

# Resistencia al esfuerzo cortante en entrepisos compuestos con losas huecas pretensadas y losa *in situ* de hormigón armado (*topping*)

NOEL IRAOLA VALDÉS

noel.iraola@reduc.edu.cu

Ingeniero civil. Profesor auxiliar de la Universidad de Camagüey.

RAFAEL LARRÚA QUEVEDO

rafael.larrua@reduc.edu.cu

Ingeniero civil. Profesor titular. Jefe del Grupo de Estructuras de la Universidad de Camagüey.

Artículo recibido: 15/09/2008

Evaluación: 18/09/2008

Aprobado: 14/10/2008

## Resumen

Los entrepisos compuestos con losas huecas pretensadas y losa de hormigón fundido *in situ* presentan características que los diferencian de otros sistemas compuestos de elementos de hormigón.

En las losas huecas pretensadas, obtenidas con mezcla de consistencia seca o técnica de vibrado y extrusado, el hormigón es forzado a pasar a través de la máquina y no es posible dejar conectores en éstas para el trabajo futuro de la sección compuesta, ni es recomendable colocarlos posteriormente en obra. Teniendo en cuenta lo anterior, en la práctica común el trabajo conjunto de la sección compuesta lo garantiza solamente la adherencia o cohesión entre los hormigones. Los entrepisos compuestos elaborados con estas losas se diferencian de otros sistemas donde se da algún tratamiento adicional a la superficie del elemento prefabricado para incrementar la rugosidad, se hacen llaves de cortante o se dejan conectores metálicos anclados.

En el artículo se ilustran algunas de las investigaciones más relevantes relacionadas con el cortante vertical y horizontal en las secciones compuestas, y se exponen consideraciones prácticas y criterios para el diseño, tomando en cuenta el análisis comparativo realizado según diferentes normativas y la variación de parámetros que inciden en la resistencia al esfuerzo cortante.

**Palabras claves:** entrepisos compuestos, losa hueca, hormigón prefabricado pretensado, losa de hormigón, esfuerzo cortante.

## Abstract

Composite floors with hollow core slabs and concrete topping have characteristics that differentiate them of other composite systems made up with concrete elements.

When the hollow core slabs are obtained by dry cast or extrusion system, a very low slump concrete is forced through the machine and is not possible to leave connectors in the same ones for the future work of the composite section, neither it is advisable to place them later. Keeping in mind the above-mentioned, in the common practice the structural work of the composite section is guaranteed by the adherence or cohesion among the concretes. This differentiates these composite floors of other composite systems where some additional treatment is given to the surface of the precast concrete element to increase the ruggedness, shear keys are made or metallic. In the article, some of the more outstanding investigations related with the vertical and horizontal shear in composite section were illustrated and general considerations and practical approaches were exposed starting from the carried out comparisons, keeping in mind different technical norms and the variation of parameters that impact in the shear strength resistance.

## INTRODUCCIÓN

Los entrepisos compuestos con losas huecas pretensadas y losa *in situ* presentan características propias que los diferencian de otros sistemas de estructuras compuestas de hormigón.

Cuando las losas huecas pretensadas se obtienen con técnica de vibrado y extrusado, debido a la propia tecnología de producción, no es posible dejar conectores en éstas para el trabajo futuro de la sección compuesta, ni es recomendable colocarlos posteriormente en obra. Teniendo en cuenta lo anterior, en la práctica común el trabajo conjunto de la sección compuesta lo garantiza solamente la adherencia o cohesión entre los hormigones. Esto diferencia los entrepisos compuestos con losas huecas pretensadas y losa *in situ* de otros sistemas donde se da algún tratamiento adicional a la superficie del elemento prefabricado para incrementar la rugosidad, se hacen llaves de cortante o se dejan conectores anclados.

Aunque en las losas huecas pretensadas generalmente los bordes laterales tienen una llave de cortante, se considera que ésta colabora en la transmisión de las cargas de una losa a otra, pero no garantiza el trabajo conjunto de la losa de hormigón *in situ* con la losa prefabricada (figura 1).

Las investigaciones realizadas para el estudio del cortante vertical a losas huecas pretensadas resultan válidas para el tipo de estructura objeto de estudio, porque el mecanismo de fallo sigue siendo el mismo y las expresiones generales para este estado límite se mantienen, siempre que se conserve la conexión en la interfase. Muchos estudios han estado encaminados específicamente a determinar la capacidad resistente de la conexión entre hormigón prefabricado y hormigón fundido *in situ*.

En el año 1960, el comité ACI-Asce 333 (ACI-Asce committee 333, 1960) reporta ensayos a 78 vigas-losas

compuestas, entre las que se encontraban tres vigas-losas sin armadura de cosido y se obtuvo un valor mínimo de tensión resistente en la interfase de 1,08 MPa para superficies lisas y 2,7 MPa para superficies rugosas. No obstante, a los resultados obtenidos el ACI 318-63 asume 0,27 MPa para superficies lisas con armadura de cosido y para superficies rugosas sin armadura de cosido, y 1,1 MPa para superficies rugosas con armadura de cosido. Estos valores se consideraron con un margen de seguridad excesivo, según se expresa en el boletín de asociados de la Corporación de Tecnología del Hormigón de Estados Unidos (CTA 76-B4, 1976).

Más adelante, en el código ACI 318-71 se establece 0,55 MPa como valor admisible para superficies limpias intencionalmente rugosas. Este valor es el que se mantiene hasta la actualidad en el código ACI.

La Corporación de Tecnología del Hormigón (CTC) establece en uno de sus boletines (CTA 76-B4, 1974) tres tipos de superficies y sus correspondientes valores admisibles de tensión, como resultados de ensayos realizados. Establece 0,62 MPa para superficies lisas, 1,1 MPa para superficies intermedias y 2,0 MPa para superficies rugosas. Considera superficies intermedias las obtenidas por una de las siguientes formas: por vibración o terminada con frota de madera o cepillado, que provoque ranuras de hasta 1,5 mm de profundidad.

Los experimentos realizados por Dashner a piezas compuestas con diferentes tratamientos en la interfase constituyen la base de las recomendaciones y expresiones que aparecen en el Código de Buena Práctica de la Federación Internacional de Pretensado (FIP, 1998).

Recientes ensayos a piezas compuestas realizados en España (Aragón, 2007) demostraron que para piezas compuestas con hormigón seco y vibrado intenso, la capacidad de la conexión es superior a 0,60 MPa.

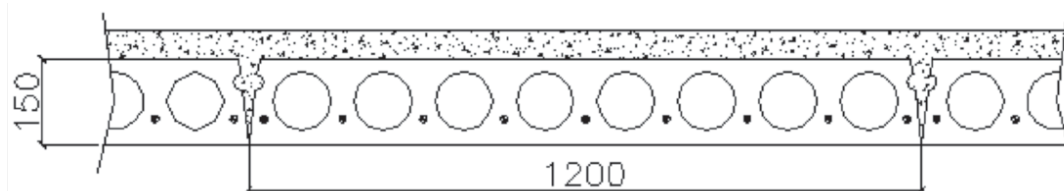


Figura 1. Tipo de sección transversal de entrepiso compuesto.

Las investigaciones realizadas por Scott (1973) se destacan entre los primeros trabajos sobre losas compuestas con losas huecas pretensadas y losa *in situ*. En éstas se analiza el trabajo conjunto de la sección compuesta hasta la falla por cortante del alma en la zona cercana al apoyo de las losas.

En 1991, Ueda y Boonchai retoman las investigaciones de Scott y realizan ensayos a diez losas compuestas con losas huecas pretensadas extrusadas de 15 cm de altura, huecos circulares y sin tratamiento adicional a la superficie, para realizar una evaluación general del cortante (Ueda y Boonchai, 1991). Existió una buena correspondencia para el cortante vertical entre los valores teóricos obtenidos por las expresiones del ACI de 1983, la norma japonesa JSCE de 1986 y los resultados de los ensayos realizados. En ningún caso hubo evidencias de fallo en la interfase.

En Europa se ha desarrollado un amplio programa de investigaciones sobre losas huecas y sus aplicaciones (Pajari, 1989; Girhammar, 1992; Girhammar y Pajari, 1995).

Gran relevancia han tenido los estudios realizados por Yang (1994), quien demuestra que existe buena correspondencia entre los resultados de los ensayos y el cortante resistente calculado según el Eurocódigo 2 en las zonas alejadas del apoyo donde se combinan el cortante y el momento; sin embargo, encuentra gran dispersión y no concordancia entre los resultados obtenidos en los ensayos y las expresiones normadas para el cortante en la zona de apoyo de las losas; por esta razón propone una expresión para el cortante que difiere de la expresión del Eurocódigo 2.

Pajari realiza ensayos para contrastar los resultados con la expresión que aparece en el Eurocódigo 2 y la expresión propuesta por Yang (Pajari, 2005). Como conclusión de sus trabajos propone realizar modificaciones futuras en las expresiones del Eurocódigo 2 y la norma europea de losas huecas (EN 1168-2005), teniendo en cuenta la expresión de Yang, aplicando además algún coeficiente de calibración a partir de un mayor número de ensayos. Plantea esto debido a que la expresión del Eurocódigo 2 y la EN 1168, para losas con peraltos de 260 mm o mayores, y huecos no circulares, queda en forma muy clara del lado de la inseguridad, mientras que la expresión de Yang se ajusta mejor a los resultados obtenidos.

En investigaciones recientes realizadas en Estados Unidos por Hawkins y Ghosh (2006) se llega prácticamente a las mismas conclusiones que las enunciadas por Pajari en el 2005.

En el año 2007 continúan las investigaciones del programa europeo con las investigaciones de Girhammar y Pajari (Girhammar y Pajari, 2007), donde se demuestra el buen comportamiento al cortante de losas compuestas con losas huecas pretensadas extrusadas sin tratamiento adicional de la superficie, presentándose la falla en la pared de las losas prefabricadas antes que en la interfase. Demostraron además que la adherencia en la interfase es muy superior a lo aceptado en las normas para este tipo de estructuras.

El cúmulo de investigaciones hechas ha permitido el desarrollo y perfeccionamiento de las expresiones en los documentos normativos y han incidido en el caudal de conocimientos acumulados sobre esta temática.

En el presente trabajo se ha realizado un análisis comparativo y se exponen criterios generales sobre el diseño, tomando en cuenta los resultados obtenidos según las expresiones que aparecen en los documentos normativos y la incidencia de diferentes parámetros en el comportamiento al cortante de las losas compuestas.

## ANÁLISIS COMPARATIVO Y CONSIDERACIONES DE DISEÑO

### Cortante vertical

La sección compuesta que se analiza, para facilitar los cálculos según los estados límites últimos, puede ser equivalente a una sección "T", en la que el ala superior tiene mayor espesor y está compuesta por dos hormi-gones de diferentes edades y características. El ancho del total del alma ( $b_0$ ) está dado por la suma de las paredes entre huecos de la losa prefabricada (figura 2).

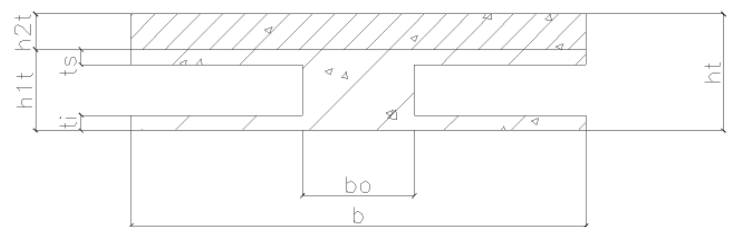


Figura 2. Sección simplificada de la losa compuesta.

El diseño por cortante vertical se realiza para los diversos criterios de fallo; tanto en la sección cercana al apoyo a una distancia igual a la mitad de la altura total  $h_t/2$ , donde el cortante es máximo y el momento prácticamente nulo, así como en secciones más alejadas del apoyo en que se ha producido toda la transferencia de la fuerza de pretensado y se combinan valores de cortante y momento considerables. En el caso específico de la sección ubicada en la zona cercana al apoyo, donde no se ha producido generalmente toda la transferencia de la fuerza de pretensado, rige el criterio de diseño por tracción excesiva del alma de la losa prefabricada.

Para el cálculo del cortante vertical, las instrucciones EHE-2002, el código CEB-FIP-1990 y el Eurocódigo 2:2004 utilizan básicamente las mismas formulaciones.

La expresión tiene un enfoque analítico del problema:

$$V_d = \frac{b_w * I_o}{S_o} \sqrt{f_{ctd} + \alpha f_{ctd} \sigma_{cp}} \geq V \quad (1)$$

Con:

$V_d$  = cortante de diseño (MN).

$V$  = cortante actuante mayorado (MN).

$b_w$  = ancho del alma de la losa (m).

$I_o$  = inercia de la sección ( $m^4$ ).

$S_o$  = momento estático con respecto al centroide elástico de la sección compuesta ( $m^3$ ).

$f_{ctd}$  = resistencia a tracción de diseño del hormigón (MPa).

$\sigma_{cp}$  = tensión al nivel del eje centroidal en la losa compuesta en la sección analizada (MPa).

$\alpha$  = coeficiente que tiene en cuenta la transferencia parcial del pretensado a una distancia dada del extremo de la losa prefabricada.

El ACI 2005 presenta la siguiente formulación general empírica:

(2)

Con:

$f'_c$  = resistencia a compresión del hormigón (MPa).

$d$  = altura efectiva de la sección compuesta (m).

La norma cubana NC 207:2003 presenta básicamente el mismo enfoque del ACI, aunque usa en las expresiones la resistencia de cálculo del hormigón y, por

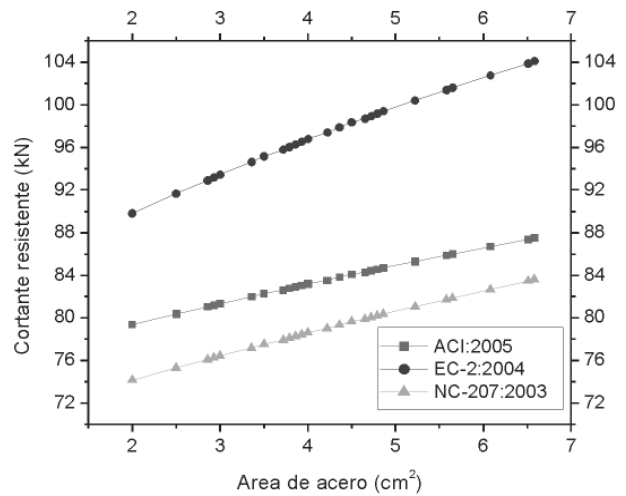


Figura 3. Cortante último resistente según diferentes normativas.

consiguiente, se hacen algunas correcciones en las fórmulas.

En el gráfico de la figura 5 se reflejan los valores de cortante resistente para una sección crítica a una distancia del apoyo igual a la mitad de la altura total. En los cálculos hechos se utilizaron las expresiones del Eurocódigo 2-2004, la norma cubana NC-207:2003 y del ACI-2005. La comparación se realizó para las losas de 15 cm de altura, seleccionadas del *Manual cubano de losas huecas pretensadas (Manual para el diseño y selección de losas huecas pretensadas extrusadas, 2007)*, muy similares por su geometría a las del *Manual de losas Ultra-Span de Canadá (Ultra-Span News. Another innovative product by UltraSpan)*. Para la conformación del entrepiso compuesto se adicionó una losa de 5 cm de espesor, con resistencia del hormigón de 20 MPa.

El análisis comparativo refleja que por las expresiones del Eurocódigo 2 se obtienen valores de cortante resistente superiores, comparados con los obtenidos por otras normativas. Otra tendencia evidente de la comparación hecha es que en la expresión del Eurocódigo 2 la fuerza de pretensado tiene ligeramente mayor incidencia en la capacidad resistente al cortante. Se puede observar en el gráfico cómo la curva del Eurocódigo 2 crece relativamente en mayor grado, a medida que se incrementa el área de acero de pretensado (aumento de la fuerza de pretensado).

**Tabla 1**  
Tabla comparativa de capacidad de carga por cortante resistente.

TIPOS DE LOSAS	NC-207:2003		EC 2-2004		ACI-2005		
	$V_R$ (kN) (kN/m <sup>2</sup> )	$q$	$V_R$ (kN) (kN/m <sup>2</sup> )	$q$	$V_R$ (kN) (kN/m <sup>2</sup> )	$q$	
LH-15-69	$h_{2t}=0,05m$	76,43	19,87	93,46	22,09	81,33	19,93
	$h_{2t}=0,075m$	84,83	22,05	106,20	25,10	92,46	22,66
LH-15-712	$h_{2t}=0,05m$	83,47	21,70	103,88	24,51	87,37	21,40
	$h_{2t}=0,075m$	91,18	23,70	115,71	27,30	96,05	23,53
LH-30-512	$h_{2t}=0,05m$	89,89	13,03	102,20	13,38	94,58	12,86
	$h_{2t}=0,075m$	94,64	13,72	106,19	14,44	100,60	13,68
LH-30-912	$h_{2t}=0,05m$	98,53	14,28	113,15	14,82	102,00	13,87
	$h_{2t}=0,075m$	101,93	14,78	116,12	15,21	107,20	14,58

- En los entresijos con LH-15 la carga se calculó para una luz de 5,0 metros y en los entresijos con LH-30, para 9,0 metros.
- El cortante se calculó a una distancia del apoyo de la mitad de la altura de la sección compuesta.
- Se realizaron los cálculos para las siguientes relaciones de cargas:  
60% carga permanente + 40% carga temporal.
- Se utilizó hormigón para la losa *in situ* de  $f'c = 20$  MPa y las losas prefabricadas del *Manual cubano*.
- Se utilizaron los coeficientes correspondientes a un control normal de ejecución y tipo de fallo grave.
- Se usaron los coeficientes de carga correspondientes a cada norma.
- La simbología empleada fue la siguiente:

$h_{2t}$  = espesor de la losa *in situ*.

$V_R$  = cortante resistente de la sección, tomado para 1,20 m de ancho.

$q$  = carga característica.

En la tabla 1 se comparan los valores de carga de servicio que corresponden a los valores de cortante resistente último, teniendo en cuenta los coeficientes de carga de cada norma. Esto permite ser más objetivos al valorar la capacidad resistente por cortante, ya que se comparan las cargas sin mayorar correspondientes al peso de los materiales y a las cargas de uso de la edificación.

En la citada tabla se comparan entresijos compuestos utilizando losas huecas de 15 y 30 cm de altura del *Manual cubano*, con diferentes cuantías de acero de pretensado (variación de la fuerza de pretensado). Se usan losas *in situ* (*topping*) de 5 y 7,5 cm de espesor, con hormigón de 20 MPa de resistencia.

En la tabla comparativa se corrobora lo planteado anteriormente al analizar los valores de cortante último resistente. Cuando se aplican los coeficientes de cargas las diferencias se hacen menores, pero aun con esta consideración las cargas de servicio admisibles del Eurocódigo 2 pueden ser mayores en un 12% con respecto a las obtenidas por las demás normas.

Las diferencias entre la NC 207:2003 y el ACI son insignificantes en cuanto a los valores de cargas de ser-

vicio admisibles obtenidos de la comprobación de cortante.

A continuación se ilustra el incremento del cortante resistente (tomado para 1,20 m de ancho, que es el ancho de una losa), comparando las secciones del entresijo compuesto con respecto al de losas huecas simples, considerando cargas distribuidas. En los gráficos de las figuras 4 y 5 se muestra la comparación del cortante resistente para una sección situada a una distancia  $h_t/2$  del apoyo, para las losas de 15 y 30 cm de altura. Para la conformación del entresijo compuesto se adicionó una losa de 5 cm de espesor con resistencia del hormigón de 20 MPa. Se emplearon las expresiones del ACI-2005.

En los gráficos se puede observar que el incremento del área de acero de pretensado (proporcional a la fuerza de pretensado) no genera grandes incrementos de la resistencia al cortante a una distancia  $h_t/2$  del apoyo. En esa sección no se ha producido toda la transferencia de la fuerza de pretensado, puesto que la longitud necesaria para la transferencia del pretensado generalmente es mayor que esa distancia.

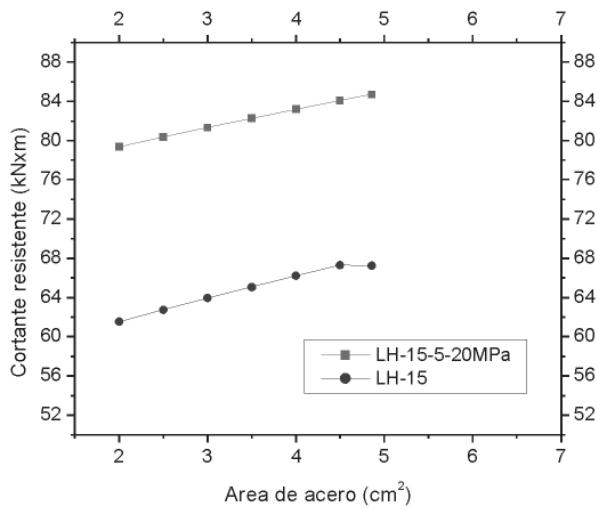


Figura 4. Cortante último de sección simple y compuesta con LH-15.

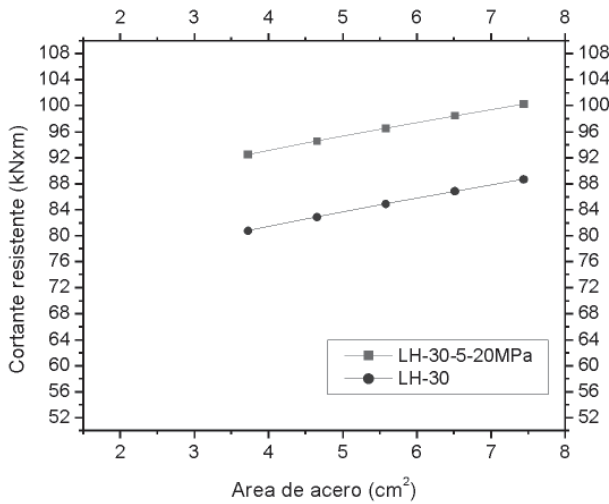


Figura 5. Cortante último de sección simple y compuesta con LH-30.

Al comparar las secciones de losas simples con las secciones compuestas, se advierte que el cortante tiene un incremento casi constante, con independencia de la fuerza de pretensado; esto se debe a que la diferencia está dada fundamentalmente por el aumento de la altura efectiva de la sección en el entrepiso compuesto.

A pesar de tener un aumento considerable de la altura efectiva de la sección en el entrepiso compuesto al pasar de los entrepisos con LH-15 a los entrepisos con LH-30, los incrementos en el cortante resistente no son significativos porque el espesor total de pared para to-

mar las tracciones diagonales disminuye. Esto está relacionado con la configuración geométrica de los huecos de las losas pretensadas.

A continuación se ilustra la variación de la capacidad de carga, en función de la luz de trabajo de los entrepisos compuestos, teniendo en cuenta todas las comprobaciones de diseño de los estados límites, según ACI-2005. En los gráficos se presenta la carga superpuesta admisible de servicio sobre la losa compuesta. Las curvas del gráfico reflejan las comprobaciones de tensiones en las fibras extremas (tensión), las comprobaciones de capacidad de carga por momento resistente y las comprobaciones de capacidad de carga por cortante resistente.

En la figura 6 se muestran los entrepisos con LH-15 y losa *in situ* de 5 cm, con hormigón de 20 MPa para una luz de trabajo de 4,20 m (considerada pequeña).

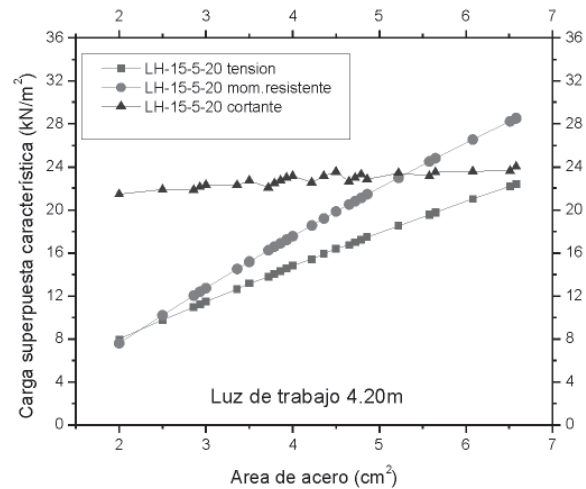
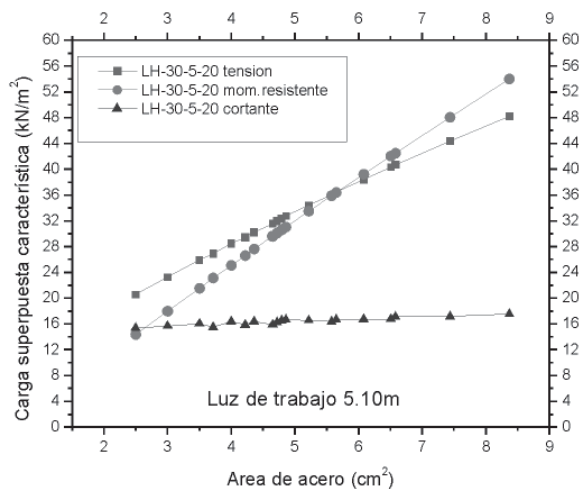


Figura 6. Comparación general de entrepisos con LH-15 para 4,20 m de luz.

En la figura 6 se observa que para luces pequeñas, en entrepisos de pequeña altura, la comprobación del cortante nunca rige el diseño; por tanto, para luces mayores nunca será el cortante la condición crítica de diseño. Se puede afirmar en estos casos que generalmente el cortante vertical no es el que define la capacidad de carga.

A medida que crece la altura de las losas prefabricadas, debido a la configuración geométrica de la sección transversal de éstas, disminuye el espesor total de pared, por lo que para las luces pequeñas, cuando se so-

portan grandes cargas, es el cortante el que rige el diseño. En estos casos el cortante puede regir el diseño para todas las cuantías de acero, con una marcada diferencia en la capacidad de carga con respecto a las demás comprobaciones para las cuantías más elevadas. La afirmación anterior se ilustra en el gráfico de la figura 7 para entrepisos con LH-30 y losa *in situ* de 5 cm con hormigón de 20 MPa, para una luz de trabajo de 5,10 m (considerada pequeña).



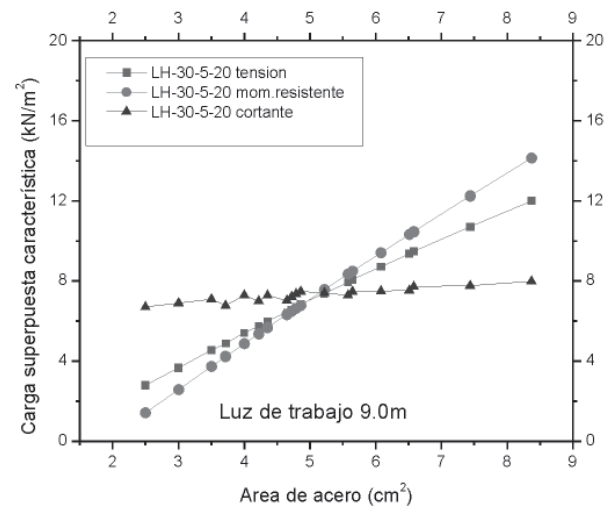
**Figura 7.** Comparación general de entrepisos con LH-30 para 5,10 m de luz.

Cuando se usan losas LH-30, el cortante puede regir el diseño en losas con cuantías más altas, por las razones ya explicadas, aun para luces que se pueden considerar relativamente grandes. Esta afirmación se ilustra en el gráfico de la figura 8, para entrepisos compuestos con la misma sección que la anterior pero incrementando la luz de trabajo hasta 9,0 m.

En el gráfico de la figura 8 se muestra cómo para las cuantías de acero de pretensado consideradas en el rango de medianas a altas el cortante es la condición que rige el diseño, incluso para luces de trabajo que se pueden considerar relativamente grandes.

### Cortante horizontal

El chequeo del cortante horizontal es un estado límite no considerado de manera independiente por muchas normativas hasta hace poco tiempo. En las normas



**Figura 8.** Comparación general de entrepisos con LH-30 para 9,0 m de luz.

cubanas anteriores a la NC-207:2003 no se abordaba este tema; lo mismo había sucedido en normas europeas como las EH-91 y EP-93, de España.

En las normas y documentos técnicos este estado límite recibe diferentes denominaciones. Por ejemplo, en la EHE-2002 se llama “Estado límite de agotamiento por esfuerzo rasante en juntas entre hormigones”, en la EFHE-2002 aparece como “Cortante longitudinal”, en el Eurocódigo 2:2004 se aborda como “Cortante en la interfase entre hormigones fundidos en etapas diferentes”, mientras que en la NC 207:2003, al igual que en la normativa del ACI-2005, se define como “Resistencia al cortante horizontal”, y si se supera determinado valor de tensión cortante horizontal se pasa al estado de “Cortante por fricción”, tratado en otro acápite.

Este estado límite está orientado al caso en que la transferencia de esfuerzos entre las dos partes de la pieza compuesta se realiza realmente por cortante. Es aplicable al cálculo de estados de corte a través de una superficie potencial de fisuración o una superficie de junta entre los dos hormigones del elemento compuesto. Al experimentarse un corrimiento paralelo a la superficie de contacto, las crestas de las superficies rugosas se montan unas sobre otras. Si existe cualquier armadura de cosido, ésta ofrece resistencia al deslizamiento.

Cuando no se dispone de armadura de cosido o ésta es de muy baja cuantía, la rotura de la adherencia de

ambos hormigones se presenta de manera repentina, con un deslizamiento relativamente pequeño entre ambos, por lo que ocurre una rotura frágil (sin aviso). En este tipo de fallo no existe ninguna posibilidad práctica de “readaptación” del fenómeno a lo largo de la luz del elemento, sino que la rotura se inicia por el punto en que se rebasa el valor límite de la tensión rasante y se propaga al resto del elemento.

El carácter frágil de la rotura, la dispersión que presenta y la sensibilidad de este valor al polvo y suciedad interpuestos en la unión hacen que se deba ser muy prudente al fijar los coeficientes de seguridad y que cualquier investigación experimental abarque un número razonable de ensayos y no unos pocos valores aislados (González y Gálvez, 1993; Calavera, 2003).

### Mecanismo de falla y consideraciones básicas

El mecanismo general de transferencia de las tensiones de cortante a través de la interfase de piezas de hormigón fundidas en diferentes etapas, se muestra en la figura 9.

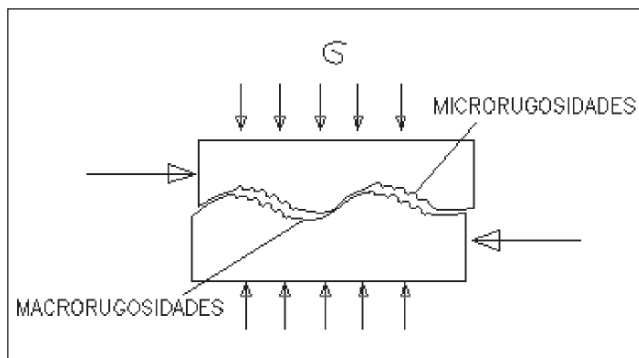


Figura 9. Mecanismo de falla.

Este mecanismo, para la determinación de la tensión tangencial resistente en la interfase, se resume conceptualmente en la siguiente expresión (FIP, 1998):

$$\tau = c + \sigma \tan \phi_c \quad (3)$$

En la expresión anterior, el término  $c$  está referido a la cohesión entre hormigones fundidos en diferentes etapas, la cual está basada en dos factores muy bien explicados según Aragón (Aragón, 2007):

- Adhesión de las partículas del hormigón de la primera etapa con la lechada o fase fluida del hormigón de la segunda etapa.
- Imbricación o trabazón entre los dos hormigones al penetrar la lechada del mortero en los poros de la superficie sobre la que se hormigona, y posterior endurecimiento de las llaves de lechada.

El segundo término está asociado a las macrorrugosidades de la superficie, donde  $\sigma$  es la tensión actuante perpendicular a la interfase.

Si la interfase es atravesada por armadura de refuerzo perpendicular a ésta, entonces la expresión general resultante es la siguiente:

$$\tau = c + (\sigma_n + \rho_v f_{sy}) \tan \phi_c \quad (4)$$

Donde:

- $\rho$  = cuantía de acero de refuerzo en la conexión
- $f_{sy}$  = tensión de fluencia del acero de refuerzo de la conexión.

En esta expresión se puede ver con claridad la independencia que existe entre el término  $c$  y el resto de los factores. El aporte de la armadura de cosido y la tensión normal actuante a la capacidad resistente de la conexión dependen de las condiciones (rugosidad) de la superficie de contacto.

En el tipo de estructura objeto de estudio, el aporte a la resistencia de la conexión está dado por la cohesión o adherencia entre hormigones.

En los documentos técnicos, las clasificaciones de rugosidades y el término  $c$  que les corresponde presentan diferencias.

El incremento de la rugosidad de la superficie de elementos de hormigón se puede obtener por uno de los procedimientos siguientes:

- Rascado con peine de púas en sentido transversal al esfuerzo rasante.
- Tratamiento con chorro de agua o chorro de arena, que deje a la vista el árido grueso.
- Apisonado del hormigón después de vibrado con un enrejado metálico o malla metálica tupida.

La tecnología de producción de losas huecas pretensadas extrudadas genera dos cualidades básicas impor-

tantes para la superficie superior de la losa prefabricada que recibirá el hormigón *in situ*:

1. La superficie queda libre de lechada de cemento y con cierta rugosidad.
2. La superficie no queda totalmente plana, sino que se generan ondulaciones.

Por la razón anterior la rugosidad de la superficie de las losas no se considera baja, aunque no se interviene directamente con alguna técnica posterior al hormigonado para incrementar la rugosidad.

En el *Manual de diseño de losas huecas pretensadas*, de Estados Unidos (*PCI-Manual*, 1998), se plantea que los ensayos realizados demuestran que la terminación de la superficie en las losas huecas pretensadas extrusadas con la tecnología planteada permite hacer el cálculo, considerando la tensión rasante admisible para superficies intencionalmente rugosas, según el ACI.

En España, el *Manual de lasas Aidepla* (Aidepla, 2004) no plantea ningún tratamiento adicional a la superficie de las losas para considerar el trabajo estructura compuesta y realiza el chequeo de tensión rasante de losas compuestas para superficies de rugosidad alta, según la normativa vigente hasta ese momento.

$$v_h = \frac{V * S}{I * t}$$

### Capacidad resistente de la conexión

Existen múltiples expresiones para determinar el cortante horizontal actuante en la interfase de la sección compuesta. Quizás la expresión más conocida es la teoría elástica, donde se considera el elemento trabajando en régimen elástico, sin fisuras y con trabajo compuesto total. Para determinar la tensión actuante, se utiliza la expresión 5:

(5)

Donde:

$v_h$  = tensión cortante horizontal.

$V$  = esfuerzo cortante.

$S$  = momento estático de la sección por encima de la interfase con respecto al eje centroidal elástico de la sección compuesta.

$I$  = momento de inercia de la sección no fisurada.

$t$  = ancho de la interfase.

Más adelante se abordan las expresiones usadas en los documentos normativos.

Los ensayos demuestran que la expresión 5 es válida para secciones fisuradas, siempre y cuando se tomen  $I$  y  $S$  usando las propiedades y expresiones de la sección fisurada (Patnaik y Loov, 1994). A pesar de lo planteado, esta expresión no es la adoptada por todos los documentos normativos, como se ilustra más adelante.

El ACI-2005 presenta la formulación general siguiente:

$$V_u \leq \phi V_{nh} \quad (6)$$

Con el cortante nominal en la interfase para superficies que se consideren intencionalmente rugosas y se prescindan de conectores, expresado como:

$$V_{nh} = 0,55 * b_v * d \quad (7)$$

Donde:

$V_u$  = esfuerzo cortante de cálculo (MN).

$\phi$  = coeficiente igual a 0,75.

$V_{nh}$  = tensión cortante nominal resistente (MPa).

$b_v$  = ancho de la interfase (m).

$d$  = altura efectiva de cálculo de la sección, tomando el mayor entre la altura efectiva real desde el extremo de la fibra comprimida hasta el centroide de la armadura y 0,8 veces la altura total (m).

En la expresión de  $V_{nh}$  se asume como valor constante de adherencia entre hormigones 0,55 MPa, con independencia de la resistencia de los hormigones que intervienen en la conexión. Este valor se toma para hormigón colocado sobre hormigón endurecido con superficies intencionalmente rugosas, limpias y libres de lechada, sin presencia de armadura de cosido.

Para la determinación de la tensión cortante horizontal, el ACI presenta un método alternativo derivado de la condición de equilibrio de la sección, determinando la variación de la fuerza de compresión en un segmento dado, donde se transfiere el cortante horizontal. Este método no es recomendable en el tipo de conexión que se analiza por el tipo de fallo no avisado (frágil, con valores pequeños de deslizamientos relativos) y progresivo (sin posibilidades de readaptación o redistribución).

En el propio documento normativo se reconoce que el método de cálculo adoptado en el ACI es conserva-

dor. A lo anterior se agrega lo planteado en el *Manual del PCI (PCI-Manual, 1998)* de que numerosos ensayos demuestran la capacidad de las losas huecas pretensadas extrusadas de soportar tensiones en la interfase superiores a 0,55 MPa, cuando trabajan como losas compuestas debido al tipo de superficie que se obtiene en el propio proceso de producción de las losas.

La norma AASHTO-LRFD 2004 establece como máximo valor de tensión nominal cortante 0,52 MPa para superficies limpias, libres de lechada sin rugosidad intencional. Para superficies intencionalmente rugosas se acepta 0,7 Mpa. Especifica además que se puede prescindir de armadura de cosido hasta valores de tensión en la interfase de 0,7 MPa. El factor de seguridad utilizado  $\phi = 0,9$  es mayor que el  $\phi = 0,75$  del ACI, pero los coeficientes de cargas son superiores en la normativa AASHTO-LRFD, teniendo los valores de 1,25 para cargas permanentes y 1,75 para cargas temporales, cuando se combinan solamente estas cargas.

Como dato adicional que incide en los cálculos se debe mencionar que esta norma recomienda tomar  $d$  como la distancia desde el centroide del acero traccionado hasta el centro del bloque de compresión de hormigón, mientras en el ACI se toma la altura efectiva.

Como se ha podido observar, las normas de Estados Unidos no tienen en cuenta la resistencia del hormigón para fijar el valor máximo admisible de tensión tangencial de cortante en la interfase.

A continuación se expone el enfoque dado al tema tratado en los documentos normativos europeos. En estos documentos la tensión resistente en la interfase está en función de la resistencia del hormigón más débil.

El Eurocódigo 2 presenta la siguiente formulación general:

$$V_{Edi} \leq V_{Rdi} \tag{8}$$

El valor de tensión resistente cuando no existe armadura de cosido se determina:

$$V_{Rdi} = c f_{ctd} \tag{9}$$

El valor de tensión actuante se determina:

$$V_{Edi} = \beta V_{Ed} I(z b_i) \tag{10}$$

Donde:

$V_{Ed}$  = cortante en la sección.

$\beta$  = relación entre la fuerza longitudinal actuante en la losa *in situ* y la fuerza longitudinal total actuante en la sección.

$z$  = brazo mecánico.

$b_i$  = ancho de la interfase.

$c = 0,25 f_{ctd}$  para superficies muy lisas.

$c = 0,35 f_{ctd}$  para superficies lisas.

$c = 0,45 f_{ctd}$  para superficies intencionalmente rugosas.

$c = 0,5 f_{ctd}$  para superficies con llaves de cortante.

$f_c^?$  = resistencia a compresión del hormigón más débil.

$f_{ctd} = 0,21 * (f_c^?)^{2/3} / 1,5$ .

El Código de Buena Práctica CEB-FIP (FIP, 1998) presenta la siguiente formulación:

$$\tau_{ds} \leq \tau_{Rd} \tag{11}$$

Con:

$\tau_{Rd} = 0,1 f_{ctd}$  para superficies muy lisas.

$\tau_{Rd} = 0,2 f_{ctd}$  para rugosidad baja.

$\tau_{Rd} = 0,4 f_{ctd}$  para rugosidad alta.

La determinación de la tensión actuante se basa en una expresión con enfoque completamente elástico:

$$\tau = [V * E_2 * S_2] / [b * (EI)_0] \tag{12}$$

Donde:

$V$  = cortante de diseño sin considerar el peso propio (MN).

$E_2$  = módulo de elasticidad del hormigón de la losa *in situ* (MNxm<sup>2</sup>).

Para obtener el valor de cortante de diseño, los coeficientes de mayoración de las cargas son 1,35 para las permanentes y 1,5 para las temporales.

$S_2$  = momento estático de la losa *in situ* con respecto al centroide elástico de la sección compuesta (m<sup>3</sup>).

$b$  = ancho de la interfase (m).

$(EI)_0$  = rigidez de la sección compuesta MNxm<sup>2</sup>.

Los valores límites de tensión admisible en la interfase dados por este documento son inferiores a los dados en el Eurocódigo 2.

La clasificación de las superficies y los valores admisibles de tensión en la superficie de contacto regis-

tran grandes variaciones de una normativa a otra. Esto está condicionado por la dispersión que se presenta en los ensayos y la dificultad de establecer los límites entre superficies lisa, media y rugosa.

Para la comparación de la capacidad resistente en la interfase se han seleccionado las normas Eurocódigo 2:2004 y el ACI-2005. Se ha utilizado una sección compuesta con losas prefabricadas LH-15 y losa *in situ* de 5 cm de espesor, con hormigón de 20 MPa de resistencia.

En la siguiente comparación ha sido necesario tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Se ha escogido la clasificación en el ACI de superficie intencionalmente rugosa y, por tanto, el valor de 0,55 MPa como tensión admisible para determinar la fuerza cortante, aunque en realidad la superficie no se haya tratado posteriormente al hormigonado de la losa prefabricada. Esto es posible porque el propio documento ACI reconoce que este valor es conservador para superficies intencionalmente rugosas (con tratamiento en la superficie). Por otro lado, en el *Manual del PCI (PCI-Manual, 1998)* se plantea que para las losas huecas pretensadas extrusadas el chequeo se hará según lo planteado para superficies rugosas en el ACI, lo cual está avalado por múltiples ensayos realizados. En los boletines de la Corporación de Tecnología del Hormigón de Estados Unidos (CTA 74 B6, 1974; CTA 76 B4, 1976) se acepta un valor de 0,6 MPa para losas huecas pretensadas con tecnología de vibrado y extrusado (corresponde a la denominada superficie lisa en estos documentos).
- En la comparación se han escogido para el Eurocódigo 2 las superficies lisa y rugosa. La superficie lisa es la que se adapta al caso en estudio, según la clasificación que hace este documento. Se ha escogido además la superficie rugosa para establecer la comparación general con el ACI e ilustrar mejor las diferencias.

A continuación se expone lo anteriormente descrito, comparando los esfuerzos cortantes verticales característicos máximos que generan la condición límite de tensión en la interfase según cada documento. La comparación se ha realizado variando la relación entre las cargas permanentes y temporales entre un 40-60%, aplicando los coeficientes de carga según cada normativa (figura 10).

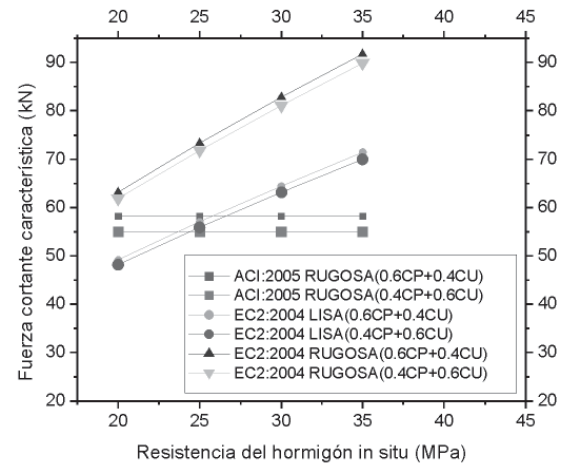


Figura 10. Capacidad resistente de la conexión.

En primer lugar, es evidente que en las expresiones del ACI, como en otras normas norteamericanas, no se establece dependencia entre la resistencia del hormigón de la losa *in situ* y la capacidad resistente de la conexión, mientras que el Eurocódigo 2, al igual que otras normativas europeas, sí tiene en cuenta esta dependencia. El Eurocódigo 2, cuando trata superficies clasificadas como intencionalmente rugosas, es menos conservador que el ACI, obteniéndose diferencias significativas.

Ajustando la comparación para el caso de los entresijos compuestos objeto de estudio, según los criterios que permiten clasificar la superficie, se puede observar que para valores de resistencia cercanos a 25 MPa existe bastante coincidencia entre ambas normas. Para valores de resistencia menores (cercanos a 20 MPa), según el Eurocódigo 2 se alcanza menor capacidad resistente, mientras que para valores por encima de 25 MPa se obtiene mayor capacidad resistente de la conexión según el Eurocódigo 2 con respecto a las demás normas, pudiendo llegar a ser significativas las diferencias.

## CONCLUSIONES

Los análisis relacionados con el cortante vertical reflejan lo siguiente:

- El incremento de la fuerza de pretensado no genera grandes incrementos de la resistencia al cortante de la sección crítica (para cargas distribuidas) ubicada

a una distancia igual a la mitad de la altura total  $h_t/2$  del apoyo, porque en esa sección no se ha producido toda la transferencia de la fuerza de pretensado. Además, comparando los entrepisos simples con los entrepisos compuestos, el cortante tiene un incremento relativo casi constante, con independencia de la fuerza de pretensado (área de acero de pretensado); esto se debe a que la diferencia está dada fundamentalmente por el aumento de la altura efectiva de la sección compuesta.

- A pesar de aumentar de modo considerable la altura efectiva de la sección compuesta al pasar de los entrepisos con LH-15 a los entrepisos con LH-30, los incrementos en el cortante resistente no son significativos, porque entonces el espesor total de pared para tomar las tracciones diagonales disminuye. Esto está relacionado con la geometría de los huecos de la sección transversal de la losa prefabricada.
- Con respecto a otras normativas, tomando como criterio el cortante cercano al apoyo donde el diseño está condicionado por la tracción excesiva del alma, los valores de cortante resistente obtenidos por el Eurocódigo 2 son superiores a los conseguidos por otras normas. Esta tendencia del Eurocódigo 2, con respecto a otras normas, se evidencia para todos los casos de entrepisos compuestos. En las comparaciones donde se traducen los resultados a cargas de servicio aplicando los coeficientes de carga de cada norma, aunque las diferencias se hacen algo menores, las cargas de servicio admisibles obtenidas por el Eurocódigo 2 siguen siendo mayores.
- Otra tendencia evidente es que en la expresión del Eurocódigo 2 la fuerza de pretensado tiene ligeramente mayor incidencia en la capacidad resistente a cortante que en las demás normas. Se puede observar el crecimiento relativo en mayor grado del cortante último, a medida que se incrementa el área de acero de pretensado (incremento de la fuerza de pretensado).
- Las diferencias entre la NC 207:2003 y el ACI-2005 son insignificantes en cuanto a los valores de cargas de servicio admisibles obtenidos de la comprobación de cortante último.
- En entrepisos con losas prefabricadas de pequeña altura, generalmente el cortante no es el que define la capacidad de carga.
- A medida que crece la altura de las losas prefabricadas, debido a la configuración geométrica de la sec-

ción transversal de éstas, disminuye el espesor total de pared. En estos casos, para luces de trabajo consideradas pequeñas, el cortante puede regir el diseño para todas las cuantías de acero, con una marcada diferencia en la capacidad de carga con respecto a las demás comprobaciones, para las cuantías de acero más elevadas. Para luces de trabajo relativamente grandes, para las cuantías de acero en rangos de mediana a alta, puede ser todavía la comprobación de cortante la que rige el diseño.

Con respecto a la capacidad resistente de la conexión:

- En las expresiones del ACI, como en otras normas norteamericanas, no se establece dependencia entre la resistencia del hormigón de la losa *in situ* y la capacidad resistente de la conexión, mientras que el Eurocódigo 2, al igual que otras normativas europeas, sí tiene en cuenta esta dependencia. El Eurocódigo 2, cuando trata superficies clasificadas como intencionalmente rugosas, es menos conservador que el ACI, obteniéndose diferencias considerables.
- Ajustando la comparación para el caso de los entrepisos compuestos objeto de estudio, se puede observar que para valores de resistencia cercanos a 25 MPa existe aproximación entre los valores obtenidos por las normas ACI y Eurocódigo 2. Para valores menores de resistencia (cerca de 20 MPa), según el Eurocódigo 2 se obtiene menor capacidad resistente, mientras que para valores por encima de 25 MPa se obtiene mayor capacidad resistente de la conexión según el Eurocódigo 2 con respecto al ACI, pudiendo llegar a ser significativas las diferencias.

## BIBLIOGRAFÍA

- AASHTO LRFD (2004). *Bridge Design Specification*, 3<sup>rd</sup> ed. With 2005 and 2006 Interims. Washington D.C.
- ACI-Asce committee 333 (1960). Tentative Recommendations for Design of Composite Beams and Girders for Buildings. *ACI Journal*, Vol. 32, No. 6, 12.
- ACI Committee 318 (2005). "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-05) and Commentary (ACI 318R-05)". American Concrete Institute.
- Aidepla (2004). Proyecto y ejecución de elementos resistentes con alveopla. España.
- Aragón, A. (2007). Investigación de los mecanismos de transferencia de tensiones rasantes en juntas de piezas compuestas

- entre hormigones *in situ* y prefabricados de alta resistencia. Tesis de doctorado. España: Escuela Politécnica Superior de la Universidad de Burgos.
- Calavera, J. (2003). *Cálculo, construcción, patología y rehabilitación de forjados de edificaciones unidireccionales y sin vigas*, 5ª ed. España: Intemac.
- CEB-FIP (1990). Código Modelo del Comité Europeo del Hormigón y la Federación Internacional del Pretensado.
- CTA *technical bulletin 74-B6* (1974). Composite Systems without Roughness, 6, 46 pp.
- CTA *technical bulletin 76-B4* (1976). Composite Systems without Ties, 4, 43 pp.
- EFHE (2002). Instrucción para el proyecto y la ejecución de forjados unidireccionales de hormigón estructural realizados con elementos prefabricados. Sust. EF-96. Vig. desde 7/2002 48 pp.
- EHE (2002). Instrucción de hormigón estructural. Madrid: Ministerio de Fomento.
- EH-91 (1991). Instrucción para el proyecto y la ejecución de obras de hormigón en masa o armado. Sust. EH-88. Vig. desde 6/1991, 277 pp.
- EN 1168 (2005). Precast Concrete Products. Hollow core slabs.
- EP-93 (1993). Instrucción para el proyecto y la ejecución de obras de hormigón pretensado. Sust. EP-80. Vig. desde 5/1993.
- Eurocode 2 (2004). Design of concrete structures-part 1-1. General rules and rules for building. 12/2004.
- FIP Guide to good practice (1998). Composite floor structures.
- FIP Recommendations (1988). "Precast Prestressed Hollow Core Floor".
- González, E. & Gálvez, J. (1993). Influencia de la rugosidad y la cuantía de cosido en el comportamiento de las piezas compuestas solicitadas a flexión. *Hormigón y Acero*, No. 187, 9-30.
- Girhammar, U. (1992). Design principles for simply supported Prestressed hollow core slabs. *Struct. Eng. Rev.* 4(4), pp. 301-316.
- Girhammar, U. (1995) Shear capacity of notched Prestressed hollow core slabs with circular voids. *Struct. Eng. Rev.* 7(2), pp. 63-74.
- Girhammar, U. & Pajari, M. (2007). *Test and analysis on shear strength of composite slabs of hollow core units an concrete topping*. Ulf Arne Girhammar & Matti Pajari. *Construction and Building Materials*, 7/2007.
- Manual para el diseño y selección de losas huecas pretensadas extrusadas*, 2007.
- NC 207-2003. Construcciones de hormigón armado. Requisitos generales para el diseño y construcción de las estructuras de hormigón. Sust. NC 053-039: 1989. Vig. edesde 9-2003.
- Pajari, M. (1989) Design of prestressed hollow core slabs. *Research Reports 657*, Technical Centre of Finland (VTT), Espoo; 1989.
- Pajari, M. (2005). Resistance of Prestressed Hollow Core Slabs against Web Shear Failure. *Research Notes 1292*, VTT Building and Transport, Kemistintie, Finland, April.
- Patnaik, K. & Loov R. (1994). Horizontal Shear strength of composite concrete beam with a rough interface. *PCI Journal*, Vol. 39, No.1, 48-66.
- PCI Design Handbook*, 5<sup>th</sup> ed. (1999). Chicago: Precast/Prestressed Concrete Institute.
- PCI-Manual for the design of hollow core slabs*, 2<sup>nd</sup> ed. (1998). PCI.
- Hawkins, M. & Ghosh, S. (2006). Shear strength of hollow core slabs. *PCI Journal*, Vol. 130, No. 1, 110-114.
- Scott, N. (1973). Performance of precast prestressed hollow core slabs with concrete topping/ Norman L. Scott. *PCI Journal*, Vol. 18, No. 2, Mar-Apr. pp. 64-77.
- Ueda, T. & Boonchai, S. (1991). Shear strength of precast prestressed hollow slabs with concrete topping. *ACI Structural Journal*, Vol. 88, No. 4.
- Ultra-Span News*. Another innovative product by Ultraspan.
- Yang, L. (1994). Design of Prestressed Hollow Core Slabs with Reference to Web Shear Failure. *Journal of Structural Engineering*. Asce, Vol. 120, No. 9, 2675-2696, September.