

El Arquitecto y los forjados de los edificios

JAVIER A. LAHUERTA VARGAS, DR. ARQUITECTO

RESUMEN. *Se analizan las funciones y responsabilidades anejas de los Arquitectos en el proyecto y en el control de la ejecución de los forjados de un edificio, a la vista de las regulaciones vigentes: Instrucción EF 88 y Autorización de uso.*

SUMMARY. *Functions and inherent responsibilities of the Architects in the design and in the execution control of the building floors are analyzed, with the point of view of the standing regulations Instrucción EF 88 and Use Approval.*

1. INTRODUCCION

Forjados son los elementos estructurales planos que constituyen los pisos de los edificios. El acabado superior del piso se realiza mediante un pavimento, y el inferior mediante un guarnecido enlucido de yeso o un cielorraso colgado.

Las particiones de las habitaciones: tabiques, tabicones, cítaras, etc., suelen sustentarse directamente sobre el supradós del forjado. En los casos en que es de prever modificaciones frecuentes en su posición suelen apoyarse sobre el pavimento mediante un durmiente de madera o metálico.

Los forjados inclinados se emplean también, para tejados, rampas, graderíos o escaleras. El acabado superior e inferior son los apropiados al caso.

Se constituían los forjados por viguetas de madera y entrevigado hasta la mitad del siglo XIX. Las viguetas fueron después sustituidas por perfiles IPN de acero laminado. Al comienzo del siglo XX se emplearon losas planas o nervadas de hormigón armado.

En España a partir de 1939, se desarrollaron sistemas de forjados de hormigón y cerámica armada en gran variedad de modelos. Diez años después, se inició el empleo de viguetas de hormigón pretensado con alambres de acero de alta resistencia.

Se emplean forjados de **dos clases**; pautados y reticulares.

- **Forjados pautados**, o unidireccionales. Tienen considerable resistencia a flexión en dirección de la pauta; constituida por nervios o viguetas paralelas,

y muy escasa perpendicularmente a ella. Se sustentan sobre vigas, resaltadas o planas, o muros, todos ellos perpendiculares o poco oblicuos a la pauta.

- **Forjados reticulares.** Están constituidos por nervios en dos direcciones ortogonales, sin o con piezas de entrevigado, en las que tienen considerable resistencia a flexión. Se sustentan en cuatro lados sobre muros o vigas que pueden ser planas, o sobre pilares aislados mediante ábacos enrasados o resaltados.

2. TIPOLOGIA DE LOS FORJADOS

Los forjados actualmente empleados, pueden clasificarse por su constitución en los siguientes tipos:

- **De hormigón armado in situ.** Losas macizas, forjados nervados, forjados reticulares. Estos dos conformados con moldes o aligerados con piezas de entrevigado.

- **De viguetas prefabricadas de hormigón.** Viguetas armadas o pretensadas, altas, bajas, tubulares, adosadas, etc. Con piezas de entrevigado, armaduras adicionales y hormigón de obra.

- **De viguetas de otra clase.** De madera escuadrada o laminada. De acero laminado o conformado. Requieren entrevigado, rigidización transversal y medios de enlace a la sustentación.

- **Mixtos de chapa y hormigón.** Placas de chapa conformada de acero con conectores. Armaduras adicionales y hormigón de obra.

Se tratará aquí sólo de los dos primeros tipos.

3. MISIONES DE LOS FORJADOS

Las misiones de los forjados son esencialmente tres:

- **Soportar** directamente las acciones gravitatorias: concarga: peso propio, pavimento, cielorraso, particiones, cerramientos, etc., sobrecargas de uso o de nieve. Por flexión vertical transmiten las acciones a las vigas o muros de sustentación.

- **Enlazar** y arriostrar los elementos resistentes horizontales y verticales de la estructura del edificio.

- **Recibir** indirectamente las acciones horizontales: viento, empujes y sísmicas. Por flexión en su plano las transmiten a los pórticos o muros estabilizadores de la estructura.

Importancia de los forjados. Todos los edificios salvo pocas excepciones tienen forjados. El coste de éstos es 30-40 % del de la estructura. Son los elementos estructurales más sensibles por su pequeño espesor.

Patología. El 15-25 % de los casos patológicos en la edificación se deben a forjados erróneamente proyectados o defectuosamente contruidos. La mitad de estos casos aparecen con el edificio habitado.

4. NORMATIVA PARA FORJADOS

La normativa para el proyecto y ejecución de los forjados nervados de hormigón armado o pretensado, se inició en 1941 y ha tenido las siguientes fases:

- **Norma DGA 41**¹. Estructuras de hormigón armado. Art. 12. Suelos nervados. Anejo: Forjados de ladrillo armado.

- **Instrucción EH 68**². Obras de hormigón en masa o armado. Art. 47. Piezas en T.

- **Instrucción EH 73**³. Obras de hormigón en masa o armado. Art. 43. Forjados de edificación. Sin referencia a las viguetas de hormigón pretensado.

- **Instrucción EP 77**⁴. Obras de hormigón pretensado. Art. 58. Forjados con elementos prefabricados pretensados.

- **Instrucción EF 88**⁵. Forjados de hormigón armado o pretensado. Refunde y completa las prescripciones para forjados de las anteriores Instrucciones EH y EP. Utiliza las prescripciones generales de esta normativa.

Actualmente, una Comisión del M.O.P.T., está trabajando en su revisión. Se prevén bastantes modificaciones respecto a la EF 88, y es de desear su próxima aparición.

Campo de aplicación. El art. 1 de EF 88, establece que se aplicará a los forjados con nervios de hormigón, flectando esencialmente en una dirección. No incluye los forjados reticulares.

Limitaciones, que si se rebasan requieren justificación del autor del proyecto:

- Canto del forjado: $\leq 0,50$ m
- Separación entre ejes de nervios: $\leq 1,25$ m
- Luz de cada tramo: $\leq 10,00$ m

Es justificable técnica y económicamente en algunos casos el empleo de forjados con cantos o luces mayores. El cálculo según EF 88 suele ser apropiado.

Prescripciones. Se establecen en EF 88 para:

- Las viguetas de hormigón o de cerámica y hormigón armado o pretensado (art. 2)
- Las piezas de entrevigado (art. 3)
- La geometría de la sección del forjado (4.1)
- Las armaduras longitudinales (4.3)
- La armadura de reparto (4.2)
- El canto mínimo del forjado (6.3, 5.3)

Métodos de cálculo para los forjados se establecen en el art. 6 y para los apeos en el art. 5.

Disposiciones constructivas en los art. 7 y 8, y el control de fabricación y ejecución en el art. 9

La autorización de uso, y resto de documentación en el art. 10.

5. AUTORIZACION DE USO

Cada modelo de forjado, que utilice elementos resistentes prefabricados, requiere para ser legalmente empleado, haber obtenido **autorización de uso** del Ministerio de Obras Públicas y Transporte⁶.

La **autorización de uso** se solicita por el fabricante de los elementos resistentes, acompañando:

- **Memoria técnica**, que describe los elementos y las características mecánicas que el fabricante garantiza que reunirá cada uno de los materiales que los constituyen; y desarrolla el cálculo de los forjados realizados con ellos.

- **Ficha de características técnicas**⁷, que incluye las **prescripciones del forjado**, y el **manual de cálculo** de los tipos de forjados diferentes en cantos, interejos, armaduras, etc. que pueden realizarse con el modelo⁸.

El sello de la autorización de uso lo estampa el M.O.P.T. en esta Ficha, fotocopia de la cual debe ser facilitada por el fabricante a todo usuario que la solicite.

Prescripciones del forjado:

- Forma y dimensiones de los componentes.
- Características que su fabricante garantiza para los componentes: hormigón, acero, etc.
- En los elementos pretensados las tensiones y deformaciones remanentes de fabricación.
- Características exigibles al hormigón y armaduras de obra.

Manual de cálculo de los tipos de forjado.
Dando:

En **flexión positiva**:

- Tipo de vigueta o armadura inferior
- Momento flector último m_u
- Momento flector de fisuración m_f
- Rigidez de la sección entera k_I
- Rigidez de la sección fisurada k_{II}
- Condiciones de fisuración con $m_k = m_u / \gamma_f$

En **flexión negativa**:

- Armadura superior
- Momento flector último m'_u
- Armadura inferior precisa sin hormigón
- Momento flector de fisuración m'_f
- Rigidez de la sección entera k'_I
- Rigidez de la sección fisurada k'_{II}
- Esfuerzo cortante último v_u

6. COMPONENTES DE LOS FORJADOS

Los componentes de los forjados, especificados en la Autorización de uso, cumplirán las siguientes prescripciones.

Hormigón de obra. En las Prescripciones del Proyecto, y en un cuadro rotulado en los Planos de la estructura, deben figurar al menos las cinco condiciones siguientes:

- **Tipo y clase del cemento.** Según RC 88⁹ En general se indicarán II-35. Pueden especificarse además que sea F, S, Z, o C.

- **Contenidos límites de cemento.** Suelen especificarse los de EH 91¹⁰, de su art. 14:

- $\geq 250 \text{ kg/m}^3$ para proteger las armaduras
- $\leq 400 \text{ kg/m}^3$ para prevenir retracción excesiva.

- **Tamaño del árido.** En general se especifica de 20 mm, que sirve para forjados, vigas y pilares.

- **Consistencia del hormigón.** Suele prescribirse consistencia blanda, de $8 \pm 2 \text{ cm}$. Puede modificarse en obra previo acuerdo.

- **Resistencia de proyecto del hormigón.** Base de cálculo de la estructura según EH 91. Puede prescribirse de 200 kp/cm^2 . Hoy, salvo excepción, no hay razón para un valor menor.

Losa superior de hormigón. Para dar rigidez al forjado en su plano. Exige EF 88, art. 4.1 que tenga espesor h_o

- $\leq 4 \text{ cm}$ sobre piezas de entrevigado
- $\geq 5 \text{ cm}$ en otro caso

Por encima de viguetas de hormigón puede tener 3 cm.

Piezas de entrevigado. Pueden fabricarse de mortero de cemento, cerámica, o material aislante que no dañe al hormigón. Son de dos clases:

- **Aligerantes.** Se les exige sólo resistencia en vano no inferior a 100 kp según EF 88 art. 9.1.1.

- **Resistentes.** Colaboran a la resistencia mecánica de la sección, a compresión y a corte. Además de la resistencia en vano, se les exige resistencia característica a compresión según EF 88, art.9.1.1, no inferior a 175 kp/cm^2 , ni a la de proyecto del hormigón de obra.

Armaduras de obra. Generalmente barras corrugadas de acero AEH 400 S o AEH 500 S.

Cumplirán lo que se exige en EH 91, art. 9, y además:

Armadura longitudinal, según EF 88, art.4.3. En cada nervio se compondrá al menos de dos barras, y su cuantía cumplirá:

$$\rho = A_s / h b_w \geq 0,08 f_{cd} / f_{sd} \leq 0,006$$

siendo:

A_s Área de la sección de la armadura longitudinal

h Canto del forjado en que se incluye la vigueta

b_w Ancho mínimo del forjado para el cálculo a corte

f_{cd} Resistencia de cálculo del hormigón de la vigueta

f_{sd} Resistencia de cálculo del acero de la armadura

Armadura de reparto, según EF 88, art.4.2. En la losa superior del forjado se dispondrá en dos direcciones cumpliendo:

Perpendicular a los nervios:

$$A_1 \geq 500 h_o / f_{yd}$$

Paralela a los nervios:

$$A_2 \geq 250 h_o / f_{yd}$$

7. VIGUETAS DE HORMIGON ARMADO

Son elementos lineales, prefabricados generalmente con hormigón en taller, también con piezas cerámicas y hormigón en taller o en obra, con armaduras de acero longitudinales y a veces transversales.

El hormigón de las viguetas altas, adosadas o paneles es, en general, de resistencia elevada, H250 a H500. El de las viguetas de celosía suele ser de resistencia menor, H175 ó H200. Se especifica en la Ficha de Características Técnicas del forjado.

Las piezas cerámicas para viguetas o paneles prefabricados tendrán, según EF 88 art. 2.2, resistencia característica no inferior a 250 kp/cm^2 ni a la del hormigón utilizado.

Las armaduras cumplirán las condiciones EH 91 art.9. Suelen emplearse barras corrugadas de acero AEH 500 S, o alambres trellados corrugados de acero AEH 500 T.

La armadura longitudinal cumplirá las condiciones de EH 88, art. 4.3.

La armadura transversal de las celosías suele ser de $\varnothing 4$ ó $\varnothing 5$

Las **distancias** entre barras o grupos de barras, y de estos a los paramentos, tienen que cumplir lo establecido en EH 91, art.13.

Los grupos de dos barras, una básica de $\varnothing 6$ y otra adicional $\varnothing_a$, frecuente, en las viguetas de celosía. El diámetro equivalente $\varnothing_e$, que se emplea para las exigencias es:

$$\varnothing_e = \sqrt{6^2 + \varnothing_a^2}$$

Barra adicional $\varnothing_a$, mm	6	8	10	12	14	16
Diám. equivalente $\varnothing_e$, mm	9	10	12	14	15	17

Las exigencias son:

Distancia entre barras o grupos:

≥ 15 mm (según EH 88, art. 2.1)

$\geq$ Diámetro de la barra o grupo que sea mayor

$\geq$ Tamaño del árido $\times 1,25$

Distancia de una barra o grupo a un paramento:

Resistencia del hormigón kp/cm ²	Mínima distancia en mm, en ambiente		
	I	II	III
≤ 200	15	25	35
250 a 350	15	20	30
≥ 400	15	20	25

$\geq$ Diámetro de la barra o grupo

$\geq$ Tamaño del árido $\times 0,8$

Tamaño del árido es la mínima abertura de tamiz UNE 1050¹¹: 5; 6,3; 8; 10; 12,5; 16; 20 por el que pasa más del 90 % en peso del árido, cuando además pasa el total por el tamiz de abertura doble.

8. VIGUETAS PRETENSADAS

Son elementos lineales prefabricados en taller con hormigón de resistencia alta y tendones pretesos, alambres o torzales, de acero de pretensado, de alto límite elástico.

El **hormigón** según EP 80¹², art.58.2 cumplirá las condiciones:

Resistencia de proyecto: $f_{bk} \geq 350$ kp/cm²

Resistencia de transferencia: $f_{bs} \geq 250$ kp/cm²

Su resistencia a tracción es: $f_{br} = 0,45 f_{bk}^{2/3}$

Es frecuente el empleo de hormigón H500. Se consigue con cemento 55A, baja relación agua/cemento y compactado por vibroprensado. Esta resistencia podrá elevarse a 700 ó 1000 kp/cm² con adición de microsílíce, aún poco frecuente.

Los **tendones**, alambres o torzales cumplirán las condiciones de UNE 36095-85¹³, con relajación no superior a R5. Su longitud de anclaje, l_s será:

Alambres: $l_s \leq 100 \varnothing$; ($\varnothing$ diámetro del alambre)

Torzales: $l_s \leq 150 \varnothing$; ($\varnothing$ de los alambres del torzal)

Suele emplearse alambre grafilado AH 1770-R5 de $\varnothing 4$ ó $\varnothing 5$, $f_{py} = 15400$ kp/cm², $f_{pr} = 18000$ kp/cm².

Cuantía geométrica, según EF 88, art.2.3:

$$\rho = A_p / A_b \leq 0,0015$$

$$\rho_i = A_{pi} / A_{pi} \geq 0,05$$

A_p Área de la sección total del tendón

A_b Área de la sección bruta de la vigueta

A_{pi} Área de la parte inferior del tendón

A_{bi} Área de la sección de la vigueta cobaricéntrica con la parte inferior del tendón.

Las **distancias** entre alambres y a los paramentos cumplirán lo exigido en EP 80, art.20.3.

Tesado del tendón. En banco de 100 a 150 m. Mediante gatos contra cabezales, con tensión inicial σ_{po} , que según EP 80 art.39.2 cumplirá:

$$\sigma_{po} \leq 0,75 f_{pr}$$

$$\sigma_{po} \leq 0,90 f_{pk}$$

Hormigonado. Mediante moldes o máquina continua de extrusión se hormigona sobre el tendón tesado. El hormigón se somete después a curado que acelera su endurecimiento.

Transferencia. El tendón se destesa suavemente. Está unido por adherencia al hormigón que se acorta simultáneamente con éste y queda pretensado. Después se cortan los alambres o se sierra con disco la vigueta continua.

9. TENSIONES DE FABRICACION

Las **pérdidas de tensión** en el tendón de las viguetas pretensadas hasta la transferencia, según EP 80, art. 39, son:

$\Delta\sigma_1$ Por penetración de cuñas en los anclajes

$\Delta\sigma_2$ Por relajación del acero

$\Delta\sigma_3$ Por dilatación térmica en el curado

$\Delta\sigma_4$ Por retracción del hormigón

$\Delta\sigma_e$ Por acortamiento elástico del hormigón

Tensión media inicial σ_{pi} en el tendón:

$$\sigma_{pi} = \sigma_{pi} - \Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_2 - \Delta\sigma_3 - \Delta\sigma_4 - \Delta\sigma_e$$

$$\delta_i = 1 - \sigma_{pi} / \sigma_{po}$$

En viguetas de cuantía $\rho = A_p / A_b$, según EH 88, art.4.3, se considerará para el cálculo:

$$\delta_i \geq 0,12 + 5\rho$$

Fuerza de pretensado inicial:

$$P_i = \sigma_{pi} A_p$$

Tensiones iniciales en el hormigón:

Fibra superior:

$$\sigma''_{bi} = -P_i / A_h - (P_i e / I_h) z''$$

Fibra inferior:

$$\sigma'_{bi} = -P_i / A_h - (P_i e / I_h) z'$$

e Excentricidad de tesado

A_h, I_h Términos de la sección homogeneizada de la vigueta

z', z'' Distancias del baricentro abajo y arriba

Las tensiones iniciales cumplirán las condiciones:

$$|\sigma'_{bi}| \leq 0,67 f_{bs}$$

$$|\sigma''_{bi}| \leq 0,67 f_{bs} \quad \sigma''_{bi} \leq f_{bs}$$

Pérdidas de tensión adicionales, a largo plazo 10⁶ h:

$\Delta\sigma_{2a}$ Por relajación del acero

$\Delta\sigma_{4a}$ Por retracción del hormigón

$\Delta\sigma_5$ Por fluencia del hormigón comprimido

Tensión media final en el tendón:

$$\sigma_{pf} = \sigma_{pi} - \Delta\sigma_{2a} - \Delta\sigma_{4a} - \Delta\sigma_5$$

$$\delta_f = 1 - \sigma_{pf} / \sigma_{po}$$

Según EF 88, art.6.3.2, se considerará en el cálculo:

$$\delta_f \nless (0,14 + 16\rho) \exp(32\rho e / i_h) \nless 0,41$$

con:

$$i_h = \sqrt{I_h / A_h}$$

Tensiones remanentes en el hormigón:

$$\text{Fibra superior : } \sigma''_{br} = \eta \sigma''_{bi}$$

$$\text{Fibra inferior : } \sigma'_{br} = \eta \sigma'_{bi}$$

$$\eta = (1 - \delta_t) / (1 - \delta_f)$$

Dilatación remanente en el tendón:

$$\varepsilon_{pr} = (\sigma_{pi} - \Delta\sigma_{4a} - \Delta\sigma_{5a}) / E_p$$

Se precisa en el cálculo del momento último.

10. CALCULO DE LOS FORJADOS

Cada tramo de los forjados de un edificio tiene que calcularse en estados límites últimos y en estados límites de utilización.

Estados límites últimos

Bajo las cargas ponderadas, en la combinación más desfavorable, la sollicitación de cálculo producida en cada sección del forjado, no rebasará la sollicitación última de ésta:

- Momento flector último positivo en vanos
- Momento flector último negativo en apoyos
- Esfuerzo cortante último en apoyos

En los forjados con elementos prefabricados figuran en la Ficha de características con Autorización de uso.

La sollicitación de cálculo en cada sección de cada tramo se calcula a partir de las cargas características.

Estados límites de utilización

Bajo las cargas características:

- La fisuración del hormigón no rebasará el límite correspondiente al ambiente en que esté situado el forjado.

Ambiente	I	II	III
Anchura de fisura, mm	$\leq 0,4$	$\leq 0,2$	$\leq 0,1$

La deformación del tramo cumplirá: según EF 88, art. 6.3.5

- **Flecha total** w_t , instantánea, más diferida por retracción y fluencia.

Cumplirá con elementos de toda clase:

$$w_t \leq l / 250 \leq l / 800 + 5 \text{ mm}$$

- **Flecha activa** w_a , respecto a un elemento dañable:

$$w_a = w_t - w_e$$

siendo:

w_e la flecha ya producida al construir este elemento.

Cumplirá, con elementos:

• dañables:

$$w_a \leq l / 400 \leq l / 800 + 6 \text{ mm}$$

• muy dañables:

$$w_a \leq l / 500 \leq l / 1000 + 5 \text{ mm}$$

La flecha requiere calcular el momento flector de fisuración positivo y negativo y las rigideces, de la sección entera y fisurada en vano y en apoyo.

11. MOMENTO ULTIMO POSITIVO

El momento flector último positivo m_u , se exige darlo en la Ficha por m de ancho de forjado. Conviene dimensionar el forjado de modo que la losa superior de hormigón de espesor h_o resista la compresión de la flexión positiva sin requerir armadura de compresión:

$$g \leq h_o / z$$

Forjados armados, con nervios o viguetas

$$m_u = A_s f_{sd} (h - d - g) / s$$

siendo:

A_s Area de la sección de la armadura por nervio

f_{sd} Resistencia de cálculo del acero

h Canto total del forjado

d Desvío de la armadura

$$g = A_s f_{sd} / 2 f'_{cd} s$$

Profundidad del centro de compresión

$$f'_{cd} = 0,85 f_{ck} / \gamma_c$$

Resistencia de cálculo reducida del hormigón de obra

s Separación entre ejes de nervios

Forjados con viguetas pretensadas

$$m_u = \Sigma A_{pj} \sigma_{pj} (h - d_j - g) / s$$

siendo:

A_{pj} Area de la sección del tendón j

σ_{pj} Tensión final del tendón j , dada por:

$$\varepsilon_{pj} = \sigma_{pj} / (E_p + 0,823 (\sigma_{pj} / f_{pd} - 0,7)^5)$$

$$\varepsilon_{pj} = \varepsilon_{pr} + \varepsilon_{pf}$$

ε_{pr} Dilatación remanente en el tendón

ε_{pf} Dilatación de flexión del tendón j

h Canto total del forjado

d_j Desvío del tendón j

$$g = \Sigma A_{pi} \sigma_{pi} / 2 f'_{cd} s$$

Profundidad del centro de compresión

12. MOMENTO ULTIMO NEGATIVO

La **flexión negativa** que se produce en zonas extremas de cada tramo de forjado, por empotra-

miento parcial en el elemento sustentante, o por continuidad de tramos, da lugar a: **tracción** arriba que se resiste mediante armadura superior, y **compresión** abajo que la resiste el nervio solo o con armadura de compresión, o ampliando el ancho del nervio por supresión de piezas de entrevigado.

Como armadura superior es frecuente emplear dos o más barras sobre el nervio.

Es más favorable para la fisuración del hormigón, disponer sobre los apoyos esta armadura uniformemente distribuida por toda la longitud del elemento sustentante, viga o muro, con barras a separación no superior al canto del forjado¹⁴.

Así pueden emplearse en las zonas de momentos negativos, paneles de malla electrosoldada, cuya armadura perpendicular a los nervios se dimensiona como armadura reparto. Estos paneles solaparán con los de la armadura de reparto de las zonas de momentos positivos.

El **momento flector último negativo** por metro de forjado puede calcularse con:

$$m'_u = -a'_s f_{sd} (h - d' - g')$$

siendo:

a'_s Área de la sección de la armadura superior por m de forjado

f_{sd} Resistencia de cálculo del acero

h Canto total del forjado

d' Desvío de la armadura superior

g' Distancia del centro de compresión a la fila inferior

Con forjado nervado, de nervios de anchura b_w , incluidos los tabiques adheridos de piezas resistentes puede tomarse $g' = d$ si se cumple:

$$a'_s f_s \leq (A'_c f'_{sd} + A_s f_{sd}) / s$$

siendo:

$A'_c = 2 d b_w$ Área del hormigón del nervio

A_s Área de la armadura inferior de compresión

Si se hormigona el total, suprimiendo las piezas de entrevigado, será:

$$g' = a'_s f_{sd} / 200 f'_{cd}$$

13. ESFUERZO CORTANTE ULTIMO

Sin armadura transversal, con sólo el hormigón de los nervios, y si se emplean piezas resistentes de entrevigado, con los tabiques adheridos de éstos, el esfuerzo cortante último por m puede calcularse con:

$$v_{u1} = \xi \eta f_{cv} b_w (h - d) / s$$

siendo:

$\xi = 1,6 (h - d) \leq 1$ con $h - d$ en metros

Factor de influencia del canto

$\eta = 1 + 50 \rho \leq 2 / \xi$

Factor de influencia de la cuantía

$$f_{cv} = 0,5 \sqrt{f_{ck} / \gamma_c}$$

Resistencia virtual a corte del hormigón

b_w Anchura mínima del nervio

h Canto total del forjado

d Desvío de la armadura longitudinal

s Separación entre ejes de nervios

Si el hormigón de las viguetas tiene resistencia $f_{bk} > f_{ck}$, puede sustituirse $f_{cv} b_w$ por:

$$f_{bv} b_{wb} + f_{cv} b_{wc}$$

Con armadura transversal, en el caso de viguetas con celosía externa, el esfuerzo cortante último por m puede calcularse con:

$$v_{u2} = f_{cv} b_w (h - d) / s +$$

$$+ 0,9 f'_{sd} A_t (\sin \alpha + \cos \alpha) (h - d) / s_t s \leq v_{u1}$$

siendo:

$$f'_{sd} = f_{sd} \leq 4200 \text{ kp / cm}^2$$

Resistencia de cálculo de la armadura a corte

A_t Área de la sección de cada rama de la armadura transversal

α Angulo de la armadura con el eje del nervio $45^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$

s_t Separación entre ramas de armadura transversal

En las celosías sólo es efectiva una rama porque en la otra es $\alpha > 90^\circ$ y su efecto no se considera.

Si $v_{u2} < v_{u1}$ el efecto de la armadura transversal es nulo sobre la resistencia. En algunas viguetas con celosía se duplica ésta en los extremos, o se añaden estribos para aumentar v_{u2} .

14. LOS FORJADOS EN EL PROYECTO

El arquitecto elegirá el modelo de forjado, en ocasiones de acuerdo con el promotor, y solicitará de su fabricante la ficha de características técnicas, con autorización de uso.

En el proyecto del edificio se incluirá:

Memoria. Tipo de forjado. Tipo de ambiente. Dañabilidad de los elementos que sustenta o comprime el forjado.

Anejo estructural. La ficha, y los cálculos de todos los nervios de los forjados del edificio, realizados con sus datos.

Planos. Las plantas de estructura, con siglas para cada nervio, dimensiones, viguetas y armaduras de cada tramo.

Prescripciones y presupuesto. Lo correspondiente.

No es competencia del fabricante calcular los forjados de un determinante edificio, ni redactar los correspondientes planos, sino del arquitecto. Si éste no actúa así, hay dejación de función, pero sigue recayendo sobre él la responsabilidad del cálculo y proyecto de los forjados, aunque no lo haya hecho él. Esta responsabilidad no es delegable.

El **canto** de los forjados de cada planta se elige de modo que cumpla las condiciones del ap. 6.3.5 de la Instrucción EF 88 en función de:

- Dañabilidad de los elementos que sustenta.
- Tipo de tramo: Aislado, externo, interno, vuelo.
- Acero empleado: AEH 400 o AEH 500.

Las solicitaciones de cada tramo de forjado con las cargas de cálculo se calcularán después, en general considerando la redistribución que admite la Instrucción EF 88.

Se comprobará finalmente el cumplimiento de las condiciones de fisuración y de deformación.

El **promotor**, por indicación del constructor, a veces al comenzar la obra propone cambiar el modelo de forjado. El arquitecto puede o no aceptar este cambio. En caso de hacerlo solicitará la Ficha del nuevo modelo y repetirá con ella cálculos y planos.

El fabricante a veces aporta estos planos, pero no debe admitirlos el arquitecto sin una revisión cuidadosa. Los honorarios de éste trabajo adicional del arquitecto deben reclamarse.

15. PLANOS DE LOS FORJADOS

Las **plantas de estructura** de todos los pisos del edificio, que difieren en disposiciones y, o cargas, se representan en planos antes de comenzar el cálculo de forjados.

Se recomienda escala 1/100. En escala 1/50 suelen resultar incómodos para su manejo. Deben numerarse los pisos de abajo a arriba.

Las **vigas** de la estructura se representarán en planta con su ancho, mediante doble línea.

Cada tramo de viga quedará designado por el número del piso, y las siglas de las sustentaciones extremas:

- Sobre pilar con el número de éste.
- Sobre viga o muro, con una sigla literal del extremo.

Los **nervios** del forjado se dibujarán en planta todos en su posición; con recta única suele ser suficiente. Se evitarán los nervios no entestados que permite EF 88, art. 7.2

Se representarán todos los huecos para ventilaciones, conducciones, etc.

Se dispondrán y se representarán los brochales cuando sean precisos.

Se **designará** cada tramo de forjado diferente en: **tipo**: aislado, externo, interno, voladizo, en **luz** entre ejes de apoyos, o en **carga**, mediante una sigla, que se rotulará sobre el nervio paralela a éste. Con un segmento biflecha se abarcan todos los nervios iguales paralelos.

Cada nervio, en serie continua de tramos, se representará, después de terminado su cálculo, en otro plano, en alzado, conveniente en escala 1/50.

Cada tramo de la serie tendrá rotulado: Sigla del tramo. Luz entre ejes de apoyos. Tipo de viga, referido a la Ficha. Diámetro y dimensiones de las armaduras.

16. DISPOSICIONES CONSTRUCTIVAS

Cada **plano de nervios** llevará además:

- Sección, en 1/ 10, del modelo de forjado, tomada de la Ficha.
- Cuadro con las características resistentes del hormigón y de los aceros de obra, según EH 91, art.2.3
- Cuadro con las cargas características con que se han calculado los forjados del plano.

El **enlace** de las viguetas en el apoyo, objeto de EF 88, art. 7.1 debe quedar completamente especificado en los planos.

El denominado **apoyo directo** sobre vigas resaltadas requiere establecer en el plano exacta distribución de los estribos de la viga, de modo que puedan penetrar las viguetas sin tener que doblar, o mover los estribos, lo que debe prohibirse. Sobre muros no suele haber dificultad por la mayor separación de los estribos de la cadena.

El denominado **apoyo indirecto** es el único posible con vigas planas, y con vigas resaltadas en muchos casos. Las viguetas tendrán longitud igual a la distancia entre caras de vigas más 2 cm, quedando así a 1 cm de los estribos. En el plano se marcará la **zona macizada** del forjado, contigua a la viga, que por adherencia mantiene la vigueta. El ancho de esta zona es en general de 10 cm. Las barras de acero cortas adicionales de EF 88 Fig 7.1 son incómodas e inoperantes.

17. CALCULO DEL DIMENSIONADO

Las **cargas características** que se consideran en los forjados se definen en la Norma AE 88¹⁵:

Concarga: Uniforme según AE88, art. 2.2 a 2.4:

- Peso propio del forjado
- Pavimento y cielorraso
- Carga equivalente de tabiquería AE 88, art. 3.3
- Sobrecarga de uso AE 88, art. 3.1, o de nieve, art. 4.3, o lineales, art. 3.4.

La carga uniforme de cálculo será:

$$q_d = \gamma_r q_k$$

Las **solicitaciones** en estados límites últimos pueden calcularse según EF 88, art.6, considerando redistribución anelástica, de modo que en el agotamiento, los momentos de vano pueden igualarse a los momentos de apoyo¹⁶.

En los apoyos extremos se considerará un momento flector negativo, 1/4 del del vano.

La solicitación de cálculo de un tramo de luz l , con carga uniforme q_d con la hipótesis aceptada puede calcularse mediante las fórmulas:

– Momento flector:

$$m_d = \mu q_d l^2$$

– Esfuerzo cortante:

$$v_d = \beta q_d l$$

con los valores μ y β del cuadro:

Tramo	Apoyo Exterior		Vano		Apoyo Interior	
	μ	β	μ	β	μ	β
Aislado	- 0,032	0,50	0,125	0	-	-
Extremo	- 0,022	0,43	0,086	0	- 0,086	0,57
Interno	-	-	0,063	0	- 0,063	0,50
Vuelo	-	-	-	-	- 0,5	1

Cuando hay cargas lineales: bordes de vuelo, muros que apoyan transversalmente, etc. se añadirán los momentos que produzcan.

En cada apoyo se tomará como momento flector el del tramo que lo tenga mayor, sin modificar el momento positivo del vano, según EF 88, art.6.2.

El **dimensionado** de viguetas y armaduras se realiza leyendo en la Ficha la que tenga m_u , v_u inmediatamente superior al m_d , v_d calculado.

Los resultados, cargas, solicitaciones, viguetas y armaduras, se consignarán en listados del Anejo de Cálculo, y se trasladarán a los planos de alzado de los nervios.

La longitud de las armaduras sobre los apoyos puede determinarse mediante gráficas de momentos o mediante las reglas aproximadas de EF 88 art.1.2.

Los ejes de las vigas planas coincidirán, si es posible con los centros de los pilares. Si no pudiera ser así hay que considerar en los pilares, el incremento de momento por excentricidad.

18. FISURACION Y DEFORMACION

Las **fisuras** producidas por las cargas características, tendrán anchura no superior a los límites indicados. Esto se comprueba mediante la Ficha de características (F.C) del forjado. En ella figuran los momentos de servicio admisibles en cada ambiente, según lo establecido en EF 88, art.6.3.4.

El dimensionado realizado, según 15., con la solicitación de cálculo se comprueba así a fisuración. Si no cumple hay que sobredimensionar. Rara vez en ambiente I y II, frecuentemente en ambiente III, agresivo.

La **flecha** se calcula en régimen elástico, según EF 88, art.6.3.5, en el centro de los tramos de los

forjados del edificio. Basta en los de máxima luz y carga¹⁷.

Flecha total instantánea de un tramo:

$$w = l^2 (0,1042 m + 0,0625 (m' + m''))/k_e$$

con:

m Momento isostático $m = q_k l^2/8$

$m'm''$ Momentos negativos del extremo izquierdo y derecho del tramo. Pueden obtenerse por el método de Cross. Tramo aislado $m'=m''=0$

k_e Rigidez equivalente del tramo

aislado: $k_e = k_s$

externo: $k_e = 0,85k_s + 0,15k'_s$

interno: $k_e = 0,70k_s + 0,15(k'_s + k''_s)$

k_s Rigidez equivalente de una sección

$$k_s = \mu k_f + (1 - \mu) k_{II}$$

k_f Rigidez no fisurada, dada en F.C.

k_{II} Rigidez fisurada, dada en F.C.

μ Factor $\mu = (m_f / m_a)^3 \geq 1$

m_f Momento de fisuración, dado en F.C.

m_a Momento característico en la sección que se ha obtenido antes.

Flecha total diferida del tramo:

$$w_\tau = \theta w$$

$$\theta = 1 + \kappa_1(2 - \zeta_1) + \kappa_2(2 - \zeta_2) + \kappa_3(2 - \zeta_3)$$

Carga	kp/m ²	Rateo	Lapso	Factor
Forjado	g_1	$\kappa_1 = g_1/(g + q)$	t_1	ζ_1
Tabiquería	g_2	$\kappa_2 = g_2/(g + q)$	t_2	ζ_2
Pavimento	g_3	$\kappa_3 = g_3/(g + q)$	t_3	ζ_3
Sobrecarga	q	$\kappa_4 = q/(g + q)$		

t , meses	0,5	1	3	6	12	24	≤60
ζ	0,5	0,7	1,0	1,2	1,4	1,7	2,0

Flecha activa, a partir del lapso t_2 :

$$w_a = \eta w$$

$$\eta = 1 + (\kappa_1 + \kappa_2)(1 - \zeta_2) + \kappa_3(2 - \zeta_3)$$

Las flechas w_τ y w_a tienen que cumplir los límites indicados. Si no lo cumplieran es preciso aumentar el canto del forjado.

19. CONTROL DEL PROYECTO

La entidad que controle el proyecto de un edificio, con forjados, comprobará todo lo referente a los elementos de hormigón, y específicamente además:

Memoria y su anejo estructural, que incluye:

– La Ficha de características técnicas del modelo de forjado elegido, y que tiene autorización de uso vigente, es decir de fecha no anterior en más de cinco años a la fecha del proyecto.

– Listado de todos los nervios del forjado, con la solicitación de cálculo de cada uno, y la vigueta y, o armaduras adoptadas.

– Tramos especiales de forjado, con cargas lineales de apoyos, muros, etc.

- Deformaciones en los tramos de forjado más desfavorables: luces máximas en cada tipo: aislado, etc. o cargas excepcionales. Comprobación de la flecha total y la flecha activa.

- Separaciones de apeos permitidas en la ejecución

Planos, que están representados:

- En **planta**. Todos los pasos de conductos sitios en entrevigados, o requiriendo brochales cuando ello no es posible. Las siglas de todos los tramos diferentes de forjado, incluidos brochales, y que se corresponden con el Anejo estructural.

- En **alzado**. Todos los tramos de forjado diferente, el tipo de su vigueta, los diámetros de las armaduras y las longitudes de ambos. Los tramos rectos y escalonados de las escaleras, con todas sus cotas, los diámetros y las longitudes de las armaduras.

Prescripciones, que incluyen y son correctos:

- Las de los elementos del forjado por referencia a la Ficha de Características técnicas.

- Las condiciones de ejecución: apeos, apuntalamientos, contraflechas, hormigonado y curado, plazos de desencofrado, etc.

- La forma de medir de forjados y escaleras. Conviene entre caras laterales de vigas. Armaduras por separado.

Presupuesto, que las mediciones son correctas, y ajustadas a prescripciones. Que precios y valuaciones coinciden.

20. CONTROL DE FABRICACION

Los elementos que componen un forjado, realizados en fábrica, cumplirán lo que para ésta fabricación prescriben:

- El ap. 9 de la Instrucción EF 88

- El art. 8 del Decreto 1630/1980

El técnico responsable de la fabricación, arquitecto o ingeniero, superior o técnico, supervisará el conjunto de las operaciones de fabricación de los elementos del forjado de modo continuo mediante inspección diaria.

La fábrica tendrá un adecuado sistema de auto-control de calidad, estando dotada de un laboratorio de ensayos que constará como mínimo de:

- Medios para preparar, conservar y ensayar probetas de hormigón.

- Banco de ensayo de viguetas o elementos resistentes a flexión.

En el **libro de registro** del control de fabricación se anotarán diariamente los resultados de los ensayos realizados. Estará a disposición de la Delegación del Ministerio y del arquitecto técnico de toda obra a la que suministren elementos.

Hormigón. Cada día que se hormigonen viguetas se tomarán tres probetas normales, que se demoldarán a las 24 horas y se conservarán en balsa de agua a $20 \pm 2^\circ \text{C}$, de acuerdo con la norma UNE 83 301-84¹⁸, se refrentarán según UNE 83 303-84¹⁹ y se ensayarán según UNE 83 304-84²⁰.

- Una a la edad de transferencia con viguetas pre-tensadas, o a la edad de 3 días con viguetas armadas.

- Dos a 28 días en ambos casos.

Viguetas. Se tomará una vigueta al azar cada semana, se conservará en agua y se ensayará a los 7 días en el banco de flexión, según la Instrucción EF 88 art. 9.

Piezas de entrevigado. Se tomará al menos una pieza al azar cada día, y se mantendrá en agua hasta la edad en que el fabricante la considere endurecida. Se determinará la resistencia en vano según el ap. 9.1.1 de la Instrucción EF 88 en el banco de flexión.

Si son **piezas resistentes** se tomará al menos una pieza cada siete días y se mantendrá en agua como antes. Se determinará su resistencia a compresión.

21. RECEPCION DE LOS ELEMENTOS

El **control de recepción** de los elementos que constituyen los forjados lo realizará el arquitecto técnico de la obra bajo la supervisión del arquitecto director. En la recepción comprobará:

Viguetas.

- En cada partida se acompaña documento de entrega, con certificado de garantía del fabricante.

- Toda vigueta tiene marca de identificación con: Fabricante. Modelo y tipo. Fecha de fabricación. Y que coincide con los datos del certificado.

- Las dimensiones y armaduras o tendones de toda vigueta coinciden con los datos del certificado y con los planos del proyecto.

- La compatibilidad entre las viguetas y las piezas.

Piezas de entrevigado.

- Documento de entrega de cada partida, con certificado de garantía del fabricante.

- Dimensiones de las piezas.

Armaduras complementarias.

- Marca del fabricante y clase de acero

- Diámetros con los planos del proyecto

Ensayo previo a pié de obra. En EF 88, se exige, en determinadas circunstancias la ejecución y ensayo a pié de obra de un elemento de forjado, constituido por dos viguetas, una pieza de entrevigado y dos medias piezas, con el canto y la luz más desfavorable del proyecto, apoyado en dos muretes.

Con la ficha se calculará para el elemento:

Carga q_u que corresponde a m_u

Carga de servicio $q_k = q_u / \gamma_f$

Flecha instantánea w_i con q_k

El elemento se cargará en tres escalones hasta alcanzar q_k . En cada escalón se medirá la flecha en los dos extremos de la línea central del elemento. Se observarán las posibles fisuras y se medirá su anchura.

La carga de servicio se mantendrá 24 horas. Se leerán las flechas y su media w_m y la anchura de fisuras. Se descargará y se leerán las flechas remanentes y su media w_r . Se cargará en cinco o más escalones hasta la rotura, con q_r .

El ensayo es favorable si:

$$w_m < w_i$$

$$w_r < 0,25 w_m$$

$$q_r < q_u \gamma_s$$

Este ensayo previo es caro y poco operativo. Se ha solicitado su supresión

22. CONTROL DE EJECUCION

El **control de ejecución** de los forjados de un edificio se realizará por el arquitecto técnico según el art. 72 de la Instrucción EH91, art. 72 EF88, art. 9.2.2 supervisado por el arquitecto director, con el nivel que figure en el proyecto:

- **Reducido.** Visitas aperiódicas. Observaciones no sistemáticas sobre las prescripciones.

- **Normal.** Visitas periódicas, dos o tres semanales según las prescripciones. Observaciones sistemáticas y por rotación sobre las prescripciones de control, todas en cada semana.

- **Intenso.** Visitas diarias, incluso permanencia en obra. Observaciones sistemáticas, diarias sobre las prescripciones de control.

Prescripciones de control.

Antes de cada hormigonado, se comprobará:

- Replanteo del constructor
- Maquinaria de obra
- Seguridad del apuntalado
- Colocación de viguetas y distancias a los paramentos de las vigas
- Posición de los bloques y de la zona a hormigonar
- Malla de reparto. Diámetros. Separaciones. Solapos.
- Armaduras complementarias. Diámetro. Doblado. Recubrimiento.
- Previsión de juntas de hormigonado

Durante cada hormigonado, se comprobará:

- Fabricación y transporte del hormigón
- Toma de muestras para ensayo
- Compactación y enrasado del hormigón
- Juntas de hormigonado
- Condiciones en tiempo frío
- Condiciones en tiempo caluroso
- Condiciones bajo la lluvia

Tras cada hormigonado, se comprobará:

- Curado del hormigón mediante riego

- Precauciones contra el desecado
- Desapuntalado y desencofrado en los plazos prescritos en proyecto
- Dimensiones finales y espesores
- Cumplimiento de las tolerancias
- Comprobación de los resultados de ensayo

En el **registro del control**, que debe de estar en la oficina de obra se anotarán día a día todas las operaciones de control efectuadas y las incidencias de ejecución.

23. NOTAS BIBLIOGRAFICAS

- 1 Norma DGA 41. Cálculo y ejecución de las obras de hormigón armado. Decreto PG 1941.03.11 (B.O.E. 1941.03.12), Dirección General de Arquitectura, Madrid. *Método elástico en fisuración. Criterios determinantes. Máxima tensión admisible del acero 1200 kg/cm². Anejo para forjados de ladrillo armado.*
- 2 Instrucción EH 68. Proyecto y ejecución de obra de hormigón en masa o armado. Decreto 2987/1968 (B.O.E. 1968.12.03), Madrid. *Método anelástico con criterios semiprobabilistas. Aceros corrugados*
- 3 Instrucción EH 73. Proyecto y ejecución de obras de hormigón en masa o armado. Decreto 8062/1973 (B.O.E. 1973.09.07), Madrid.
- 4 Instrucción EP 77. Proyecto y ejecución de obras de hormigón pretensado. Real Decreto 1408/1977 (B.O.E. 1977.06.22), Madrid.
- 5 Instrucción EF 88. Proyecto y ejecución de forjados de hormigón armado o pretensado. Real Decreto 824/1988 (B.O.E. 1988.07.88), Madrid
- 6 Real Decreto 1630/1980. Fabricación y empleo de elementos resistentes para pisos y cubiertas. (B.O.E. 1980.06.08), Madrid.
- 7 Orden M.O.P.U. de 1989.11.29. Modelos de Fichas Técnicas para forjados. (B.O.E. 1989.12.16), Madrid.
- 8 LAHUERTA, J.A.: *Como calcular las viguetas de hormigón*. Revista de Arquitectura, Madrid, 1959. *Presenta una ficha de características técnicas de los forjados, antecedente de la adoptada oficialmente.*

- 9 Pliego RC 88. Recepción de cementos. Real Decreto 1312/1988 (B.O.E. 1988.11.04), Madrid
- 10 Instrucción EH 91. Proyecto y ejecución de obras de hormigón en maso o armado. Real Decreto 1039/1991 (B.O.E. 1991.07.03).
- 11 Norma UNE 7050-85. Tamices de ensayo. AENOR, Madrid.
- 12 Instrucción EP 80. Proyecto y ejecución de obras de hormigón pretensado. Real Decreto 2695/1985 (B.O.E. 1986.02.12).
- 13 Norma UNE 36095-85. Alambres de acero para pretensado. AENOR, Madrid.
- 14 CALAVERA, J.: *Cálculo, construcción y patología de forjados de edificación*. INTEMAC, Madrid, 1998. *El capítulo 7 presenta con gran detalle la determinación de las pérdidas de tensión en los tendones tesos.*
- 15 Norma AE 88. Acciones en la edificación. Real Decreto 1723/990 (B.O.O. 1991.01.04), Madrid.
- 16 LAHUERTA, J.A.: *Cálculo de los forjados por el método de las rótulas plásticas*. Colegio de Arquitectos, Bilbao, 1967. *Las características del método de redistribución de EF 88 están basadas en las aquí expuestas.*
- 17 CALAVERA, J., GARCIA, L.: *Cálculo de flechas en estructuras de hormigón armado*. INTEMAC, Madrid, 1992. *Empleo del método de integración de curvaturas, que permite una precisión mayor, y un, programa informático para aplicado.*
- 18 Norma UNE 83301-84. Ensayos de hormigón. Fabricación y conservación de probetas. AENOR, Madrid.
- 19 Norma UNE 83303-84. Ensayos de hormigón. Refrentado de probetas con mortero de azufre. AENOR Madrid.
- 20 Norma UNE 83302-84. Ensayos de hormigón. Rotura por compresión. AENOR, Madrid.

