

# FORJADOS MIXTOS LIGEROS EN FALSOS TECHOS DE TÚNELES DE CARRETERAS

**Doctor Ing. A.Arnedo Pena <sup>a,b</sup>**

*Ing. S.Díaz Espinosa<sup>a</sup>.*

*<sup>a</sup>SENER Ingeniería y Sistemas. <sup>b</sup>Prof.asociado ETSICCP -UPC.*

## Introducción

**E**n esta ponencia se presenta las pautas de cálculo un sistema de falso techo de túnel basado en forjado mixto ligero. La disposición de falso techo en túneles permite la ventilación transversal y la actuación eficiente en caso de incendio. Este tipo de estructura suele consistir en una losa de hormigón armado que dependiendo del ancho de la sección puede disponer de extremos empotrados y apoyos intermedios colgados de la clave, por lo general el trazado de la directriz es curvo, creándose un efecto arco entre hastiales.

El falso techo es una estructura exenta del revestimiento, se diseña para no contribuir al sostenimiento y está apoyada en hastiales a nivel intermedio sirviendo de divisoria de la sección y compartimentando la misma a efectos funcionales de ventilación y aislamiento. Dependiendo de las dimensiones y organización del flujo de aire se puede añadir una divisoria longitudinal en el volumen confinado entre clave y falso techo.

## Generalidades

Las denominadas estructuras secundarias, como son los falsos techos, tienen requisitos de integridad y resistencia inferiores a los correspondientes a estructuras

principales, ya que suele resultar más rentable su reparación que encarecer su diseño. No obstante dependiendo de su función de seguridad las normas imponen una serie de requisitos de resistencia estructural de viarios niveles de exigencia.

La mayoría de países y PIARC en el caso de falsos techos utilizados como conductos de ventilación que deben permanecer operativos durante la evacuación y el eventual rescate exigen 120 minutos de la curva temperatura-tiempo ISO 834.

El diseño propuesto consiste en una topología estructural a base de forjado mixto con estructura metálica protegida. En la solución aquí tratada se utiliza hormigón ligero en el forjado. En algunos casos, dependiendo del tipo de acciones de diseño es ventajoso el uso de hormigón convencional, especialmente cuando se pueden producir explosiones por paso de mercancías peligrosas.

La estructura del forjado está constituida por una chapa nervada que sirve de encofrado perdido apoyada entre vigas transversales que a su vez se apoyan en los hastiales. El hormigón sobre dicha chapa es ligero, a base de árido de arlita y está armado en los nervios, además de superiormente. No se da crédito a la contribución en servicio de la chapa nervada, es decir no es “colaborante”.

Las vigas metálicas que soportan este forjado sí son vigas mixtas conectadas adecuadamente al hormigón que a su vez proporciona una protección térmica eficaz de casi todo el perímetro de la sección. Cabe la posibilidad de que apoyen en los hastiales mediante una junta de dilatación protegida, o bien que unan a soportes paralelos a los hastiales y empotrados/ articulados en la base del túnel formado pórticos o costillas transversales.

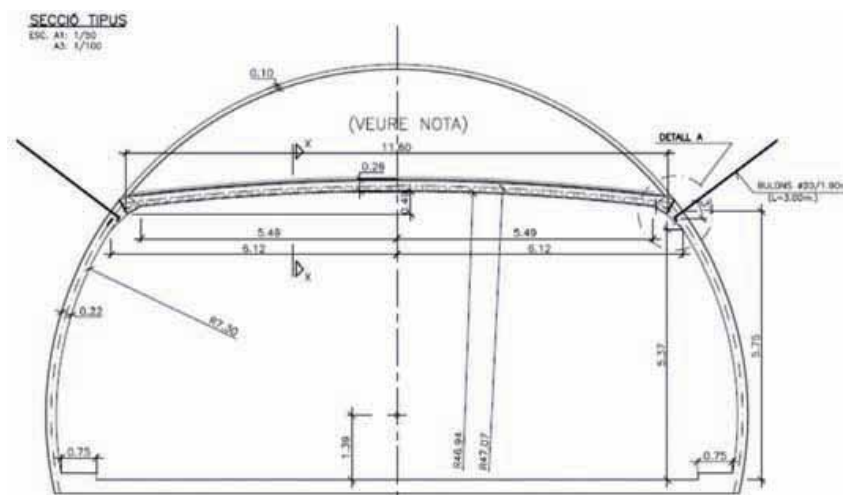


Figura 1: Sección tipo del forjado mixto ligero en falso techo.

Para cargas ascendentes por explosiones se puede lograr una adecuada resistencia formando una viga doble con un cordón superior contiguo a la clave y utilizando como montantes soportes intermedios, que transmiten directamente por axil el empuje ascendente. Para el efecto de rebote la viga tiene una estructura Vierendeel y se apoya en extremos.

### Bases de proyecto

El diseño del falso techo viene determinado por el conjunto de acciones que se derivan de su operación y de las situaciones de accidente. Una ventaja de las soluciones ligeras consiste en la facilidad constructiva, que se traduce en la rapidez de ejecución, otra no menor es el margen de seguridad que implica en los casos de acciones accidentales como el incendio y el sismo al igual que en el resto de estructuras convencionales. Un caso especial es el correspondiente a respuesta frente a explosiones internas.

En este trabajo se han utilizado acciones típicas de túneles de carretera. La posición de la “Instrucción para el proyecto, construcción y explotación de obras subterráneas para el transporte terrestre” (IOS 98) es la de determinar las acciones en cada caso particular. La tendencia es realizar simulaciones mediante el uso de modelos utilizando CFD y añadiendo un Análisis de Riesgos que contemple escenarios realistas de posibles accidentes.

### *Acciones sobre la estructura*

- a. Cargas constantes:
  - Peso propio de acero (7.8 t/m<sup>3</sup>) y hormigón ligero (1,8 t/m<sup>3</sup>), en diseño convencional (2,5 t/m<sup>3</sup>).
- b. Cargas variables de operación:
  - Sobrecarga de uso 1 kN/m<sup>2</sup> (descendente)
  - Sobrecarga de succión 2,40 kN /m<sup>2</sup> (ascendente)
- c. Cargas variables accidentales:
  - Gradiente térmico según respuesta a incendio (300° C entre caras, alternativa)
  - Resistencia al fuego RF120 de la curva ISO 834.
  - Sismo según NCSE 2004, con aceleración de cálculo según zona (0,1g.)
  - Explosión tipo deflagración/ detonación, según EN 1991 parte 1-7
- d. Cargas de ejecución:
  - Durante el hormigonado sobre la chapa nervada se considera una carga uniforme

repartida de 0.75 kN/m<sup>2</sup> general y otra de 1,50 kN/m<sup>2</sup> en cuadrados de 3x3 metros de acuerdo con Eurocódigo 4 parte 1.1.

### ***Combinación de cargas***

Las hipótesis de cálculo se ajustarán a la norma de aplicación, en este caso por tratarse de una estructura mixta se aplicara el Eurocódigo 4 “Proyecto de Estructuras Mixtas de Hormigón y Acero” UNE-ENV 1994-1-1, al ser predominante la sobrecarga de uso la combinación de acciones es la misma que en las otras normas estructurales (EHE, CTE, borrador EAE).

- Para el Estado Límite Último (E.L.U.): , donde
- Para en Estado Límite de Servicio (E.L.S.):
- Para el caso de accidente operativo se toma  $G \pm T$  por gradiente.
- Para el caso de accidente por explosión  $G \pm E$ .
- Para la comprobación a fuego se utiliza el método simplificado de EC3 part 1.2 y solo influye el peso propio G.

Las combinaciones de cargas se establecen para capturar los esfuerzos máximos, convenientemente mayorados, que pueden solicitar a la estructura. En este caso solamente hay posibilidad real de una acción variable simultanea, es decir que no influyen los denominados coeficientes de combinación  $\Psi$  de las acciones variables de acompañamiento de la acción predominante  $Q_i$ .

## **Descripción de la solución**

### ***Chapa nervada***

En la solución propuesta se utiliza la chapa nervada tipo Eurobase 106 (Perfil 3.250.106) de espesor 1,2 mm cuyas dimensiones de nervios permiten una disposición de armadura en la zona de nervio muy favorable a efectos de protección contra el fuego, por otra parte esta chapa juega el clásico papel de “liner” o revestimiento que proporciona estanqueidad al paso de llama o gases y evita el fenómeno de “spalling” o desconchado brusco del hormigón.

El espesor de la chapa es el máximo de fabricación standard. De esa forma se obtiene la máxima capacidad posible como encofrado, de modo que se logran luces de más de 3 metros (separación de dinteles) lógicamente sin apeos intermedios.

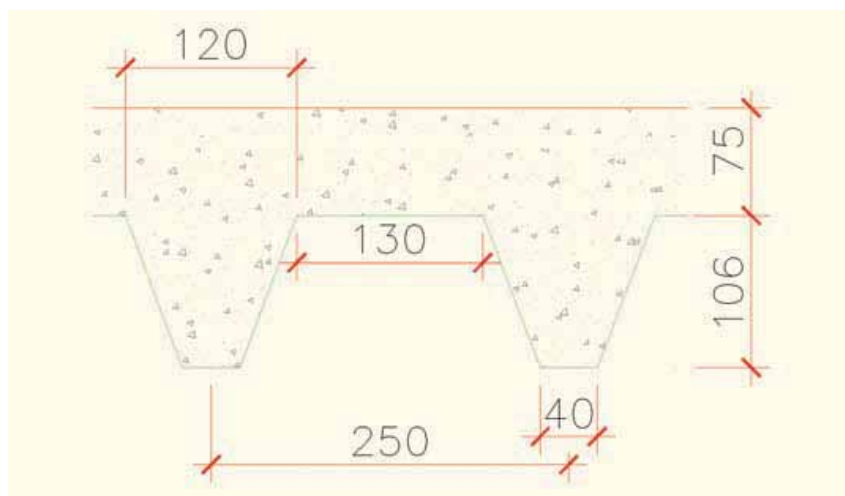


Figura 2: Dimensiones de la chapa nervada.

Aquí es necesario calcular con precisión, apurando la resistencia de este encofrado. Se trata de una estructura provisional pero de clase 4, donde hay que determinar el ancho eficaz de las alas superiores comprimidas de los nervios. Se aplica Eurocódigo 3, parte 1.3 que permite la plastificación parcial de las alas inferiores de los nervios traccionados.

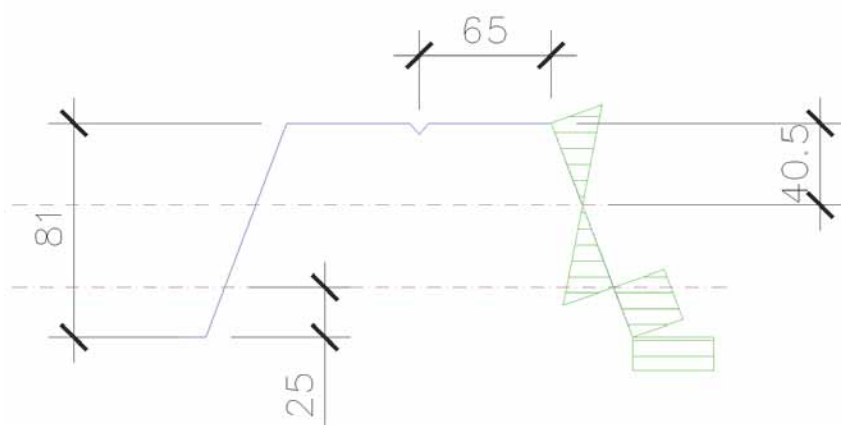


Figura 3: Distribución de esfuerzos en la chapa nervada.

Las acciones determinantes, son el peso propio, ya de por sí reducido, y las cargas de ejecución que se han señalado antes. Una vez endurecido el hormigón el estado tensional se reduce por la desaparición de dichas cargas. Ahora se prescinde de la contribución de la chapa de acero y es la losa nervada de hormigón la que se diseña para soportar todas las cargas.

### *Hormigón en nervios y capa de compresión*

Se utiliza hormigón ligero, de densidad 1,80 t/m<sup>3</sup> de buenas condiciones de aislamiento térmico. De este modo, al rebajar la masa, se reducen los esfuerzos sísmicos y el nivel de utilización al determinar la resistencia al fuego por el método simplificado. Para garantizar el criterio de aislamiento térmico la losa nervada debe disponer de un espesor o grosor eficaz mínimo en función del tiempo de resistencia al fuego requerido, cuando se utiliza hormigón ligero se permite reducir esos valores al 90%.

Disponiendo un espesor total de 181 mm. de forjado (canto de la onda 106 + capa de compresión 75) se obtiene un espesor equivalente térmico superior al requerido por Eurocódigo 4 parte 1.2 de 120 mm en el caso de RF120.

El peso resultante, incluyendo la chapa nervada (14,92 kg/m<sup>2</sup>) es de 211 kg/m<sup>3</sup>.

Este forjado se dispone biapoyado entre dinteles, para evitar flector por efecto de gradiente térmico. Asimismo esta disposición facilita la colocación y montaje. La separación entre dinteles se establece en 3,8 metros en anchos de túnel de 12 metros. En los sobrecanchos de 14 metros se reduce a 2,5 metros. Para dimensiones superiores hay que aumentar la sección de dinteles. Como ya se dicho resulta determinante el trabajo como encofrado perdido y el requisito de aislamiento térmico. La flecha final de los nervios es inferior al trescientos cincuentavo de la luz para las cargas indicadas anteriormente.

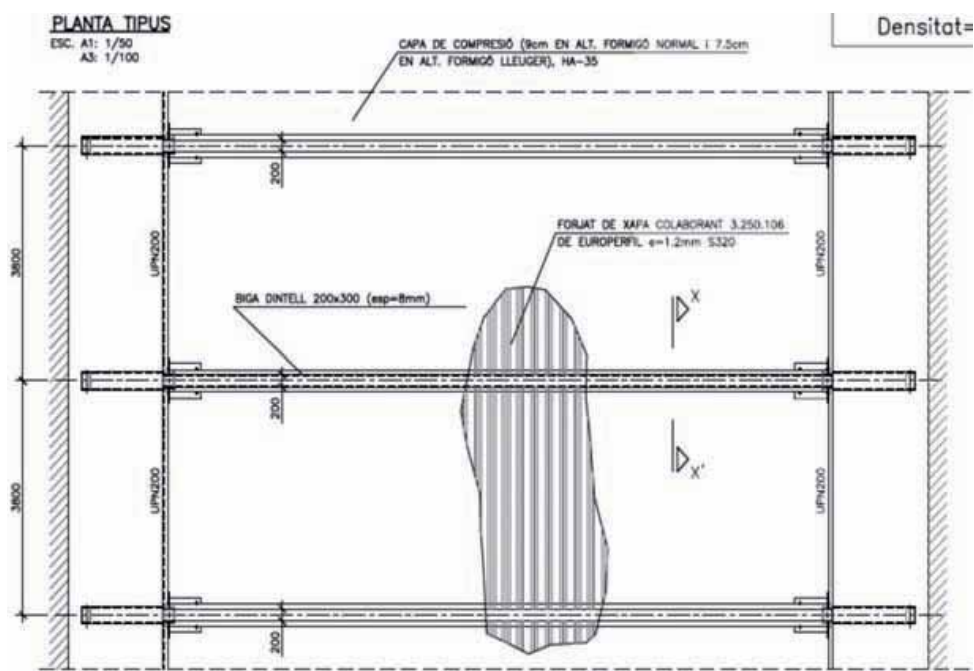
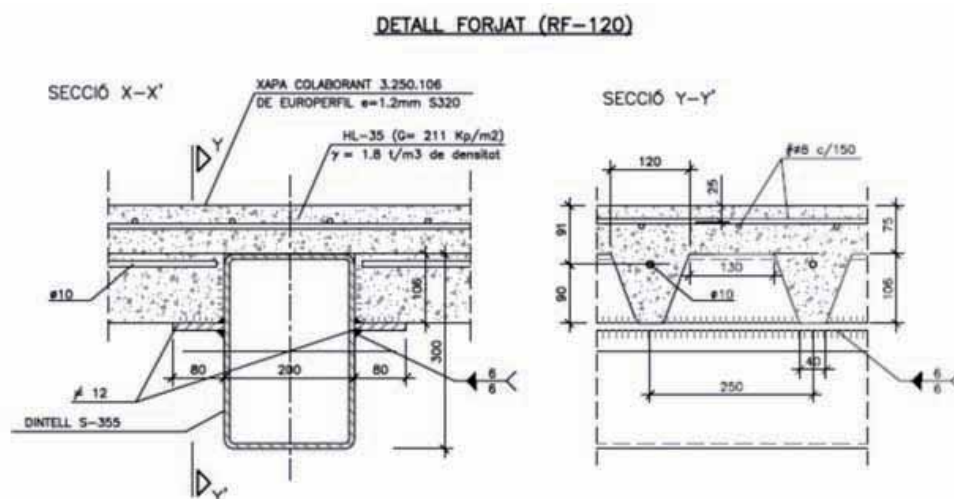


Figura 4: Planta tipo del forjado mixto ligero en falso techo.

El forjado dispone de armadura  $\varnothing 10$  en cada nervio y un mallazo superior  $\varnothing 8/0,150$  con lo cual soporta adecuadamente tanto las acciones descendentes (peso propio + sobrecarga  $100\text{kg/m}^2$ ) como ascendente ( $240\text{kg/m}^2$  por succión).



*Figura 5: Detalles del dintel y la chapa nervada del forjado mixto ligero.*

Por otra parte se obtiene un efecto diafragma plano muy favorable frente a acciones sísmicas, que proporcionan rigidez en sentido horizontal evitando el pandeo lateral de dinteles.

A temperatura ambiente el armado es sobreabundante, a pesar de que la armadura de nervios se sitúa con un gran recubrimiento (90 mm) ya que la combinación pésima para cargas ascendentes da esfuerzos pequeños. Para carga ascendente la armadura traccionada es la del mallazo superior y asimismo está sobrada. Para el cortante se considera exclusivamente la capa de compresión y se añaden barras dobladas a  $45^\circ$  en extremos suplementarias que facilitan el montaje.

Las dimensiones de nervios, espesor de capa de compresión y posición de armadura cumplen con los requisitos de aislamiento térmico y estanqueidad correspondientes a RF.120 de EC4 parte 1.2, obteniéndose una temperatura en cara superior por debajo de  $180^\circ\text{C}$  al cabo de 120 minutos de la curva temperatura-tiempo ISO 834. Dado que la cara inferior es la que está en contacto con el fuego la resistencia del hormigón en la parte superior comprimida no queda afectada, por el contrario en la armadura de nervio las medidas los parámetros de posición son:

$$u_1 = u_2 = 55 \text{ mm} : u_3 = 90 \text{ mm}$$



el coeficiente  $z$  que determina la temperatura resulta:

$$1/z = 1/\sqrt{u_1} + 1/\sqrt{u_2} + 1/\sqrt{u_3} \quad z=2,66$$

por lo tanto se alcanza  $\theta_S = 1370 - 350 z = 439^\circ \text{C}$ , a esa temperatura el límite elástico del acero vale un 92 % del correspondiente a temperatura ambiente y como la carga no se factoriza ni se minora la resistencia el forjado resiste sobradamente la acción del incendio.

De hecho la armadura indicada está determinada por los requisitos de cuantía mínima en forjados mixtos (0,002 en mallazo superior). Para el caso de explosiones según Eurocódigo 1, parte 1.7 se impone aumentar el canto del forjado, recurriendo a hormigón convencional HA-35 y se requieren anchos de nervios mayores y mayor cuantía de acero.

Al resultar determinante la respuesta del forjado es aconsejable utilizar los métodos clásicos de análisis por reducción a un grado de libertad. Las variables que controlan la respuesta son la duración de la acción variable  $t_d$  en relación con el periodo equivalente del sistema  $T$  y la relación de presión incidente máxima/resistencia del sistema. Para estructuras de defensa y protección en plantas petroquímicas se admite una ductilidad  $\mu=3$  (relación de desplazamientos plástico/elástico) en ACI 349 para estructuras nucleares se puede llegar hasta  $\mu=10$

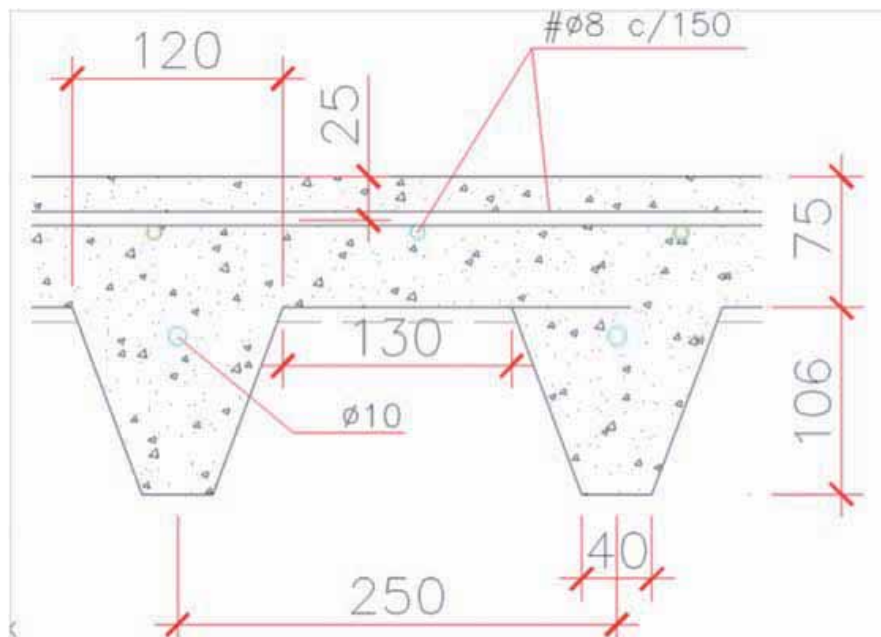


Figura 6: Detalle del armado de compresión y de los nervios del forjado mixto ligero.



***Vigas dinteles***

Para las vigas dintel de luz total del orden de 11,50 metros se disponen perfiles tubulares rectangulares (300x200) de 8 mm de espesor, de acero S355J2H que es el suministro habitual. Las dimensiones y el espesor juegan un papel decisivo en los tres aspectos:

1. Rigidez (flecha activa y de montaje). Indirectamente la flecha con carga muerta es un índice del periodo propio fundamental de la estructura. Al tratarse de un forjado biapoyado (nervadura longitudinal) y de dinteles asimismo biapoyados en hastiales se tiene un esquema resistente en serie. La rigidez es la inversa de suma de inversas de rigideces parciales y por lo tanto la frecuencia fundamental (proporcional a la raíz cuadrada) viene determinada por el componente más flexible o sea el forjado. Por un lado hay que evitar (como siempre) la posibilidad de resonancia con paso humano, por otro hay que propiciar valores relativamente bajos (2,5- 3 Hz) que implican periodos para lo cuales las cargas impulsivas resultan de pequeña duración relativa en caso de explosiones.
2. Resistencia con cargas estáticas. Para cargas ascendentes puede contarse con la ayuda de apoyos interiores que pueden transmitir axiles de compresión hacia la clave del túnel. Para cargas descendentes, incluyendo el efecto de rebote de cargas dinámicas puede dotarse al conjunto de una estructura tipo Vieren-deel añadiendo un cordón o par superior paralelo y exento a la clave.
3. Resistencia contra incendio. El hormigón que rodea lateral y superiormente al dintel, y unido mediante conectadores tipo Nelson, solamente deja expuesta la cara inferior del ala. El factor de masividad  $A/V$  es lo suficientemente bajo como para permitir la aplicación de pintura intumescente. Actualmente hay fabricantes que garantizan mediante ensayo recubrimientos razonables para RF 120 con temperaturas críticas mínimas de 620 °C.

Se prevé una contraflecha inicial en el pórtico con luz típica, de 3,5 cm.

En las zonas de sobreancho de túnel se mantiene el mismo esquema, utilizando idénticos dinteles y soportes pero reduciendo la separación mutua de estas costillas a 2,50 metros, siempre que la luz de cálculo no supere los 14 metros.

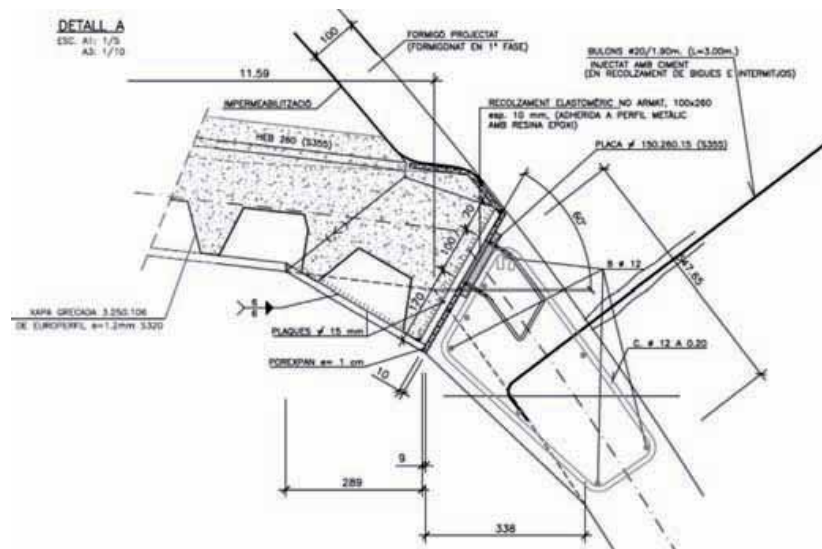


Figura 7: Detalle de la unión dintel-hastial del forjado mixto ligero.

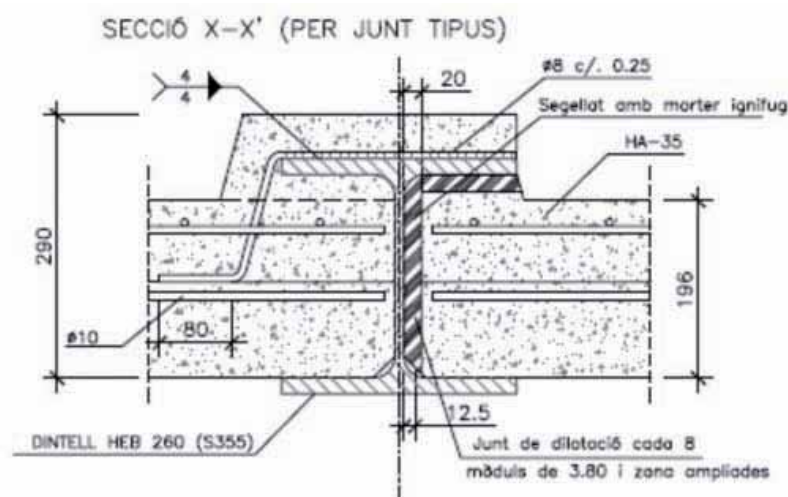


Figura 8: Detalle de la junta de dilatación entre dinteles del forjado mixto ligero.

### ***Pilares o apoyos extremos***

Se proyectan con nudos rígidos en la unión cuando se usan los pilares, formando un pórtico que no tiene posibilidad de translación ya que el forjado de hormigón se atraca contra los hastiales. Se pueden disponer perfiles UPN en extremos, que hacen de cierre longitudinal del forjado y arriostran esos nudos.

Teniendo en cuenta que durante la ejecución no tendrán arriostramiento lateral (sí que pueden llevar contraflecha vertical previa). El perfil resiste en ambos sentidos (cargas ascendentes y descendentes) cuando no hay posibilidad de explosiones.

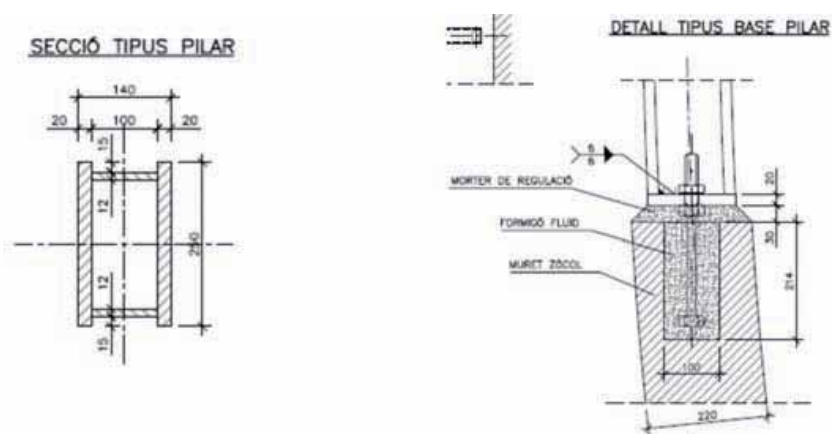


Figura 9: Sección y detalle de los pilares del forjado mixto ligero.

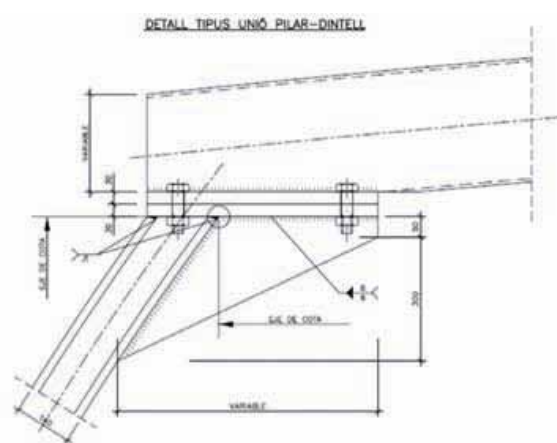


Figura 10: Detalle de la unión pilar-dintel del forjado mixto ligero.

Resulta determinante la exigencia de resistencia al fuego que puede lograrse dotándole de un revestimiento de 1,5 cm con mortero proyectado de vermiculita (de  $\lambda = 0,12 \text{ W/m}^2\text{K}$ ), junto con su relativamente bajo valor del factor de masividad se superaran holgadamente 120 minutos. También se contempla la posibilidad de protección con placas y con pintura intumescente.

Hay que partir de un cierto sobredimensionamiento a temperatura normal para tener un factor de utilización bajo en caso de incendio logrando que la temperatura crítica en el acero sea siempre superior a la temperatura de ensayo de las pinturas intumescentes.

Los soportes tienen una directriz determinada por la sección del túnel. Se mejora su esquema resistente haciendo rígido el nudo con los dinteles y se articula en pie, para facilitar el montaje y la fijación al murete del zócalo.

El soporte tipo tiene siempre una limitación de canto precisamente en el plano transversal ya que se debe respetar el ancho previsto de revestimiento. Se diseña con un perfil armado de 140 x 250 con alas de 20 mm de espesor y almas de 12 mm. En este caso no sería necesario disponer ninguna fijación intermedia si bien se da una gran esbeltez en estos pilares.

En el caso de incendio se calculan las cargas de forma realista y se aplica estrictamente el Eurocódigo 3 parte 1.2. Aquí es ventajoso pasar de 620° C de temperatura crítica para ahorrar material y recurrir a un tipo de protección a base de pintura intumescente.

Otra solución alternativa consiste en sustituir el perfil armado por laminado en caliente. En este caso el suministro más fácil es con acero S275, si bien es preferible S355 por su mejor tratamiento para clasificación de la sección y su mayor margen resistente.

Con el ancho disponible tan reducido como de 140 mm la sección formada por 2HEM120 (canto total 140 mm, ancho total 252 mm) se tiene una inercia similar a la solución de perfil armado (4036 cm<sup>4</sup>) y hace que se mantengan los esfuerzos y flechas. No obstante debe tenerse en cuenta que el doblado de perfiles de esta magnitud es costoso y puede requerir el corte previo de almas con su posterior reconstrucción. Por otra parte se deberán unir las alas cerrando la sección en cajón con lo cual hay más soldadura que en la alternativa de perfil cerrado.

## Conclusiones

El diseño de falsos techos en túneles de carretera basados en forjado mixtos apoyados en vigas o pórticos transversales ofrece las siguientes ventajas :

1. Facilidad y rapidez de ejecución.
2. Comportamiento estructural de conjunto, dúctil y resistente evitando “spalling” y proporcionando una respuesta aceptable en el caso de explosiones internas.
3. Adecuada resistencia al fuego, permitiendo el uso de varios sistemas de protección.
4. Integración de instalaciones y trampillas de ventilación.
5. Reducción del efecto horno en techo dada su mejor reflectividad.
6. Posibilidad de refuerzo, lastrado o inclusión de soportación superior intermedia en caso de cambio de intensidad de tráfico o de exigencia de resistencia a explosiones.

Actualmente se cuenta con normativa, métodos de cálculo, suministro de materiales y métodos constructivos que permiten la implantación de soluciones de este tipo.

## Bibliografía

Normas aplicables que contienen las acciones, principios y métodos de cálculo de estructura de acero y forjados mixtos :

Eurocódigo 1, UNE EN 1991. parte 1.7 Acciones accidentales.

Eurocódigo 1. UNE ENE 1991, parte 1.2 Acciones de incendio.

Eurocódigo 3 UNE ENE 1993 parte 1.1 Estructuras de acero. General.

Eurocódigo 3 UNE ENE 1993 parte 1.2 Estructuras de acero. Resistencia al fuego.

Eurocódigo 3 UNE ENE 1993 parte 1.3 Estructuras de acero. Secciones ligeras.

Eurocódigo 4 UNE ENE 1994 parte 1.1 Estructuras mixtas. General.

Eurocódigo 4 UNE ENE 1994 parte 1.2 Estructuras mixtas. Resistencia al fuego.

Instrucción de hormigón estructural EHE.

Borrador, documento 1 de futura Instrucción de acero estructural EAE.

Libros, recomendaciones y guías útiles para el diseño y cálculo de elementos estructurales /forjados mixtos sometidos a acciones de accidente:

“Guía para la comprobación de la resistencia al fuego de estructuras.” ASCEM (Asociación para la construcción de estructuras metálicas). Barcelona 2004.

“Structural Design for Fire Safety” Andrew H.Buchanan .Wiley & Sons . Chichester 2004

“Design of Blast Resistant Buildings in Petrochemical Facilities” ASCE (American Society of Civil Engineers) Reston USA 1997.

“Structures to resist the effects of accidental explosions” .Department of Defence USA.2008.

“Steel and Composite Structures. Behaviour and design for fire safety”. Y.C.Wang. Spoon Press. London 2002.

“Fire in Tunnels .Technical report part1. Design fire scenarios” WTCB Bruselles

## Resumen de datos de diseño, solución con pórticos en hastiales

Sin consideración de explosiones.

### **Forjado:**

|               |                                     |
|---------------|-------------------------------------|
| Luz típica    | 3,8 metros, para 11,5 metros de luz |
| Luz especial  | 2,5 metros, para 14,0 metros de luz |
| Chapa nervada | Eurobase 106 (Perfil 3.250.106)     |
| Acero         | S 320 GD+Z ( UNE EN 10326 )         |

|                         |                                                            |
|-------------------------|------------------------------------------------------------|
| Espesor                 | 1,2 mm                                                     |
| Canto total             | 196mm                                                      |
| Hormigón HA-35          | $\gamma = 1,8 \text{ t/m}^3$<br>$f_{ck} > 35\text{N/mm}^2$ |
| peso de chapa           | $\approx 14,92 \text{ kg/m}^2$                             |
| peso de hormigón ligero | $\approx 196,056 \text{ kg/m}^2$                           |
| armadura superior       | mallazo Ø 8 (0,150x0,150)                                  |
| armadura inferior       | Ø 10 (por nervio= cada 250 mm,)                            |

***Dinteles:***

|                  |                                  |
|------------------|----------------------------------|
| separación mutua | 3,8 metros / 2,50 metros         |
| luz aproximada   | 11,50 metros / 14,00 metros      |
| perfil           | 300·200 (t = 8,0mm), rectangular |
| acero            | S355J2H                          |

***Soportes:***

|                   |                                                   |
|-------------------|---------------------------------------------------|
| separación mutua  | 3,8 metros                                        |
| altura aproximada | 5,5 metros                                        |
| perfil armado     | 250.140 (t = 12mm)    almas<br>(t = 20mm)    alas |
| acero             | S355J2                                            |

(alternativa de 2 HEM 120 de acero S275JR cerrados en cajón , con dimensiones t totales 140x252)