero. Como estas fuerzas en el plano generalmente son provocadas por cargas laterales tales como el viento o los movimientos sísmicos, prácticamente la totalidad del recorrido de cargas continuo debe ser proporcionado por el acero o por la armadura de acero. En este sentido, la armadura y las conexiones diseñadas de manera de satisfacer los requisitos de esta sección pueden también proveer los estribos continuos requeridos por 16.5.

16.4 DISEÑO DE LOS ELEMENTOS

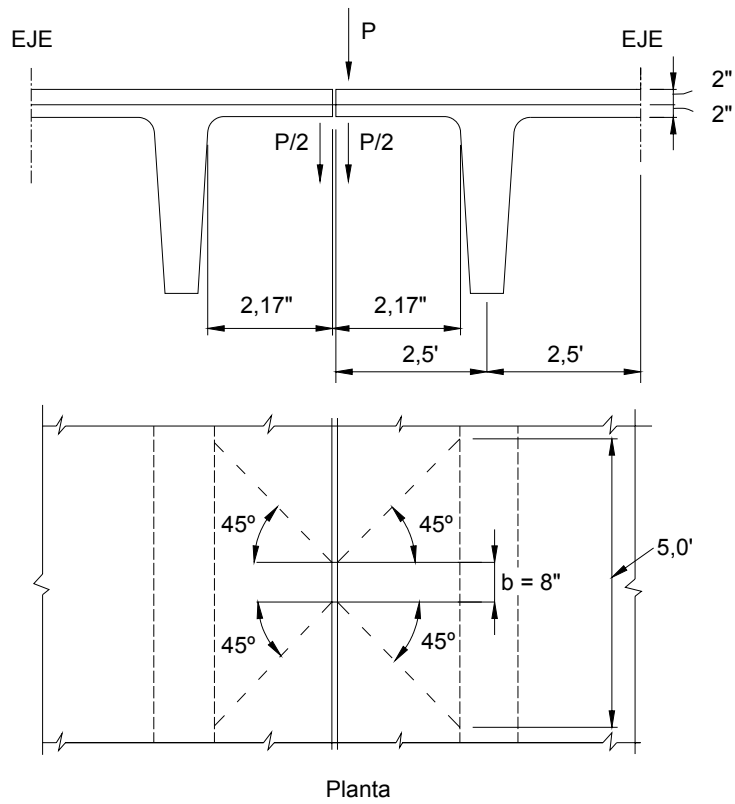
Esta sección se ocupa fundamentalmente de los requisitos de armadura mínima para los elementos prefabricados. El artículo 16.4.1 permite obviar los requisitos sobre armadura transversal en los elementos de hormigón prefabricado de 12 ft o menos de ancho, excepto cuando dicha armadura es requerida para resistir la flexión. En el comentario se observa, a título de ejemplo, que esta excepción no se puede aplicar al caso de las alas de las secciones I o T. La intención de esta sección es que se aplique fundamentalmente a las losas huecas y a las losas macizas en las cuales las conexiones transversales generalmente son juntas hormigonadas.

El artículo 16.4.2 reduce la armadura mínima de los tabiques prefabricados no pretensados con respecto de la requerida en el Capítulo 14 para los tabiques de hormigón armado colados en obra, a un valor igual a 0,001 por la sección transversal bruta del tabique, de acuerdo con la práctica habitual de la industria. Esto reconoce el hecho de que gran parte de la contracción de los elementos prefabricados se produce antes de su colocación en la estructura. En los tabiques prefabricados, la separación de la armadura debe ser como máximo 5 veces el espesor del tabique o 30 in. para el caso de tabiques interiores, o 18 in. para tabiques exteriores.

Si los paneles de tabique son portantes, éstos generalmente se diseñan como elementos comprimidos de acuerdo con los requisitos establecidos en el Capítulo 10. Cuando los tabiques no son portantes (y muchas veces aún cuando lo son), las tensiones que se producen durante la manipulación generalmente resultan críticas. En estos casos una práctica habitual consiste en ubicar los puntos de izaje y estiba de manera que las tensiones durante la manipulación no superen el módulo de rotura (más un factor de seguridad), especialmente en el caso de los paneles prefabricados para uso arquitectónico. Si es probable que se produzca fisuración será necesario colocar armadura para controlar la fisuración que satisfaga los requisitos del artículo 10.6.4.



(a) Losa hueca



(b) Doble T

Figura 23-1 – Distribución de carga supuesta^{23.7}

16.5 INTEGRIDAD ESTRUCTURAL

La intención de los requisitos del artículo 16.5.1 es asegurar que haya un recorrido de carga continuo entre cada elemento prefabricado y el sistema resistente a las cargas laterales. El comentario presenta varios ejemplos de cómo lograrlo. El artículo 16.5.1.2 se adoptó de un requisito similar contenido en el Código de Construcción Uniforme (UBC), tal como se explica en el comentario.

El artículo 16.5.1.3 contiene requisitos para los estribos verticales de tracción. El requisito para columnas especificado en el artículo 16.5.1.3(a) se aplica no sólo a las uniones entre columnas y zapatas, sino también a uniones tales como los empalmes de columnas. El requisito que establece que cada panel debe tener un mínimo de dos estribos con una resistencia mínima de 10.000 lb cada uno indicado en el artículo 16.5.1.3(b) se tomó del Manual de Diseño PCI^{23.7}, y es el equivalente numérico de una unión habitual utilizada en la industria del hormigón prefabricado desde hace muchos años. Este es estrictamente un valor empírico, y sólo se debe aplicar a las dimensiones de los herrajes de la unión, sin incluir las excentricidades en el diseño. El artículo 16.5.1.3(c) permite que esta unión se haga a una losa de piso de hormigón armado, lo cual es habitual en las construcciones con elementos izados.

El artículo 16.5.2 básicamente codifica algunas de las recomendaciones de la Referencia 23.11, y contiene valores numéricos para los estribos cerrados de tracción en las estructuras con tabiques portantes de hormigón prefabricado. Este informe se basa en una serie de ensayos realizados en los laboratorios de la Portland Cement Association^{23.12} a fines de la década del 70.

16.6 DISEÑO DE LAS UNIONES Y DE LOS APOYOS

El artículo 16.6.1 lista las diferentes maneras en las cuales se pueden conectar los elementos prefabricados, y luego permite diseñar mediante análisis o ensayos. Se menciona especialmente la sección 11.7, Corte por Fricción, ya que ésta es una herramienta de análisis y diseño muy utilizada. Ver el Capítulo 16 de este documento. Las Referencias 23.7 y 23.6 también contienen ejemplos de la aplicación del procedimiento de diseño aplicando corte por fricción.

El artículo 16.6.2 describe varias consideraciones que son importantes al diseñar elementos de hormigón prefabricado al aplastamiento. Las longitudes mínimas de apoyo indicadas en 16.6.2.2(a) son particularmente importantes. Se debe destacar que estos son valores mínimos, y que la estructura se debe detallar con longitudes de apoyo significativamente mayores de manera de considerar las tolerancias en la colocación. El artículo 16.6.2.3 aclara que no es necesario que la armadura para momento positivo se prolongue fuera del extremo del elemento, siempre que llegue al menos hasta el centro del apoyo.

16.7 ELEMENTOS INCORPORADOS AL HORMIGÓN LUEGO DE SU COLOCACIÓN

En las fábricas de elementos de hormigón prefabricado, hace tiempo que es práctica habitual incorporar ciertos elementos al hormigón una vez que éste ha sido colado. Esta sección reconoce esta práctica y constituye una excepción a los requisitos del artículo 7.5.1. Las condiciones que se deben satisfacer para poder introducir elementos en el hormigón mientras aún está en estado plástico son: (1) el elemento introducido no necesariamente se debe vincular a la armadura dentro del hormigón, (2) el elemento introducido se debe mantener en la posición correcta mientras el hormigón esté en estado plástico, y (3) el hormigón se debe compactar adecuadamente alrededor de cada elemento incorporado.

16.8 MARCAS DE IDENTIFICACIÓN

El propósito de las marcas de identificación colocadas en los elementos de hormigón prefabricado es simplificar la construcción y evitar errores de colocación. Cada elemento prefabricado debe tener una marca que indique su fecha de fabricación, y debe estar identificado de acuerdo con los planos de montaje.

16.9 MANIPULACIÓN

Esta sección enfatiza nuevamente el requisito general del artículo 16.2.1. El diseño de los elementos de hormigón prefabricado debe considerar los esfuerzos y deformaciones que se producen durante la manipulación. Los planos de obra o los planos de montaje deben especificar los pasos del montaje y los herrajes requeridos para cada paso.

16.10 EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA DE LAS ESTRUCTURAS PREFABRICADAS

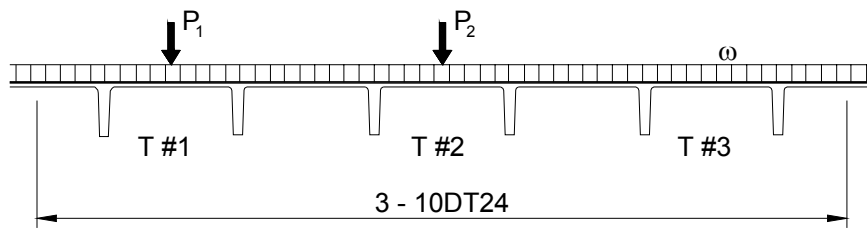
Siempre es deseable, y por cierto más seguro y más económico, ensayar un elemento de hormigón prefabricado sobre el cual existen dudas antes de incorporarlo a la estructura. Esta nueva sección describe cómo los requisitos del Capítulo 20 se pueden aplicar a este caso. Los ensayos de carga especificados en el artículo 20.3.2 se deben calibrar de manera de simular la porción de carga soportada por el elemento sobre el cual existen dudas cuando éste se encuentra en su posición final. Los criterios de aceptación del artículo 20.5 se aplican al elemento prefabricado en forma aislada.

REFERENCIAS

- 23.1 PCI Committee on Building Code and PCI Technical Activities Committee, "Proposed Design Requirements for Precast Concrete," *PCI Journal*, V. 31, No. 6, Noviembre-Diciembre 1986, pp. 32-47.
- 23.2 ACI Committee 550, "Design Recommendations for Precast Concrete Structures," (ACI 550R-96, Reaprobado 2000). American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 1996. También en *ACI Manual of Concrete Practice*, Parte 6.
- 23.3 ACI Committee 551, "Tilt-Up Concrete Structures," (ACI 551R-92, Reaprobado 1997), American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 1992. También en *ACI Manual of Concrete Practice*, Parte 6.
- 23.4 The Case Task Group on Specialty Engineering, "National Practice Guidelines for Specialty Structural Engineers," Council of American Structural Engineers, Washington, DC, 1994, pp. 11.
- 23.5 ACI Committee on Responsibility in Concrete Construction, "Guidelines for Authorities and Responsibilities in Concrete Design and Construction," *Concrete International*, Vol. 17, No. 9, Setiembre 1995, pp. 66-69.
- 23.6 "Design and Typical Details of Connections for Precast and Prestressed Concrete," MNL-123-88, 2° Ed., Precast/Prestressed Concrete Institute, Chicago, 1988, pp. 270.
- 23.7 "PCI Design Handbook – Precast and Prestressed Concrete," MNL-120-92, 5° Ed., Precast/Prestressed Concrete Institute, Chicago, 1999, pp. 630.
- 23.8 "Manual for Quality Control for Plants and Production of Precast and Prestressed Concrete Products," MNL-116-99, 4° Ed., Precast/Prestressed Concrete Institute, Chicago, 1999, pp. 340.
- 23.9 "Manual for Quality Control for Plants and Production of Architectural Precast Concrete," MNL-117-96, 3° Ed., Precast/Prestressed Concrete Institute, Chicago, 1996, pp. 226.
- 23.10 PCI Committee on Tolerances, "Tolerances for Precast and Prestressed Concrete," *PCI Journal*, V. 30, No. 1, Enero-Febrero 1985, pp. 26-112.
- 23.11 PCI Committee on Precast Concrete Bearing Wall Buildings, "Considerations for the Design of Precast Concrete Bearing Wall Buildings to Withstand Abnormal Loads," *PCI Journal*, V. 21, No. 2, Marzo-Abril 1976, pp. 18-51.
- 23.12 "Design and Construction of Large-Panel Concrete Structures," seis informes, EB100D, 1976-1980, pp. 762; tres estudios, EB102D, 1980, pp. 300; Portland Cement Association, Skokie, IL.

Ejemplo 23.1 – Distribución de las cargas en dobles T

Se requiere calcular los momentos y cortes mayorados para cada una de las tres dobles T de la siguiente cubierta:



Datos:

Dobles T = 10DT24 (peso propio = 468 lb/ft), $h = 24$ in.

Luz = 60 ft

Cargas: DL = 15 lb/ft²; LL = 30 lb/ft²

Carga permanente concentrada sobre la T #1, $P_1 = 20$ kips a 3 ft del apoyo izquierdo

Carga permanente concentrada sobre la T #2, $P_2 = 20$ kips en la mitad de la luz

Cálculos y discusión

Referencia del Código

1. Asumir que:

La carga permanente concentrada P_1 no se puede distribuir a las T adyacentes porque está próxima al apoyo.

La carga permanente concentrada P_2 se distribuye de la siguiente manera: 25 por ciento a las T adyacentes y 50 por ciento a la T que soporta la carga, es decir:

$$0,25(20 \text{ kips}) = 5 \text{ kips a la T \#1}$$

$$0,50(20 \text{ kips}) = 10 \text{ kips a la T \#2}$$

$$0,25(20 \text{ kips}) = 5 \text{ kips a la T \#3}$$

2. Cargas permanentes y sobrecargas uniformes mayoradas, para cada T

$$DL = 468 + 15(10 \text{ ft de ancho}) = 0,618 \text{ kip/ft}$$

$$LL = 30(10 \text{ ft de ancho}) = 0,30 \text{ kip/ft}$$

$$w_u = 1,2D + 1,6L$$

Ec. (9-2)

$$= 1,2(0,618) + 1,6(0,30) = 1,222 \text{ kip/ft}$$

3. Momentos y cortes mayorados para la T #1

Carga permanente concentrada mayorada próxima al apoyo = $1,2(20) = 24$ kips

Carga permanente concentrada mayorada en la mitad de la luz = $1,2(5) = 6$ kips

$$w_u = 1,222 \text{ kip/ft}$$

$$\text{Reacción en el apoyo izquierdo} = \frac{57}{60}(24) + \frac{6}{2} + \frac{1,222(60)}{2} = 62,46 \text{ kips}$$

Para los elementos de hormigón pretensado, diseñar al corte a una distancia $h/2$

11.1.3.2

$$V_u (\text{izq.}) = 62,46 - 1,222 = 61,24 \text{ kips}$$

$$\text{Reacción en el apoyo derecho} = \frac{3}{60}(24) + \frac{6}{2} + \frac{1,222(60)}{2} = 40,86 \text{ kips}$$

$$\text{A una distancia } h/2, V_u (\text{der.}) = 40,86 - 1,222 = 39,64 \text{ kips}$$

El máximo momento se da en el centro de la luz

$$M_u (\text{max}) = 40,86(30) - 1,222(30)(15) = 676 \text{ ft-kips}$$

4. Momentos y cortes mayorados para la T #2

$$M_u = \frac{w_u \ell^2}{8} + \frac{P\ell}{4}$$

$$= \frac{1,222(60)^2}{8} + \frac{1,2(10)(60)}{4} = 730 \text{ ft-kips}$$

$$\text{Máxima reacción} = \frac{w_u \ell}{2} + \frac{P}{2}$$

$$= \frac{1,222(60)}{2} + \frac{1,2(10)}{2} = 42,66 \text{ kips}$$

$$\text{A una distancia } h/2, V_u = 42,66 - 1,222 = 41,44 \text{ kips}$$

5. Momentos y cortes mayorados para la T #3

$$M_u = \frac{1,222(60)^2}{8} + \frac{1,2(5)(60)}{4} = 640 \text{ ft-kips}$$

$$\text{Máxima reacción} = \frac{1,222(60)}{2} + \frac{1,2(5)}{2} = 39,66 \text{ kips}$$

$$\text{A una distancia } h/2, V_u = 39,66 - 1,222 = 38,44 \text{ kips}$$

