

Comportamiento frente a fuego de un forjado de chapa colaborante. el análisis frente a la protección

Fire behavior of a composite slab with steel decking. Analysis versus protection

Eduardo Díaz Pavón^{a,*}, Ramón Álvarez Cabal^b, Raúl Rodríguez Escribano^c

a: Instituto Técnico de Materiales y Construcciones (INTEMAC). Jefe del Departamento de Patología. ediazpavon@intemac.es

b: Instituto Técnico de Materiales y Construcciones (INTEMAC). Jefe del Área de Estructuras

c: Instituto Técnico de Materiales y Construcciones (INTEMAC). Director de la División de Estudios

RESUMEN

En la presente comunicación se presenta el comportamiento en situación de fuego de unos forjados de chapa plegada de un edificio construido en los años 90 y en los que los condicionantes de resistencia al fuego eran muy elevados (R-180). La caracterización del forjado permitió comprobar la existencia de una malla de armadura continua y adecuadamente anclada en su cara superior que hacía que dichos forjados pudieran desarrollar un trabajo por forma, cuya capacidad es muy superior a la que se deduciría de su comportamiento convencional en flexión y que había conducido, en primera instancia, a recomendar la protección de la totalidad de los forjados.

ABSTRACT

The results of the study of the behavior of composite slabs with steel decking in fire situation are presented. These slabs were constructed in the 90's, and fire requirements were very high (R-180). Its characterization showed the existence of a continuous reinforcement correctly anchored that allowed these slabs to develop a shape action, which capacity is much more higher than the one considering an usual flexure behavior and that had conducted, in a preliminary request, to the recommendation of protecting all of them.

PALABRAS CLAVE: resistencia frente a fuego, forjados chapa plegada

KEYWORDS: fire resistance, composite slabs with steel decking

1. Introducción

La resistencia al fuego de una estructura se expresa en términos de resistencia y estabilidad, y no tanto en deformaciones. De hecho, un comportamiento correcto de la estructura puede derivar en deformaciones tales que hagan irreparable la construcción con tal de que la estructura haya mantenido su capacidad portante durante el tiempo requerido.

En el caso de los forjados, aparte de los requisitos resistentes propiamente dichos, se suele limitar la deformación adquirida en los mismos en dicha situación accidental, admitiéndose que como máximo alcance flechas del orden de $L/20$ (siendo L la luz del vano).

Estas deformaciones son en todo caso muy significativas, y permiten que los forjados, con los esquemas de armado adecuados, puedan desarrollar un trabajo por forma cuya capacidad

es muy superior a la que se deduciría de su comportamiento convencional en flexión.

Así ha sido comprobado en los forjados de chapa plegada cuyo análisis se presenta a continuación. Este análisis permitió prescindir de la protección de la totalidad de los forjados que se había previsto en primera instancia en su rehabilitación, protección que se deducía de su comportamiento en flexión tal y como se comprueban actualmente y en la mayoría de los casos este tipo de forjados en situación de fuego. Como también se detalla a continuación, este no fue el criterio habitual en los años 90, cuando los forjados de este tipo se diseñaban y probablemente ensayaban disponiendo una malla de refuerzo dentro de la losa superior de hormigón, la cual permitía el comportamiento como membrana y evitaba la protección de la chapa.

2. Descripción de los forjados

Se trata de un edificio proyectado en 1990 e inaugurado en 1992.

Los forjados son mixtos de chapa colaborante, apoyándose en vigas y pórticos metálicos con los que se encuentran conectados mediante pernos, creando un entramado *mixto* de la chapa, cuyo espesor es de 1,2 mm, y la disposición de los conectores.

Según los planos del proyecto se trataría en la mayoría de plantas de forjados de *chapa plegada Robertson QL-59* con 6,5 cm de capa de compresión (espesor total 12,5 cm), con capacidad para una carga adicional de 500 kg/m², excepto en las plantas técnicas, en las que la capa de compresión sería de 10,0 cm.

En la figura 1 mostramos la configuración *nominal* del forjado.

Como se muestra en dicha figura, el forjado cuenta con una malla de armadura en la losa superior formada por barras de 6 mm de diámetro separadas 100 mm en ambas direcciones (figura 2). Esta armadura se encuentra solapada en las alineaciones de apoyo sobre los pórticos, excepto en los extremos, donde se encuentra anclada en patilla. En las citadas figuras 1 y 2 se muestra en detalle cómo sobre el forjado existe una losa de hormigón con fibras de entre 11 y 12 cm de espesor, por cuyo interior discurren, en algunas localizaciones, canaletas de instalaciones. En la figura 3 se aprecia por último la geometría del forjado.

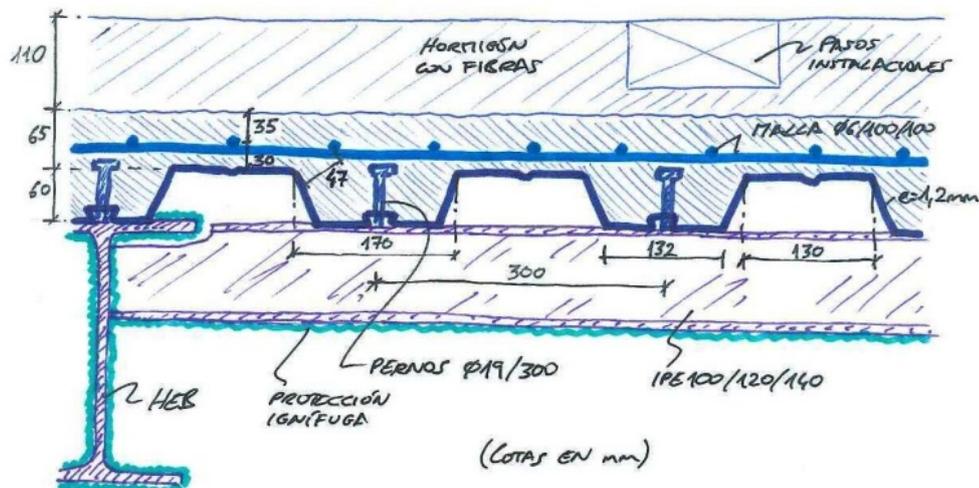


Figura 1. Configuración de la estructura horizontal



Figura 2. Nótese la configuración de la losa superior

Figura 3. Conexión del forjado a las jácenas apoyan en pórticos de unos 11 m de luz que salvan la distancia existente entre el núcleo central y la fachada.

La distribución de los vanos se muestra esquemáticamente en la figura 4, en la que se aprecia que la mayoría de ellos tienen la luz indicada de 2,74 m entre ejes de vigas, las cuales

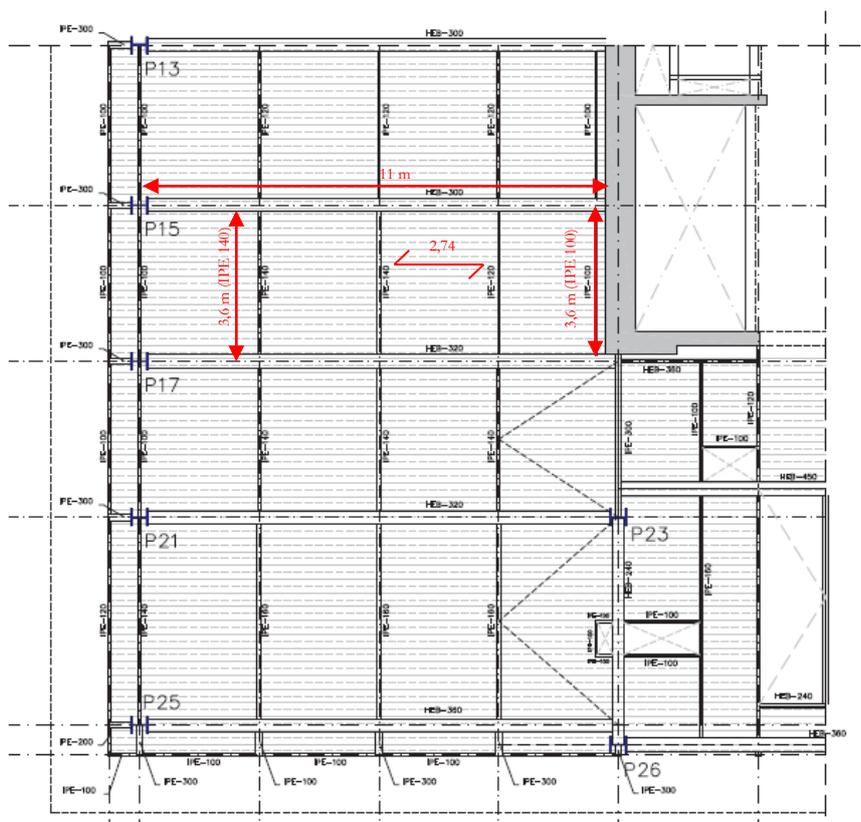


Figura 4. Configuración estructural de una planta tipo

Cabe indicar por último que los forjados no contaban con ningún tipo de protección frente a fuego (como es habitual en este tipo de

“sistemas mixtos”, ya que si no la solución no suele resultar competitiva), en tanto que las vigas sobre los que apoyan y los pórticos que

las reciben sí que fueron protegidos mediante un mortero ignífugo.

3. Exigencias de protección y origen del estudio

Debido a una remodelación en el edificio, se debía cumplir con la ordenanza municipal actualmente en vigor, que establecía REI-180.

Esta exigencia era en principio compatible con los requisitos del Proyecto original, que especificaba una estabilidad al fuego para la estructura de la torre EF-180, y una resistencia de los elementos separadores sobre rasante RF-180.

Al no encontrarse armadura en los valles del forjado, ni presentar éste protección alguna, y dada la ausencia de los ensayos que acreditaran la resistencia y aislamiento exigidos, se planteó la protección de su cara inferior mediante un mortero ignífugo.

Las dificultades y coste que planteaba una protección tan elevada (espesores de mortero de vermiculita superiores a 30 mm), condujo a plantear otras alternativas.

La propia configuración del forjado, y en particular la importante cuantía de armadura y cuidados detalles de solape y anclaje que presentaba, invitaba a pensar que esta había sido dispuesta precisamente para cubrir la estabilidad en dicha situación de fuego, en tanto que la losa superior de hormigón con fibras cubriría las necesidades de aislamiento.

Para comprobar lo anterior se propuso un análisis numérico que es el que se expone en los siguientes apartados.

4. Comportamiento frente a fuego de un forjado de chapa colaborante

El Eurocódigo 0 [1] y el Eurocódigo 1 [2], establecen la resistencia frente a fuego de un elemento de construcción como el tiempo en el que dicho elemento excede unos determinados límites de resistencia, aislamiento e integridad.

Centrándonos en los requisitos resistentes (R), se admite que un elemento tiene suficiente resistencia si, durante la duración del incendio, el valor de cálculo del efecto de las acciones, en todo instante t , no supera el valor de la resistencia de dicho elemento. En general, basta con hacer la comprobación en el instante de mayor temperatura que, con el modelo de curva normalizada tiempo-temperatura, se produce al final del mismo.

Aunque no queda recogido explícitamente en el Eurocódigo 1, según se deduce de los requerimientos establecidos para obtener dicha resistencia mediante ensayos (como alternativa a las comprobaciones meramente analíticas), se limita la deformación máxima a $L/20$ (siendo L la luz del vano), y a unas tasas de incremento de flecha de $L^2/9000d$ por minuto (siendo d el canto útil del forjado, en mm) cuando la flecha es superior a $L/30$.

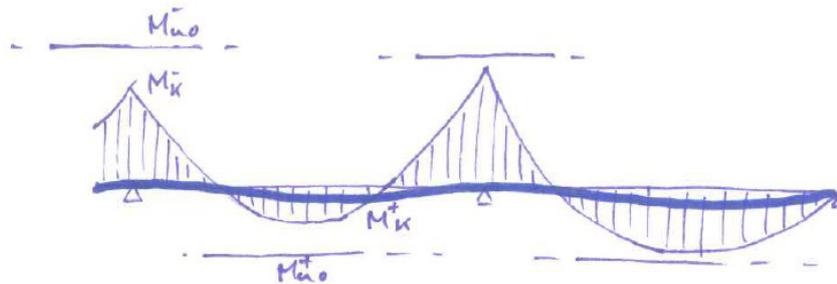
En el caso concreto de forjados mixtos de chapa colaborante, mientras que en temperatura ambiente el forjado se dimensiona en flexión como losas simplemente apoyadas o continuas, la resistencia en situación de fuego puede conseguirse mediante la disposición de armadura de refuerzo en los valles de la chapa, con el recubrimiento suficiente (configuración más habitual en la actualidad), o, como se ha realizado tradicionalmente, mediante la inclusión de una malla de armadura en la cara superior de la losa. En todo caso, este tipo de forjados se han diseñado normalmente de manera que no requieran protección para el

acero expuesto, aunque las vigas de soporte sí lo estén.

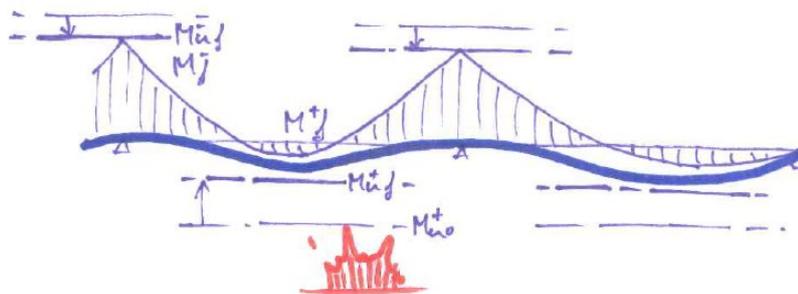
En relación con el diseño *tradicional* de incluir una malla de refuerzo dentro de la losa de hormigón, cabe realizar algunas consideraciones: A altas temperaturas la contribución de la chapa plegada es en general pequeña y se desprecia [5]; el hormigón sirve en cambio como "aislamiento" para mantener la malla de refuerzo a una temperatura a la que puede soportar la carga aplicada, trabajando inicialmente la sección en flexión (figura 5 b); sin embargo, a medida que sigue aumentando la temperatura, la contribución del hormigón disminuye, y las tensiones en la armadura se incrementan en las zonas menos solicitadas, tendiendo a comportarse como una membrana (figura 5 c)). En este sentido los numerosos

ensayos realizados han puesto de manifiesto que a altas temperaturas el mecanismo resistente predominante es el de membrana, siendo precisamente las altas deformaciones de ésta las que suelen limitar la capacidad del forjado en los citados ensayos. Lógicamente dicho comportamiento está condicionado por la deformación del emparrillado metálico sobre el que apoya el forjado y de las condiciones de anclaje sobre dicho emparrillado, aspectos que deberán ser analizados en cada caso.

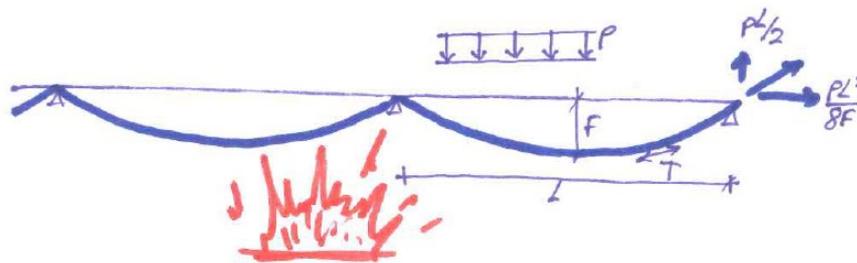
Por otro lado, en estos ensayos nunca se han observado fallos por cortante, considerándose que la merma en la capacidad a flexión es mayor que la que se produce a corte, limitándose por tanto las comprobaciones a la citada flexión.



a) Situación nominal. Comportamiento a flexión del forjado mixto



b) Fuego. Comportamiento a flexión de las secciones de hormigón armado (se prescinde de la contribución de la chapa plegada). Se incrementan los momentos negativos y disminuyen los positivos.



c) Fuego. Comportamiento como membrana a altas temperaturas

Figura 5. Comportamiento de un forjado de chapa colaborante a medida que se incrementan las temperaturas en la planta inferior

Sobre la definición de la malla de refuerzo necesaria, algunas normativas de referencia (por ejemplo la normativa británica, *BS 5950 parte 4* [7], pionera en este tipo de diseño; en España no ha existido normativa específica hasta hace pocos años, y a efectos de fuego se siguen asumiendo las consideraciones recogidas en el Eurocódigo 4 [5]) proponían simplificadaamente una geometría del forjado y una cuantía de armadura en la malla en función de los requisitos de resistencia. A modo de ejemplo para una luz de 2,7 m y 1 h de resistencia al fuego, un forjado de hormigón normal tendría que tener un espesor total de 130 mm y una malla superior de armadura A142, consistente en un mallazo 200×200×6 mm. Se observa que incluso para requerimientos frente a fuego moderados, se trata de cuantías de mallazo muy superiores a las necesarias por ejecución de la propia losa superior.

Estas cuantías de armadura se basaban, en gran medida, en la realización de los ensayos que llevaban a cabo los distintos fabricantes, conduciendo casi invariablemente al uso de menores cuantías que una evaluación analítica, que exige lógicamente múltiples simplificaciones.

Frente a este procedimiento empírico, con el tiempo se ha ido imponiendo el diseño a partir del análisis, el cual permite una mayor flexibilidad para tener en cuenta diferentes rangos de carga y los tiempos de resistencia al fuego alcanzables, y no depende de los ensayos que pueda aportar el fabricante.

En relación con estos análisis, en las sucesivas normativas se ha evaluado la capacidad del forjado en flexión. La normativa no recoge explícitamente, en cambio, la consideración del comportamiento como membrana, aunque contiene las herramientas necesarias para evaluar dicho mecanismo resistente.

5. Hipótesis de partida

5.1. En relación con las solicitaciones en situación de fuego

La sollicitación de los forjados en situación de fuego, $E_{f,d,t}$, la hemos obtenido considerando, en principio, un comportamiento unidireccional.

La combinación de cargas considerada es la correspondiente a la situación accidental de fuego, que de acuerdo con [1] es:

$$\Sigma G_{k,j} + A_d + \Sigma \Psi_{f,i} \times Q_{k,i}$$

Donde $G_{k,j}$ son las cargas permanentes, $Q_{k,i}$ las sobrecargas, A_d las acciones indirectas debidas al incremento térmico, y $\Psi_{f,i} = \Psi_1 = 0,5$, correspondiente a las sobrecargas de carácter frecuente para uso administrativo, de acuerdo con el CTE [6] (el Eurocódigo 1 [2], propone en cambio $\Psi_2 = 0,3$, correspondiente a las sobrecargas de carácter cuasipermanente, y por lo tanto algo más favorable). Cabe indicar por último que hemos prescindido de las acciones indirectas debidas al incremento térmico, A_d , que en el forjado supondrían la aparición de compresiones (cuyo efecto es en general favorable) y flexiones *negativas* (incrementándose las sollicitaciones en los apoyos, donde existe precisamente mayor capacidad en situación de fuego, como se mostraba esquemáticamente en la figura anterior).

Resultaba así una carga en la planta tipo de 6,42 kN/m².

5.2. En relación con las propiedades del acero en situación de fuego

A efectos de la *capacidad resistente* del forjado en situación de fuego, hemos prescindido de la posible contribución de las chapas, ya que las elevadas temperaturas que alcanzaría en

situación de fuego hacen que su contribución sea totalmente residual.

En cuanto a la distribución de temperaturas en el interior de la sección, hemos adoptado la

distribución de isoterms establecida en [5] para forjados de chapa colaborante, de la que se deducen las siguientes propiedades para las distintas armaduras del forjado:

Tabla 1. Coeficientes reductores del límite elástico y del módulo de elasticidad de las armaduras en función de su posición.

<i>Armadura</i>	<i>Recubrimiento mecánico (mm)</i>	<i>Temperatura (°C)</i>	<i>k_{s0}</i>	<i>k_{E0}</i>
<i>Longitudinal (valles)</i>	<i>46</i>	<i>540</i>	<i>0.656</i>	<i>0.484</i>
<i>Longitudinal (crestas)</i>	<i>30</i>	<i>689</i>	<i>0.256</i>	<i>0.15</i>
<i>Transversal</i>	<i>30</i>	<i>689</i>	<i>0.256</i>	<i>0.15</i>

Dado el reducido límite elástico de las armaduras transversales (resulta 128 MPa), en los análisis se consideró su comportamiento no lineal, el cual se desarrolló mediante un modelo no lineal en SAP 2000 en el que se asignó rótulas (a tracción). Para la formación de estas rótulas se asignó al acero un diagrama rígido plástico con endurecimiento del 10 %.

5.3. Modelización realizada

Aunque la mayoría de análisis realizados implican formulaciones sencillas que permiten su cálculo a mano, para contrastar los resultados obtenidos y valorar determinadas configuraciones desarrollamos un modelo no lineal en SAP 2000. Se modelizó medio forjado (figura 6) aplicando condiciones de simetría e introduciendo, en primera instancia,

únicamente la armadura, a cuyas barras se asignan materiales con las propiedades indicadas en el apartado anterior. La armadura se modeliza mediante barras de 6 mm de diámetro separadas 10 cm. Se distingue entre armaduras sobre valle de forjado y sobre cresta (existiendo dos barras correlativas de las primeras y una tercera de las segundas). Las transversales son todas del segundo tipo. Las secciones son las mismas en ambos casos, pero se les cambia el material para tener en cuenta los diferentes módulos y límites elásticos. A la barra longitudinal que coincide con el eje de simetría (eje B) se le asigna un multiplicador de características de la sección de valor 0,5.

La carga aplicada es lógicamente de 6,4 kN/m².

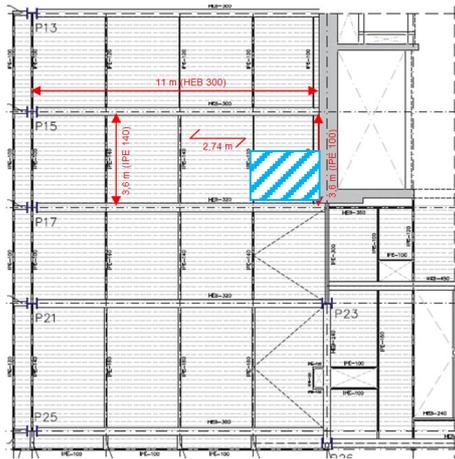
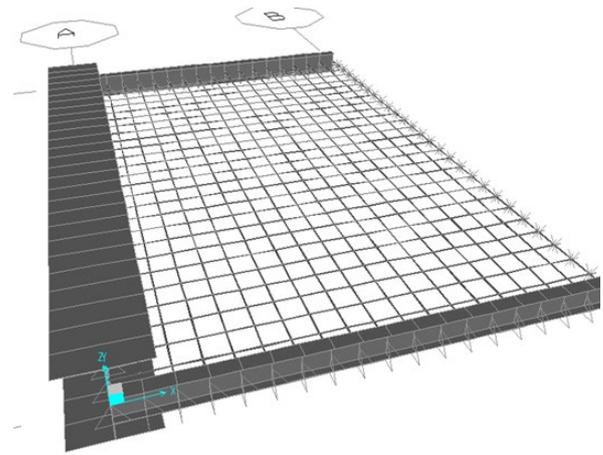


Figura 6. Modelización realizada en SAP 2000@



6. Análisis realizados

6.1. Cuatro lados fijos

Es la situación de los vanos interiores. En estas condiciones la mayor cuantía y menor calentamiento de las armaduras longitudinales hace que el comportamiento del forjado sea eminentemente unidireccional, a modo de cuerda.

La geometría de la cuerda tiene que ser tal que se equilibren las cargas (figura 6):

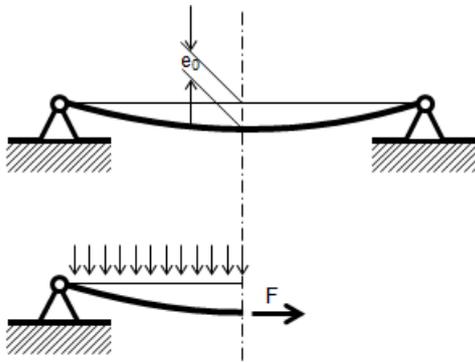


Figura 7. Equilibrio de una cuerda

Se obtiene así una flecha del forjado de 9,2 cm.

En realidad, la armadura transversal también colabora. *Manualmente* es inmediato tantear e_0 de manera que la suma de las cargas que resisten la cuerda longitudinal y la transversal sea la carga de fuego, $6,4 \text{ kN/m}^2$, resultando $e_0=8,7 \text{ cm}$ (lógicamente algo inferior a si no se considera la contribución de la armadura transversal), resistiendo la armadura longitudinal $5,8 \text{ kN/m}^2$, y la transversal el resto, $0,7 \text{ kN/m}^2$.

Los resultados del modelo son muy similares a los obtenidos en la estimación precedente: prácticamente sólo se carga la armadura longitudinal y lo hace con una fuerza por barra $8,29 \text{ kN}$ (barras longitudinales sobre vano, las que están sobre crestas, se cargan mucho menos -figura 8-, $2,6 \text{ kN}$, por lo que la media sería $\frac{8.29 \cdot 2 + 2.6}{3} = 6.393$ casi idéntica al valor estimado anteriormente ($6,11 \text{ kN}$). La flecha en el centro del vano es también de 9 cm (figura 8):

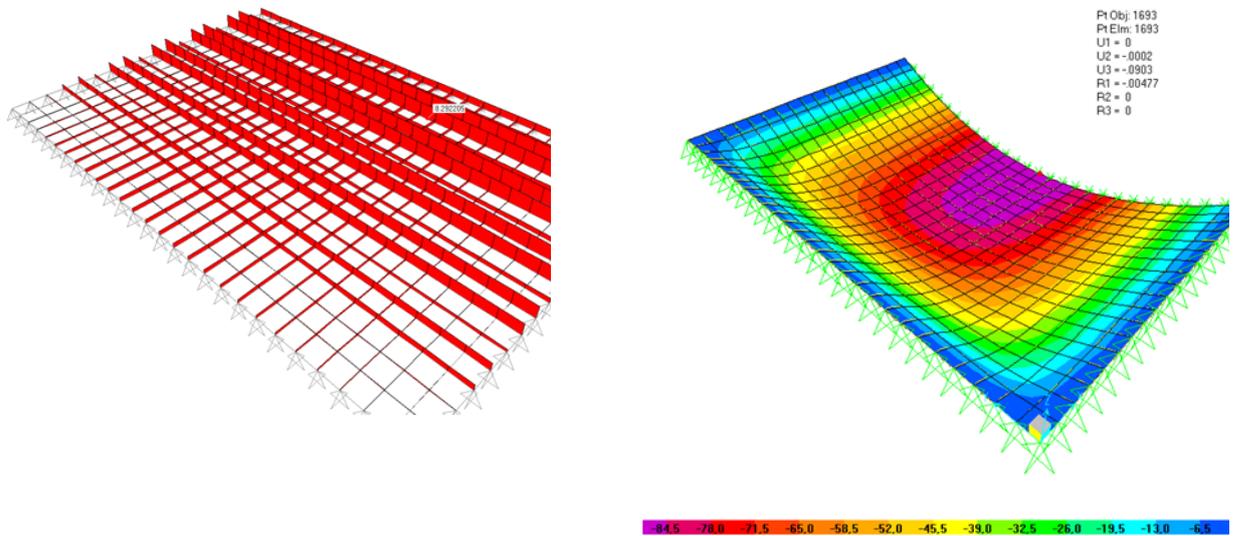


Figura 8. Modelización de medio forjado interior (fijo en sus cuatro bordes)

6.2. Tres lados fijos, sin contribución del hormigón

Es la situación de los vanos extremos, apoyados en el IPE 100, considerando éste sin coacción alguna frente a su deformación horizontal. En una primera aproximación

prescindimos de la colaboración de la armadura longitudinal. Esto conduce a que la armadura transversal deba adquirir una flecha de 28 cm, por supuesto plastificando.

Como en el caso anterior, contrastamos este resultado mediante un modelo.

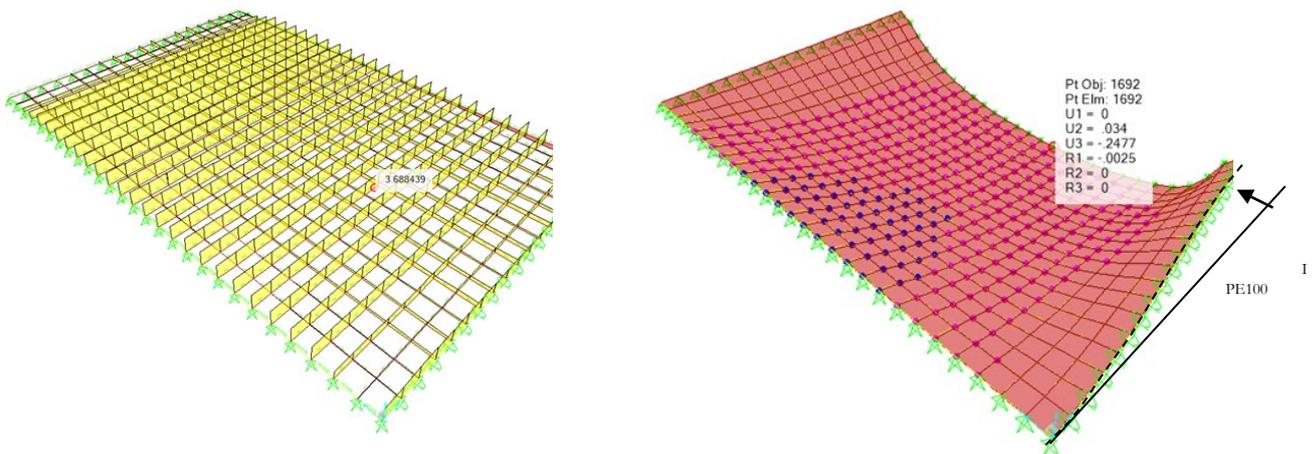


Figura 9. Modelización de medio forjado extremo (fijo en tres bordes, y sin coacción horizontal en el 4º)

De la distribución de axiles se observa cómo las barras longitudinales aportan alguna capacidad porque tiran hacia el vano del perfil extremo (IPE100), que cogería este tiro

mediante un mecanismo de catenaria horizontal (como se aprecia en la figura 9 precedente).

Como las barras transversales se cargan lo mismo que en los cálculos anteriores, a mano,

porque están plastificadas y por tanto su carga es la plástica, la aportación de las longitudinales se concreta en la reducción de la flecha necesaria para coger la carga, que resulta de 25 cm en lugar de los 28 cm referidos anteriormente.

Esta reducción de la flecha, aunque pequeña, está condicionada por la posibilidad de que se forme la catenaria en el extremo sin coacción, no tanto por la resistencia a tracción del perfil IPE100 sino por la de su conexión a los pórticos principales. En esta hipótesis, sin contar con el hormigón, rompería. Sin embargo, la sollicitación sobre esta unión será muy inferior a la deducida del modelo anterior, ya que el hormigón en las proximidades de los apoyos impediría esta deformación y por tanto las cargas sobre la unión, lo que nos conduce al siguiente punto.

6.3. Forjado fijo en tres lados, con aportación del hormigón

Como se deduce del modelo anterior, al deformarse el borde libre (IPE100), hacia el interior del vano, comprime el hormigón, formando bielas diagonales entre dicho borde libre y los laterales, que tienen los desplazamientos impedidos. Este esquema se muestra en el modelo de la figura 10 (se han eliminado las “bielas” que salen traccionadas; para las comprimidas se ha considerado, del lado de la seguridad, una sección de tan sólo 6 cm²) en el cual se observa que la flecha se reduce a 19 cm, esto es, L/24 y por tanto correcto de acuerdo con el límite establecido (L/20). Lógicamente si la rigidez de las bielas fuera mayor, la deformación del IPE100 sería menor y la contribución de la armadura longitudinal mayor que la obtenida.

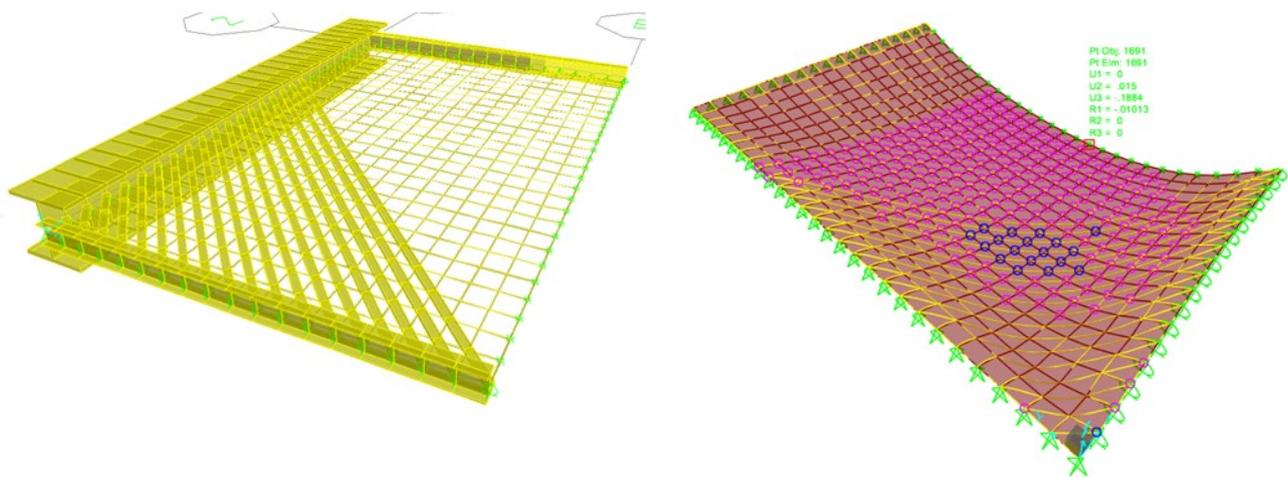


Figura 10. Modelización de medio forjado extremo (fijo en tres bordes, y sin coacción horizontal en el 4º)

7. Discusión y conclusiones

Más allá de los favorables resultados obtenidos en los análisis realizados que permitieron prescindir de la protección frente a fuego que se había previsto sobre los forjados, del estudio cabe extraer las siguientes reflexiones:

- Valorar y respetar el trabajo de nuestros predecesores. Cuando intervenimos en una estructura existente, es fundamental intentar entender los criterios de diseño que se adoptaron en la etapa de proyecto (cargas de diseño, configuraciones resistentes consideradas, o en nuestro caso, criterios de comportamiento frente a fuego), y realizar las comprobaciones

oportunas en obra para comprobar si dichos criterios se respetaron en la construcción (en el estudio presentado, caracterización de la armadura del forjado y de sus detalles de anclaje y solape). Si no lo hacemos, podemos caer en la tentación de imponer los adquiridos en nuestra experiencia (obviando el entendimiento de algunos datos, como era en nuestro caso la importante cuantía de la armadura existe), que muchas veces puede ser insuficiente y conducir a intervenciones innecesarias (en los forjados analizados, su completa protección en todas las plantas).

- *Importancia y posibilidad del trabajo por forma.* Salvo en configuraciones estructurales muy concretas, no es habitual en edificación que se aproveche el trabajo por “forma” de las estructuras. Y mucho menos cuando dichas formas implican tracciones en los elementos estructurales, ya que ello, si bien supone un ahorro muy significativo de armaduras a efectos de seguridad, conduciría a deformaciones en los forjados muy superiores a las exigibles desde un punto de vista funcional. Sin embargo, en situaciones accidentales como sismo o fuego, estas deformaciones no son condicionantes, primando únicamente la estabilidad de la estructura durante estos eventos extraordinarios. En estas situaciones, se puede plantear, como se ha hecho tradicionalmente en los forjados de chapa colaborante frente a fuego (los esquemas de armado actuales, en cambio, no lo permiten), este comportamiento por forma, cuya capacidad es muy superior a la que se deduciría de su comportamiento convencional en flexión.

En relación con este comportamiento por forma, cabe diferenciar también la importancia de considerar la respuesta superficial y no sólo la unidireccional: el comportamiento como membrana ha permitido justificar la capacidad del forjado de los vanos extremos, en los que la armadura longitudinal no contaba con apenas coacción al desplazamiento y la transversal, por su reducido recubrimiento, plastificaba para tensiones muy reducidas. Especialmente interesante es, en estos vanos extremos, la contribución del hormigón entre cables, cuya colaboración resulta determinante para reducir las flechas a los límites admitidos.

- *Utilidad y aplicabilidad de la ductilidad.* Como es sobradamente conocido, la ductilidad de las secciones es la base para poder desarrollar un cálculo plástico, y con ello, un mejor aprovechamiento del comportamiento resistente de las estructuras. Este mayor aprovechamiento es relativamente habitual en elementos sometidos a flexión. No lo es, sin embargo, en elementos traccionados, precisamente por las muy limitadas situaciones en las que se puede considerar el comportamiento como membrana de los forjados. Destacamos por ello la realización de un cálculo no lineal considerando la plastificación de las armaduras en tracción en los análisis expuestos, que ha permitido no sólo la colaboración entre nervios, sino, sobre todo, que estos adquieran la deformación necesaria para justificar la estabilidad del forjado. Paradójicamente, sin limitaciones de deformaciones, si el acero contara con la ductilidad necesaria (muy superiores a las deformaciones del 12 % que por

ejemplo fijaban las normas de la época para las mallas de armadura en este tipo de forjados), podrían adquirir la deformada necesaria para resistir cualquier carga.

8. Referencias

- [1] UNE EN-1990 Eurocódigo 0 Bases de cálculo de estructuras.
- [2] UNE EN 1991-1-2: 2004 Eurocódigo 1: Acciones en estructuras. Parte 1-2: Acciones generales. Acciones en estructuras expuestas al fuego.
- [3] UNE EN 1992-1-2: 1996 Eurocódigo 2: Proyecto de estructuras de hormigón. Parte 1-2: Reglas generales. Proyecto de estructuras frente al fuego.
- [4] UNE EN 1993-1-2: 1995 Eurocódigo 3: Proyecto de estructuras de acero. Parte 1-2: Reglas generales. Proyecto de estructuras expuestas al fuego.
- [5] UNE EN 1994-1-2: 1996 Eurocódigo 4: Proyecto de estructuras mixtas de hormigón y acero. Parte 1-2: Reglas generales. Proyecto de estructuras sometidas al fuego.
- [6] Código Técnico de la Edificación. Dirección General de Arquitectura, Vivienda y Suelo. Ministerio de Fomento, 2015.
- [7] Fire resistance of composite slabs with steel decking: Data sheet CIRIA special publication 42, de 1986.