

SOBRE LOS FORJADOS DE EDIFICACIÓN

Javier A. Lahuerta
Cristina Sanz

Los forjados son elementos estructurales superficiales planos que constituyen los techos o pisos de los edificios. Este artículo se centra en los sistemas de forjados de hormigón armado, que son los que se emplean en la mayor parte de los edificios que se realizan en la actualidad.

Forjados, son elementos resistentes planos de la estructura de un edificio. Los forjados tienen fundamentalmente dos importantes misiones:

Constituir los pisos del edificio. Las personas que los usan, y los muebles y máquinas que éstas utilizan se apoyan sobre los solados que recubren los forjados de la estructura. Estos forjados resisten a flexión y corte las acciones gravitatorias de personas, muebles y máquinas, las transmiten a las vigas y éstas a los pilares o muros y a la cimentación.

Arriostrar los elementos de la estructura. Los forjados tienen que ser diafragmas horizontales rígidos, que enlacen los pórticos formados por las vigas y los pilares de la estructura, o los muros de ésta. Y transmitan las acciones horizontales, eólicas, sísmicas, etc., que reciba el edificio, a los pórticos o muros que las resisten y las llevan a su cimentación.

El arquitecto debe dar a los forjados la importancia que se deriva de estas dos misiones y considerar que los forjados presentan además las siguientes tres características:

Canto pequeño en relación con la luz del forjado. Por ello los forjados son más sensibles a las deformaciones y a las vibraciones que los demás elementos de la estructura del edificio.

Coste importante en relación con el coste íntegro de la estructura. Representa según los casos del 30% al 40% del presupuesto de la estructura del edificio.

Patología cuantiosa en relación con la total del edificio. El coste de reparación de los casos patológicos de forjados es el 45% de los de la estructura y el 20% de los de todo el edificio. El 60% de estos casos se debe a defectos de proyecto.

Los forjados de hormigón, armado o pretensado, son en este siglo XXI los forjados más empleados en los edificios, con estructura de hormigón armado, o de acero laminado, o de muros de fábrica. Forjados de uno de los tres siguientes tipos:

Forjado de nervios. Con piezas de entrevigado (fig. 1) o en algún caso moldes recuperables; armaduras de obra, longitudinales, inferior AL y superior AS, de reparto AR, y transversales AT cuando excepcionalmente se precisen; y hormigón de obra, en relleno de nervios y losa superior, a la vez que las vigas o cadenas de apoyo.

Forjado de viguetas. Con viguetas prefabricadas de hormigón armado (fig. 2), o pretensado (fig. 3); piezas de entrevigado; armaduras de obra AS, AR; y hormigón de obra.

Forjado de losas. Con losas o paneles prefabricados, alveolares o nervados, de cerámica (fig. 4), o de hormigón (fig. 5), armados o pretensados; armaduras de obra AS; y hormigón de obra.

En este artículo se tratará solamente de sistemas de forjados de hormigón, no de forjados con viguetas de madera o de perfiles laminados de acero, ni de los forjados mixtos de hormigón y chapa plegada de acero, cuya utilización es mucho menor que la de los forjados de hormigón armado.

NORMATIVA SOBRE LOS FORJADOS

La reglamentación técnica de los forjados de edificación se inició hace sesenta años, cuando la Dirección General de Arquitectura del Ministerio de la Gobernación promulgó la Norma DGA 41 para el proyecto y ejecución de las estructuras de acero laminado y de hormigón armado y de los forjados de ladrillo armado. Esta Norma, cuyo ponente fue J. del Corro, aplicaba criterios deterministas de cálculo, en tensiones admisibles, imperantes en 1940 (Lahuerta, 1943).

Renovación primera de la Norma DGA 41 que afectó a los forjados, fue la anulación de su capítulo 1, Cargas y sobrecargas, y su sustitución por la Norma MV 101-1962, Acciones en la edificación. Esta Norma fue redactada en el Ministerio de Vivienda por una comisión de la que formaron parte J. del Corro y J. A. Lahuerta. En 1988 esta Norma se modificó parcialmente y cambió su denominación por NBE AE 88. En 2002 sigue vigente, y ya se ha iniciado la aplicación del Eurocódigo1 en sus partes sobre acciones.

La renovación siguiente de la Norma DGA 41, en lo referente a las estructuras de acero, fue su sustitución por las Normas MV 102-1964 a MV 109-1968, y en lo referente a hormigón armado por la Instrucción EH 68, redactada por una Comisión de la que formaron parte, por el Ministerio de Vivienda, J. del Corro y J. A. Lahuerta, ya con criterios semiprobabilistas, entre ellos el de doble coeficiente de seguridad.

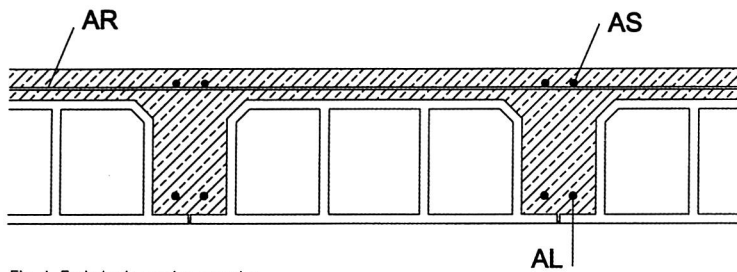


Fig. 1. Forjado de nervios armados

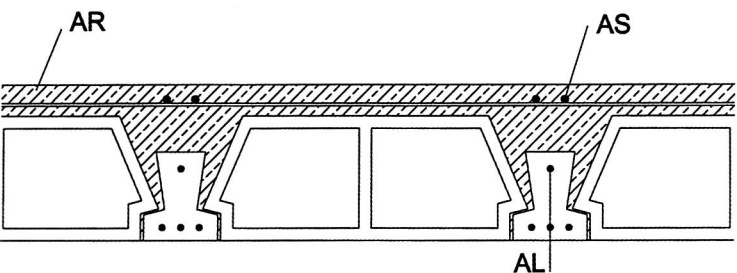
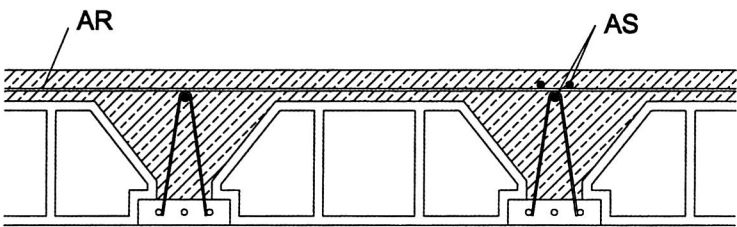


Fig. 3. Forjado de vigueta pretensada

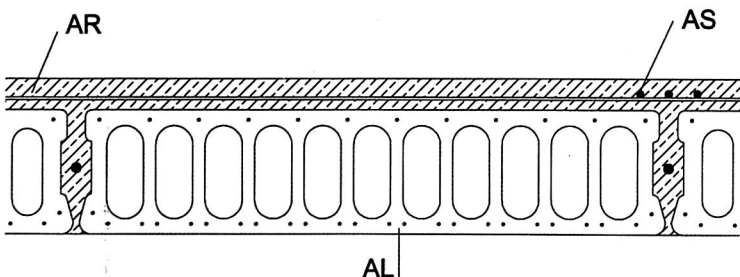
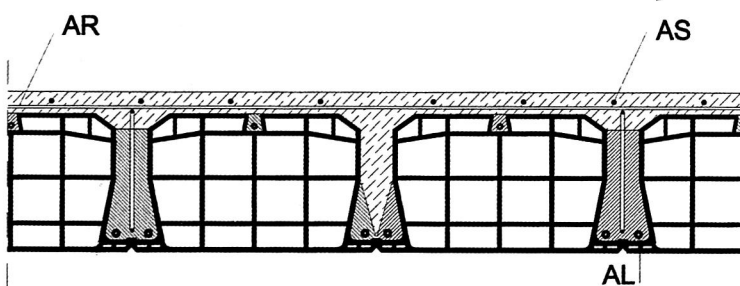


Fig. 5. Forjado de losas alveolares pretensadas

Los forjados de edificación, cuya normativa era de acuciante necesidad, no figuraban en el Instrucción EH 68. La Comisión del Hormigón, creada para la revisión permanente de la Instrucción, reconoció la urgencia de reglamentar los forjados y J. A. Lahuerta fue designado ponente para redactar el nuevo artículo de los forjados. Discutido por la Comisión, y aprobado con modificaciones, constituyó el Artículo 43. Forjados de edificación, de la Instrucción EH 73.

Elementos pretensados de hormigón, viguetas o paneles se emplearon en los forjados desde 1945 (Lahuerta, Modrego, 1993). En la Instrucción EH 73 no se incluían estos forjados y para ellos no existió normativa hasta la Instrucción EP 77. Fue también designado ponente J. A. Lahuerta por la Comisión, para su Artículo 58. Forjados de edificación unidireccionales con elementos prefabricados de hormigón pretensado, que complementaba el Artículo 43 de la Instrucción EH 73.

La Comisión del Hormigón continuó su tarea de revisión de las Instrucciones y en 1986 creó un grupo de trabajo para los forjados de edificación del que J. A. Lahuerta fue designado miembro. Se decidió reunir los forjados constituidos por viguetas o paneles armados con los pretensados y para ello se suprimieron los respectivos artículos de las Instrucciones de hormigón armado y de hormigón pretensado y se redactó la Instrucción EF 88, Forjados de hormigón armado y pretensado.

La Instrucción EF 96 que revisó la EF 88 tuvo dos aciertos. Primero, la aplicación del Sistema Internacional de unidades, que se reforzó con la obligatoriedad de redactar así las Fichas para la Autorización de Uso, abandonando el sistema M.K.S., que ha dejado de utilizarse en todo el mundo. Segundo, la supresión en el B.O.E. de los Comentarios en la Instrucción, causa de dubitaciones en la aplicación de los textos normativos. Pero varios desaciertos, que fueron objeto de observaciones a la Comisión, que presentaron, entre otros, el Consejo Superior de los Colegios de Arquitectos.

La Instrucción EHE, Hormigón Estructural, se promulgó en 1999, uniendo la reglamentación del hormigón armado y la del pretensado y revisándolas. Los forjados debieron haber constituido un capítulo de ella, pero no fue así. En la EHE 53 se establece que se regirán por la Instrucción EF 96. Un texto EF 2000 revisando la EF 96 se ha presentado a informe al Colegio Superior. J. A. Lahuerta ha intervenido en la redacción de este informe, el cual propone suprimir la EF 2000 y convertirla en un capítulo de la Instrucción EHE en su próxima revisión y ofrece un texto alternativo de este capítulo de forjados.

El Eurocódigo 1, UNE-ENV-1991-1: 1997, establece las bases de proyecto que se utilizan en Eurocódigo 2 y en los demás, y en su parte 2 las acciones sobre los edificios que deben aplicarse con los demás Eurocódigos. Las diferencias de los valores de estas acciones con las de la Norma AE 88 se señalan en el DNA antes citado.

El Eurocódigo 2, UNE ENV 1992-1-1: 1993, Proyecto de estructuras de hormigón, Parte 1-1, Reglas para la edificación, vigente utilizando el DNA, Documento Nacional de Aplicación, publicado como Anejo 13 de la Instrucción EHE, ha complicado el trabajo de la Comisión del Hormigón, pues es evidente que debe tenderse a unificar la reglamentación española y la europea. El

LA AUTORIZACIÓN DE USO

Los sistemas de forjados y sus componentes prefabricados han sido desde 1941 objeto de la atención de la Dirección General de Arquitectura. Ese año invitó oficialmente a los fabricantes a someter a examen una ficha técnica: descripción, método de cálculo y datos económicos de su sistema de forjados con objeto de examinarla para conceder autorización de uso. En 1942 editó el libro "Sistemas espaciales de forjados para la edificación", con la ficha técnica de cada uno de los 23 sistemas de forjados autorizados. Después continuó expediendo autorizaciones.

La ficha técnica de cada sistema de forjado no estaba reglamentada, ni fue oficialmente visada a partir del libro, por lo que había mucha indeterminación y resultó poco útil (Lahuerta, 1959). La Norma AU 66 estableció que la ficha técnica se redactara en hoja A4, según la norma FT 66, que fuera acompañada de una memoria técnica y que contuviera:

- Prescripciones para el forjado. Formas, dimensiones y disposiciones de los prefabricados. Características de los materiales de taller, que el fabricante garantiza. Características que se especifican para el hormigón y el acero de obra. Otras prescripciones.

- Manual de cálculo del sistema. Tipos de forjado, cantos, interjes, elementos resistentes, armaduras. Características de cada tipo: en flexión positiva; momento flector último y de fisuración, rigidez entera y fisurada. En flexión negativa: momento flector último y de fisuración, esfuerzo cortante último, rigidez entera y fisurada. Potestativo: tablas de cálculo directo considerando resistencias y flechas.

La Autorización de Uso se sella por la Dirección de Arquitectura en un recuadro superior derecho de cada hoja de la ficha técnica. Todo fabricante está obligado a tener ficha autorizada, a facilitar reproducción de ella a los organismos inspectores y a todo usuario del sistema que la solicite, y a que todos los elementos resistentes que suministre se ajusten a las prescripciones de la ficha autorizada. Actualmente para la ficha técnica hay que ajustarse en la Norma FT 97.

Las exigencias erróneas de una norma no producen en general mayores trastornos, porque los técnicos usuarios suelen rectificarlas haciendo uso de la posibilidad que da la propia Norma de variarlas justificándolo documentalmente. En los forjados, estos técnicos son los redactores de las Fichas de Características, y los arquitectos que proyectan y dirigen los edificios.

Los redactores de fichas técnicas con viguetas prefabricadas de hormigón observaron que la aplicación de la condición de contacto de la Instrucción EF 88 entre el hormigón del prefabricado y el de obra, reducía el esfuerzo cortante del forjado muy por debajo de los valores que utilizaron los doce años anteriores con buenos resultados. Luego la condición no parecía correcta.

La Instrucción EF 88 permitía utilizar esos valores mayores si se justificaban mediante resultados de ensayos, y muchos optaron por acogerse a esto. Realizaron ensayos de laboratorio de forjados en casos desfavorables, se obtuvieron en todos ellos resultados que confirmaron no era de aplicación la condición de contacto, y así se redactaron las Fichas.

El buen sentido de la Subdirección General del Ministerio de Fomento, en la que se estudia la memoria, los datos de ensayo y la ficha técnica que presenta cada forjado, y si se encuentra conforme esta documentación concede la autorización de uso, hizo que se solventara la dificultad, admitiendo el cálculo con valores basados

en los ensayos. La condición, sin embargo, se ha mantenido en la Instrucción EF 96.

Sobre la Autorización de Uso se ha indicado (Amat y Trepát, 1996): *Para elementos estructurales de pisos y cubiertas, España dispone, desde 1996, en soporte papel, de una base de datos muy bien estructurada: son las citadas Fichas de Características Técnicas de la Autorización de Uso. Su carácter sistemático las hace fácilmente utilizables en programas de cálculo de estructuras, sin parangón, en este uso, con los Avis Techniques franceses, por ejemplo.* Esta opinión la comparten la mayoría de los que usan los forjados.

LOS FORJADOS EN EL PROYECTO DEL EDIFICIO

El arquitecto que redacta el proyecto de un edificio, cuando va a detallar la estructura, elige el sistema de forjados que se empleará en la obra, de acuerdo, si es el caso, con el promotor del edificio y, si ya está designado, oyendo al futuro constructor de las obras.

Razones para esta elección pueden ser las siguientes:

- Sencillez y rapidez de ejecución del sistema de forjados.
- Coste bajo de los forjados, ligado a lo anterior.
- Facilidad y seguridad de suministro de los elementos del sistema.
- Costumbre o prejuicios de los que intervienen en la elección.

La memoria del proyecto y su anejo estructural se redactarán con forjados del sistema elegido, y con ellos se trazarán los planos de los forjados, que forman parte del proyecto de ejecución del edificio, y que van a servir para la construcción de los forjados.

El constructor, al comenzar la ejecución de la obra, puede proponer cambio de sistema de forjado, exponiendo las razones para ello. El promotor y su arquitecto pueden denegarlo o aceptarlo, aunque esto es desaconsejable (Lahuerta, 1993). Si se acepta, es preciso redactar nuevo anejo estructural y trazar nuevos planos de ejecución antes de que inicie la construcción de forjados.

El canto h del forjado en cada zona del edificio se establece en el proyecto inicialmente, de modo que se cumplan las exigencias de resistencia al fuego de la norma CPI 96, de aislamiento térmico de la norma CT 79, y las de aislamiento acústico de la Norma CA 88. Para que se cumplan además las exigencias de resistencia y deformabilidad no suele convenir que se reduzcan los valores de la Tabla 1.

La carga uniforme que soportará el forjado de cada zona del edificio se determina después, aplicando la Norma AE 88. Cada tramo de forjado de la zona soportará una carga superficial uniforme, q_k , en valor característico, que en general consta de dos sumandos: $q_k = g_k + p_k$. La concarga g_k incluye el peso propio, más el peso del solado y el del techo, según AE 88, 2.3. La sobrecarga p_k incluye la sobrecarga de uso, según AE 88, 3.1, y el peso de la tabiquería, según AE 88, 3.3. En valor de cálculo: $q_d = q_k \gamma_f$.

Cargas aisladas, lineales o puntuales, además de la carga uniforme, puede haber en algún tramo de forjado. Los forjados pueden también recibir acciones en su plano por causas eólicas, sísmicas, etc., que las transmiten a los pórticos o muros de la estructura mediante flexión y corte en el plano horizontal. Se determinarán estas acciones con las Normas AE 88 o NCS 94.

La sollicitación actuante de cálculo, momento flector m_d y esfuerzo cortante v_d , en cada sección del forjado, se determina con las acciones de cálculo por los métodos indicados en 5 y 6.

TABLA 1: CANTOS DE FORJADO QUE SE RECOMIENDA NO REBASAR

Uso de la zona	Sobrecarga de uso q_s kN/m ²	Rateo canto l luz h/l en un tramo				
		Aislado	Exterior	Interior	Balcón	Mirador
Residencial	2,0	0,052	0,044	0,036	0,105	0,130
Comercial	5,0	0,056	0,048	0,040	0,116	0,144
Industrial	10,0	0,060	0,051	0,043	0,125	0,156

Generalmente sólo es preciso hacerlo en determinadas secciones extrasolicitadas. Las viguetas o losas y las armaduras en cada tramo del forjado se eligen después mediante la ficha autorizada del sistema de forjados, de modo que en cada sección la solicitación resistente, momento flector positivo, m_u , negativo m'_u y esfuerzo cortante v_u , que figura en la ficha, que habrá sido calculada como se indica en 7, cumple la condición de resistencia:

$$m_d \leq m_u; \quad m'_d \leq m'_u; \quad v_d \leq v_u$$

Las condiciones de los estados límite de utilización se comprobarán después bajo las cargas características, como se indica en 7. Si en algún tramo se rebasa el límite de flecha diferida, total o activa suele ser necesario aumentar el canto h de forjado repitiendo los cálculos.

ESTADOS LÍMITES ÚLTIMOS

La solicitación de cálculo en estados límites últimos puede obtenerse en los forjados de tramos continuos:

En régimen elástico, admitiendo en cada tramo rigidez constante en toda su longitud, sin considerar en la rigidez la influencia de las armaduras, ni la reducción que produce la fisuración.

En régimen anelástico, admitiendo que se forma rótula plástica en los apoyos de tramos con continuidad (Lahuerta, 1954), y se produce redistribución, como recomienda la Instrucción EF 96. Así se hace aquí. En los estados límites de utilización la solicitación debe obtenerse en régimen elástico.

Acciones y solicitaciones se admiten proporcionales en régimen elástico. A partir de la formación de una rótula plástica el momento flector negativo en ésta se considera constante. Las armaduras para flexión negativa sobre los apoyos pueden dimensionarse para condicionar la redistribución. Esto se considera favorable constructiva y económicamente.

El método de cálculo simplificado con redistribución (Lahuerta, 1967), para forjados armados se admitió en la Instrucción EH 73, y para los forjados con prefabricados pretensados en la Instrucción EH 77. Se exige que el momento flector de vano no sea mayor que el máximo valor absoluto de los momentos flectores negativos de extremo.

Esto permite calcular sólo tres tipos de tramo:

- Aislado, sin continuidad en ningún extremo
- Externo, con continuidad en un solo extremo, izquierdo o derecho
- Interno, con continuidad en ambos extremos

La solicitación actuante por m de ancho de un tramo de losa l , con carga de cálculo q_d , según, EF 96, 6.2, puede obtenerse así:

Momentos flectores, kNm/m

$$\begin{aligned} \text{Positivo en vano} & m_d = \mu q_d l^2 \\ \text{Negativo en apoyo izquierdo} & m'_d = -\mu' q_d l^2 \\ \text{Negativo en apoyo derecho} & m''_d = \mu'' q_d l^2 \end{aligned}$$

Esfuerzos cortantes, kN/m

$$\begin{aligned} \text{En apoyo izquierdo} & v'_d = \beta' q_d l \\ \text{En apoyo derecho} & v''_d = \beta'' q_d l \end{aligned}$$

Los factores de solicitación de estas fórmulas se dan en la Tabla 2.

ALTERNANCIA DE SOBRECARGAS

En cada tramo de un forjado continuo, la sobrecarga puede actuar con valor de cálculo p_d , o con valor nulo. Esta alternancia en cálculo elástico aumenta el valor de los momentos flectores, algo el de los negativos de apoyo y bastante el de los positivos en vano. En cálculo anelástico puede considerarse que no modifica los momentos negativos de apoyo ni los positivos de vano, pero aumenta la amplitud a (fig. 6) de los momentos flectores negativos a cada lado del apoyo (Lahuerta y Modrego, 1993).

Las amplitudes de los momentos flectores negativos, a'_i a izquierda, y a''_i a derecha, en un tramo i , contiguo a los tramos $i-1$, $i+1$, se calcula así:

$$\begin{aligned} \text{Rateo de la concarga: } \rho &= g_k / q_k & q_k &= g_k + p_k \\ \text{Momentos flectores negativos en los apoyos del tramo } i, \\ \text{con sobrecarga } p_k: & m'_i = m_i \zeta' m_{i-1} & m''_i &= m_i \zeta'' m_{i+1} \\ \text{con sobrecarga nula: } & m'_i = \rho m_i \zeta' m_{i-1} & m''_i &= \rho m_i \zeta'' m_{i+1} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Factores de alternancia: } & \zeta'_i = \rho m'_i / m_{i-1} \neq 1 \\ & \zeta''_i = \rho m''_i / m_{i+1} \neq 1 \end{aligned}$$

Amplitud de momentos flectores negativos (Tabla 3):

$$\begin{aligned} \text{Tramo externo izquierdo: } & \alpha''_i = 1 / 5,8 \zeta''_i \neq 1 \\ \text{Tramo externo derecho: } & \alpha'_i = 1 / 5,8 \zeta'_i \neq 1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Tramo interno, a izquierda } & \alpha'_i = \delta'_i - \sqrt{\delta'^2_i - 1/8 \zeta'_i} \\ \text{con } \delta'_i &= 0,5 + 1/16 \zeta'_i - 1/16 \zeta''_i \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Tramo interno, a derecha } & \alpha''_i = \delta''_i - \sqrt{\delta''^2_i - 1/8 \zeta''_i} \\ \text{con } \delta''_i &= 0,5 - 1/16 \zeta'_i - 1/16 \zeta''_i \end{aligned}$$

La longitud desde el apoyo de la armadura para momentos flectores negativos, no será menor que la amplitud a'_i o a''_i calculadas, más el decalaje s_d por esfuerzo cortante, según EHE, 44.2.3.4.2, y más la longitud de anclaje l_{bII} en posición II, según EHE, 66.5.

TABLA 2: FACTORES DE SOLICITACIÓN

TRAMO	Apoyo izquierdo		Vano	Apoyo derecho	
	μ'	β'		μ''	β''
Aislado	0,031	0,50	0,125	0,031	0,50
Externo, con continuidad derecha	0,022	0,43	0,086	0,086	0,57
Externo, con continuidad izquierda	0,086	0,57	0,086	0,022	0,43
Interno	0,063	0,50	0,063	0,063	0,50

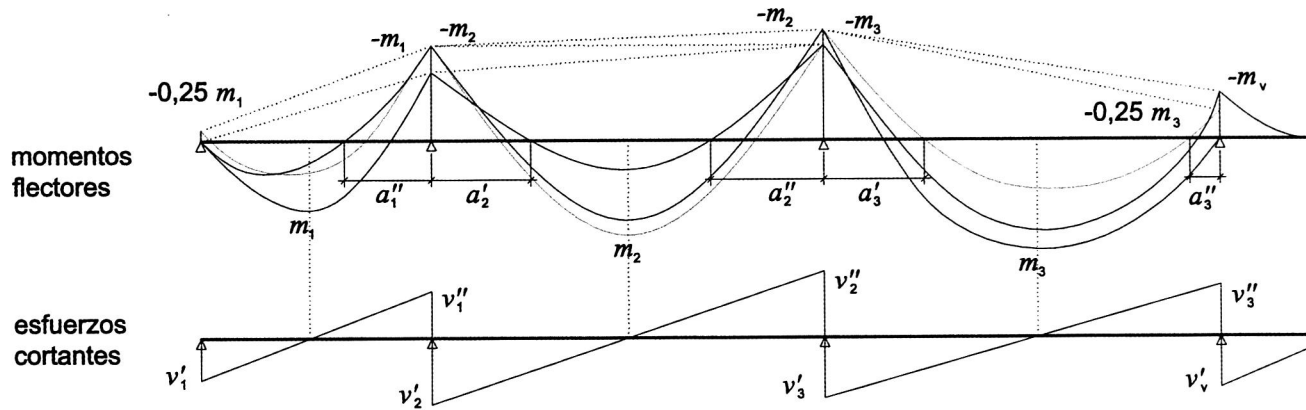


Fig. 6. Gráficas de sollicitación de un forjado de tres tramos y mirador en el extremo derecho, considerando la redistribución y alternancia de sobrecargas que dan las amplitudes a .

ESTADOS LÍMITES DE UTILIZACIÓN

En estados límite de utilización se determinan las sollicitaciones con las cargas características, en la combinación más desfavorable. Generalmente, se opera en régimen elástico, pues la influencia de la fisuración es baja y las rótulas plásticas, en general, aún no se han formado. Según EF 96, 6.3, se consideran dos estados límites de utilización: de fisuración y de deformación.

La fisuración del hormigón no debe rebasar el límite correspondiente al ambiente en que está situado el forjado. Según EHE, 8.2 los forjados de los edificios se proyectarán en ambiente de clase IIa: Interiores con humedad relativa alta ($> 65\%$), o con riesgo de condensaciones, que pueden producirse en cocinas, aseos, habitaciones mal ventiladas, sótanos, etc. Exteriores expuestos a la lluvia, o en contacto con terrenos sin agresividad por cloruros u otros agentes químicos. Abertura característica de la fisura: 0,3 mm para elementos armados, 0,2 mm para pretensados.

La deformación de un forjado de luz l no debe rebasar las dos siguientes limitaciones:

Flecha total, w_t , suma de la instantánea más la diferida por retracción, fluencia y relajación. Condición de flecha total, que cumplirá todo tramo de forjado:

$$w_t \leq l / 250 \leq l / 500 + 10 \text{ mm}$$

Flecha activa w_a respecto a un elemento afectable, que soporta o presiona el forjado, es la producida a partir del día en que se constituye dicho elemento. Elementos afectables son de dos clases:

Dañables, tabiques y particiones de ladrillo cerámico, con morteros de cemento o pasta de yeso.

Sensibles, tabiques muy rígidos, muros de cerramiento de fábrica, etc. Condición de flecha activa que cumplirán los forjados con elementos:

Dañables	$w_a \leq l / 400 \leq l / 800 + 6 \text{ mm}$
Sensibles	$w_a \leq l / 500 \leq l / 1000 + 5 \text{ mm}$

En la ficha autorizada se dan los momentos de fisuración y las rigideces total y fisurada, en flexión positiva y negativa, para facilitar las comprobaciones de fisuración y las de flecha total y flecha activa. Para determinar las deformaciones puede emplearse un método más preciso, por integración de secciones (Calavera y García, 1992).

ENLACE DEL FORJADO CON SUS ELEMENTOS DE APOYO

Elementos de apoyo de los forjados pueden ser: vigas o muros de hormigón armado, vigas prefabricadas de hormigón, vigas de acero laminado, muros de fábrica, etc. Las acciones verticales y horizontales que reciben directa o indirectamente los forjados se transmiten a los elementos de apoyo mediante enlaces.

El enlace forjado-apoyo se realiza en el hormigón armado de la viga o muro (fig. 7.b, fig. 9.a, b) o de una cadena de hormigón armado, de canto igual o menor que el forjado, que se dispone sobre los muros de fábrica (fig. 7.a, fig. 8.a) o sobre las vigas de acero laminado (fig. 8.c, d) o prefabricadas de hormigón (fig. 8.b). Las cadenas sobre muros se unen a estos por adherencia. Las cadenas sobre vigas, de acero laminado o prefabricados de hormigón deben unirse a estas mediante conectores, o por encastre parcial de la viga en el forjado.

En los planos de forjados del proyecto de ejecución se representarán los enlaces del forjado con sus elementos de apoyo detallando y dimensionando todos sus elementos: longitudinales de anclaje de las armaduras, amplitudes de macizado, dimensión y armado de las cadenas, armaduras bajas de enlace, etc.

En los forjados de nervios el enlace se realiza introduciendo en la cadena o en la viga de hormigón armado las armaduras longitudinales con las longitudes de anclaje que se prescriben a EHE, 66.5. los puntos de las inferiores con la longitud de anclaje l_{b1} medida desde el paramento de la cadena o sin viga (fig. 9.a), en recto si hay espacio suficiente o en patilla hacia arriba en otros casos. Las armaduras longitudinales superiores extremas, dobladas en patilla con la longitud de anclaje l_{b11} medida desde el eje del muro o viga de apoyo, y las interiores pasando a izquierda y derecha.

Los forjados de viguetas o losas, pueden tener enlace de los tipos: por entrega (fig. 8) o por solapo (fig. 9). En la Instrucción EF 96 hay un tercer tipo denominado enlace por introducción de la armadura saliente, pero es un enlace por solapo. Las denominaciones apoyo directo y apoyo indirecto que emplea EF 96 deben suprimirse, porque pueden confundir y son innecesarias.

En el enlace por entrega las viguetas o losas prefabricadas penetran en el elemento de apoyo. Pueden proyectarse con apoyo en muros de fábrica, vigas de acero laminado y vigas prefabricadas de hormigón (fig. 8). No puede disponerse con vigas planas de hormigón armado (fig. 9). Con vigas resaltadas o muros y forjados de viguetas es preciso disponer sus estribos, individuales o pareados, a

TABLA 3: FACTORES DE AMPLITUD DE MOMENTOS FLECTORES NEGATIVOS

Factor de alternancia ζ'_i o ζ''_i	Factor de amplitud α'_i o α''_i en tramo									
	externo	interno, siendo el otro factor de alternancia ζ'_i o ζ''_i								
		1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2
1,0	0,172	0,145	0,149	0,155	0,159	0,167	0,180	0,338	0,333	–
0,9	0,195	0,163	0,167	0,171	0,177	0,187	0,202	–	–	–
0,8	0,216	0,185	0,189	0,194	0,201	0,212	0,232	–	–	–
0,7	0,246	0,212	0,217	0,224	0,237	0,247	0,272	–	–	–
0,6	0,287	0,256	0,256	0,265	0,277	0,296	0,333	–	–	–
0,5	0,345	0,305	0,313	0,325	0,343	0,375	0,500	–	–	–
0,4	0,431	0,394	0,408	0,472	0,472	–	–	–	–	–
0,3	0,575	0,629	–	–	–	–	–	–	–	–
0,2	0,862	–	–	–	–	–	–	–	–	–
0,1	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–

– Indica que todo el tramo tiene momento flector negativo

separaciones de 1/2 ó 1/3 de la distancia entre ejes de viguetas, para que éstas puedan penetrar en los estribos, sin tener que desplazarlos o doblarlos, lo que está prohibido. En los planos quedarán definidas las posiciones de las viguetas y de los estribos, y en obra se comprobará que estas posiciones se mantienen. Suele haber dificultades para esto y por ello, aunque posible, no es aconsejable enlace por entrega con vigas resaltadas de hormigón armado. Con muros no suele haber dificultades. Con forjados de losa no es posible.

Consta el enlace por entrega de:

La armadura superior del forjado, con la longitud de anclaje, l_{bII} .

La vigueta o losa, con la entrega e que se requiere para que la presión de apoyo no sea superior a la resistencia de cálculo a compresión del material de apoyo, ni a la de hormigón, y no menor que 40 mm sobre fábricas, y que 30 mm sobre perfiles de acero o prefabricado de hormigón.

Un macizado de hormigón por supresión de piezas de entrevigado, con amplitud $a_e \geq 100$ mm desde el borde de la viga o muro de apoyo.

Enlace por solapo tendrán los forjados de viguetas y de losas sobre vigas planas de hormigón armado, o de vigas resaltadas, cuando en enlace por entrega no sea adecuado. Consta el enlace por solapo de:

La armadura superior del forjado, con la longitud de anclaje l_{bII} .

La vigueta o losa, con longitud hasta la cara de la viga.

Un macizado de hormigón, por supresión de piezas de entrevigado, de amplitud a_s .

Una armadura baja de solapo cuando sea necesaria.

Sección de enlace de un forjado con una viga de ancho b_a es la sección del forjado que coincide con la cara de la viga, y su abscisa desde el eje de esta es $x_e = 0,5 b_a$. En la sección de enlace la sollicitación del forjado, en valor de cálculo, es: esfuerzo cortante v_{ed} y momento flector m_{ed} .

Con carga uniforme q_d , en apoyo izquierdo, (Tabla 2) es:

Esfuerzo cortante: $v_{cd} = (\beta' l - x_e) q_d$

En apoyo exterior: $m_{ed} = \beta' x_e l q_d$

En apoyo interior: $m_{ed} = -(\mu' l - \beta' x_e) l q_d$

y equivale a un esfuerzo normal de tracción n_{ed} de valor

$$n_{ed} = v_{ed} - m_{ed}/z \neq 0$$

siendo:

z : Brazo de palanca del forjado que puede tomarse de valor $z = 0,9 d$

d : Canto útil del forjado

La amplitud de macizado con enlace por solapo será:

$$a_s \geq n_{ed} s / p f_{ct,k} \neq 150 \text{ mm}$$

siendo:

s : Distancia entre ejes de viguetas

p : Perímetro de la sección de la vigueta en contacto con el macizado

$f_{ct,d}$: Resistencia de cálculo a tracción del hormigón de obra

El hormigón de obra del macizado, con ancho $s - b_v$, entre viguetas de ancho inferior b_v , puede resistir un esfuerzo de tracción n_{ec} dado por:

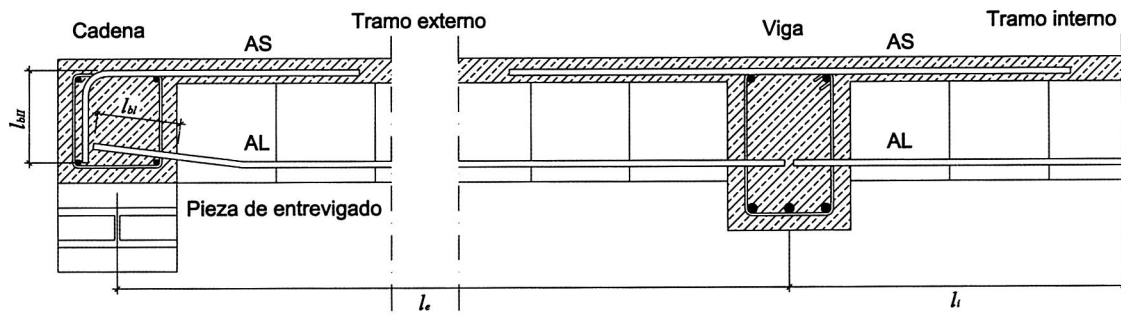
$$n_{ec} = 0,2 h (s - b_v) f_{ct,d} / s$$

Armadura de solapo no se requiere si $n_{ed} \leq n_{ec}$, lo que generalmente ocurre en los apoyos interiores en continuidad, y en los apoyos exteriores cuando es pequeño b_a . Si $n_{ed} > n_{ec}$ hay que disponer armadura de solapo cuya sección por nervio será:

$$A_c = n_{ed} s / f_{yd}$$

Y se compondrá de, al menos, dos barras, una a cada lado de la vigueta, incluidas en la viga y en la parte inferior del hormigón de macizado. En la viga, con la longitud de anclaje l_{bI} que corresponda al diámetro de la barra. En el macizado si es $a < l_{bI}$ puede doblarse hacia arriba en forma de patilla. En todo caso se recomienda tengan forma de horquilla para mejor sujeción.

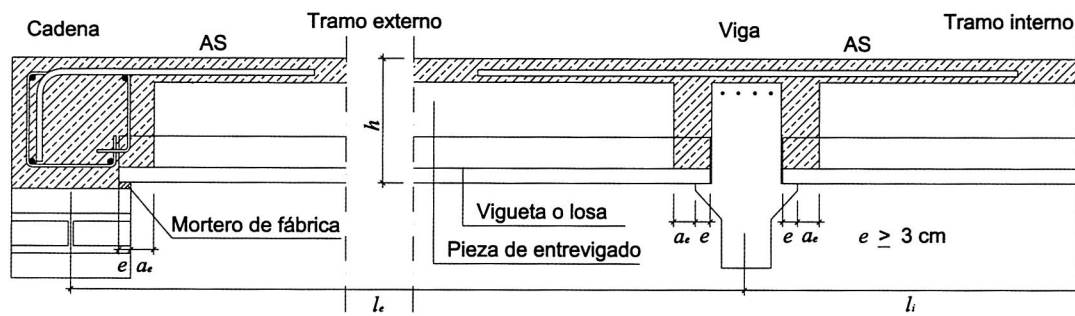
Los forjados de losas pueden proyectarse en enlace por entrega sobre vigas de acero laminado o prefabricadas de hormigón, y sobre muros de fábrica, disponiendo cadenas de hormigón cuya armadura tenga estribos de menor ancho que el apoyo para permitir la entrega. El macizado de hormigón puede suprimirse salvo en las losas que estén preparadas para realizarlo. En algún caso puede realizarse enlace por solapo, pero sólo con paneles preparados para realizar el macizado.



a) Apoyo exterior sobre muro de fábrica

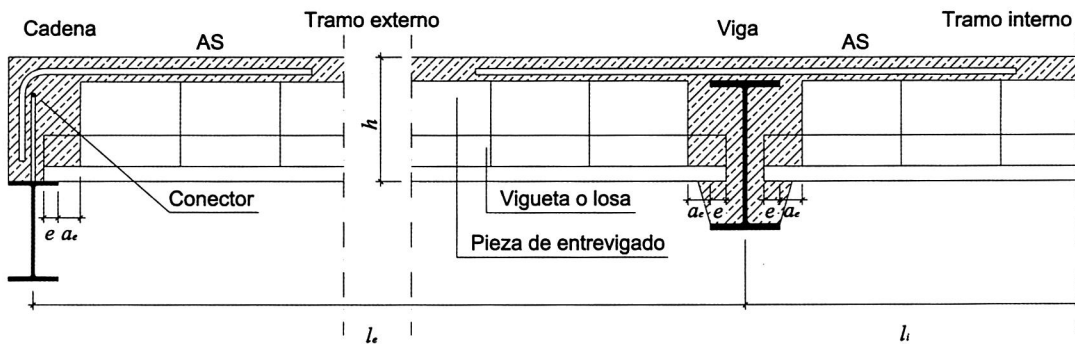
b) Apoyo interior sobre viga resaltada de hormigón armado

Fig. 7. Enlaces de forjados de nervios



a) Apoyo exterior sobre muro de fábrica

b) Apoyo interior con encastre sobre viga prefabricada



c) Apoyo exterior sobre viga de acero

d) Apoyo interior con encastre sobre viga de acero

Fig. 8 (a y b) y 8 (c y d). Enlaces por entrega de forjados de viguetas o losas

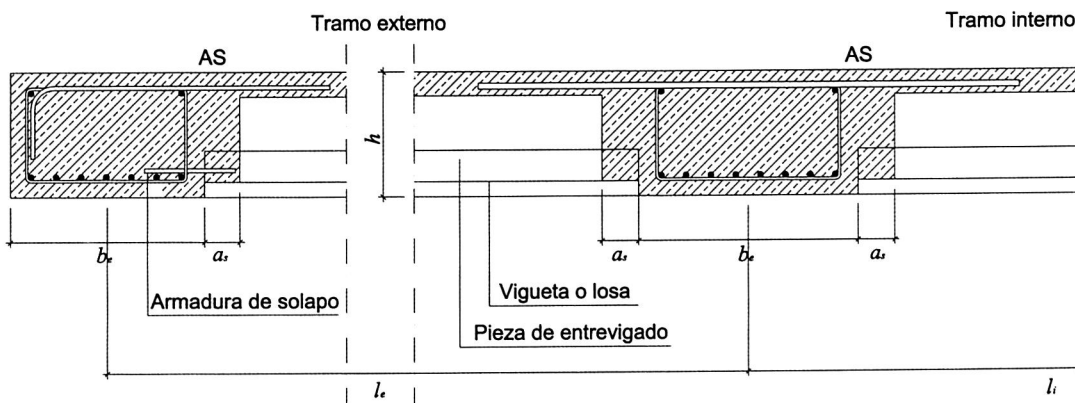


Fig. 9. Enlaces por solape de forjado de viguetas o losas sobre elementos de hormigón armado: vigas planas, vigas resaltadas o muros

BIBLIOGRAFÍA

- AMAT, J., TREPAT, F.X. 1996. Bases de datos de materiales de construcción. Hormigón y Acero, nº 199. Madrid.
- BEEBY, A. W. 1999. Text book of Structural Concrete. 4.3 Serviceability limit Principle. Fib, Federation Internationale du béton, Lausanne.
- CALAVERA, J. 1998. Cálculo, construcción y patología de forjado de edificación. 4ª edición. INTEMAC. Madrid.
- CALAVERA, J., GARCÍA DUTURI, L. 1992. Cálculo de flechas en estructuras de hormigón armado. INTEMAC. Madrid.
- LAHUERTA, J. A. 1943. Pisos de ladrillo armado. Ciclo de Conferencias del Colegio de Aparejadores, Madrid.
- LAHUERTA, J. A. 1954. Enseñanzas del ensayo de un forjado. Revista Nacional Arquitectura, nº 145, Madrid.
- LAHUERTA, J. A. 1959. Cómo calcular las viguetas de hormigón. Revista Arquitectura. C.O.A.M., nº 5 y 11, Madrid.
- LAHUERTA, J. A. 1967. Cálculo de los forjados por el método de las rótulas plásticas. Colegio Arquitectos, Bilbao.
- LAHUERTA, J. A. 1973. Ensayos sobre forjados de semiviguetas de hormigón pretensado en momentos negativos. Hormigón y acero, nº 107-108, Madrid.
- LAHUERTA, J. A. 1993. El arquitecto y los forjados de los edificios. Revista de edificación, nº 13, Pamplona.
- LAHUERTA, J. A., MODREGO, M. 1993. Proyecto de forjados considerando redistribución y alternancia de sobrecargas. Hormigón y Acero, nº 1489, Madrid.
- LAHUERTA, J. A., SANZ, C. 1997. Ficha técnica de un forjado nervado de hormigón armado. Hormigón y acero, nº 107-108, Madrid.
- LAHUERTA, J. A., SANZ, C. 2000. Ficha técnica de un forjado nervado de hormigón armado. Cuadernos INTEMAC, nº 37, Madrid.
- Mörsch, E. 1943. Spannbetontträger. Wittwer. Stuttgart.
- RITTER, M., LARDY, P. 1945. Vorgespanten Beton. Zurich.
- Norma CPI 96. Condiciones de protección de incendios en la edificación. Real Decreto 1370/1995. (B.O.E. 1996.01.29).
- Norma NCSE 94. Construcción sismoresistente. Real Decreto 2543/1994. (B.O.E. 1995.02.08).
- Norma CT 79. Condiciones térmicas de los edificios. Real Decreto 2429/1979. (B.O.E. 1979.10.22).
- Norma DGA 41. Proyecto y ejecución de las estructuras metálicas, hormigón armado y forjados de ladrillo armado. Real Decreto 1941.07.22. (B.O.E. 1988.11.19).
- Norma FT 66. Modelos de fichas técnicas para pisos y cubiertas. Orden MV 1966.02.25. (B.O.E. 1966.03.09).
- Norma FT 97. Modelos de fichas técnicas. Orden M.O.P.U. de 1989.11.29 (B.O.E. 1989.12.15) Resolución D.G.V.A.U; M.F. de 1997.01.30 (B.O.E. 1997.03.06).
- Norma MV 101-1962. Acciones en la edificación. Real Decreto 195/1965. (B.O.E. 1963.02.09).
- Sistemas especiales de forjados para la edificación. 1962. Tipos aprobados Dirección General de Arquitectura. Ministerio de la Gobernación. Madrid.

NORMATIVA

- Eurocódigo 1. UNE ENV 1991-1: 1997. Bases de proyecto en estructuras. AENOR, Madrid.
- Eurocódigo 1. UNE ENV 1991-2: 1997-98. Acciones sobre los edificios. AENOR, Madrid.
- Eurocódigo 2. UNE ENV 1992-1-1: 1993. Proyecto de estructuras de hormigón. AENOR, Madrid.
- Instrucción EF 88. Proyecto y ejecución de forjados unidireccionales de hormigón. Real Decreto 824/1998. (B.O.E. 1988.07.78).
- Instrucción EF 96. Proyecto y ejecución de forjados unidireccionales de hormigón. Real Decreto 2668/1996. (B.O.E. 1987.01.22).
- Instrucción EH 68. Proyecto y ejecución de obras de hormigón en masa o armado. Real Decreto 2987/1968. (B.O.E. 1968.12.03).
- Instrucción EH 73. Proyecto y ejecución de obras de hormigón en masa o armado. Real Decreto 2987/1968. (B.O.E. 1968.12.03).
- Instrucción EHE. Hormigón estructural. Real Decreto 3068/1973. (B.O.E. 1973.12.7/14).
- Instrucción EP 77. Proyecto y ejecución de obras de hormigón pretensado. Real Decreto 1408/1977. (B.O.E. 1977.06.22).
- Instrucción RC 97. Recepción de cementos. Real Decreto 776/1996. (B.O.E. 1988.06.13).
- Norma AE 88. Acciones en la edificación. Real Decreto 1370/1988. (B.O.E. 1988.11.19).
- Norma AU 66. Autorización de uso de los sistemas de forjados y estructuras Real Decreto 124/1966. (B.O.E. 1966.01.31).
- Norma AU 80. Autorización de uso de los sistemas de forjados y estructuras Real Decreto 1630/1980. (B.O.E. 1988.08.08).
- Norma CA 88. Condiciones acústicas de los edificios. Real Decreto 2115/1982. (B.O.E. 1982.10.07).
- Orden MOPU 1988.05.29 (B.O.E. 1988.10.08).