



Trabajo final de grado

Estudio de un forjado unidireccional con hormigón de muy alto rendimiento para una nave industrial en el Puerto de Sagunto (Valencia)

Valencia, septiembre de 2017

TITULACIÓN: Grado en Ingeniería de Obras
Públicas

Curso: 2016/17

AUTOR: Miguel Ángel Capilla Pradas

TUTOR: Carmen Castro Bugallo

COTUTOR: Juan Navarro Gregori



Índice:

1.	Introducción	5
1.1	Objetivos:	5
1.2	Organización.....	5
2.	Estado del arte.	7
2.1	Descripción del material:	8
2.1.1	Propiedades del material	8
2.1.1.1	Densidad.....	8
2.1.1.2	Módulo de elasticidad o de Young	9
2.1.1.3	Retracción.....	9
2.1.1.4	Fluencia	9
2.1.1.5	Durabilidad	9
2.1.2	Características mecánicas	10
2.1.2.1	Resistencia a compresión	10
2.1.2.2	Resistencia a tracción.....	11
2.1.2.3	Resistencia a flexión	11
2.1.2.4	Ecuaciones constitutivas: Comportamiento del HMAR	12
2.1.2.5	Influencia de las fibras.....	12
2.1.3	Coste del material	12
2.1.4	Estética	13
3.	Datos de partida y normativa utilizada:	14
3.1	Condiciones e infraestructura:	15
3.2	Normativa utilizada:	15
3.3	Acciones a considerar.....	16
3.3.1	Acciones permanentes	16
3.3.2	Acciones variables	16
3.4	Clase de exposición:	16
3.5	Propiedades de los materiales:	17
3.5.1	Hormigón de muy alto rendimiento:	17
3.5.2	Hormigón convencional:	17
3.5.3	Armadura activa	17
4.	Alternativa con soluciones “tradicionales”.	18



4.1	Introducción:	19
4.2	Solución con placas alveolares:.....	19
4.3	Solución con chapa colaborante:	20
5.	Solución con Hormigón de Muy Alto Rendimiento (HMAR).	22
5.1	Introducción:	23
5.2	Estudio de soluciones geométricas:	23
5.3	Fases constructivas del forjado y consideraciones:	24
5.4	Geometría:	25
5.4.1	Requerimientos Geométricos por Durabilidad:	25
5.4.1.1	Clase de Exposición:	25
5.4.1.2	Recubrimiento mínimo:	26
5.4.1.3	Recubrimiento nominal:.....	26
5.4.2	Propiedades geométricas:.....	27
5.4.2.1	Sección mixta hormigón de muy alto rendimiento y hormigón convencional: 27	
5.5	Estado límite de Servicio.	28
5.5.1	Pérdidas de pretensado	28
5.5.1.1	Pérdidas iniciales del pretensado:.....	28
5.5.1.2	Pérdidas diferidas del pretensado	28
5.5.2	Limitación tensional, control de fisuración:	29
5.5.2.1	Cálculo de tensiones:	30
5.5.3	Flecha.	32
5.5.3.1	Cálculo de flecha:	32
5.6	Estado Límite último	33
5.6.1	ELU Tensiones normales.	34
5.6.1.1	Armadura de la losa de compresión.	35
5.6.2	ELU Tensiones tangenciales.	35
5.6.2.1	ELU Tensiones tangenciales: Cortante.	35
6.	Valoración económica.....	36
6.1	Unidades de Obra:.....	37
6.1.1	Alternativa con HMAR:	37
6.1.2	Alternativa con losas alveolares:.....	37
6.1.3	Alternativa con chapa colaborante:	38
6.2	Precios unitarios.....	38



6.2.1	Alternativa con hormigón de muy alto rendimiento:	39
6.2.2	Alternativa con losas alveolares.....	40
6.2.3	Alternativa con chapa colaborante.....	42
6.3	Mediciones:.....	43
6.3.1	Alternativa con hormigón de muy alto rendimiento.	43
6.3.2	Alternativa con losas alveolares.....	44
6.3.3	Alternativa con chapa colaborante	44
6.4	Valoración económica.....	45
6.4.1	Alternativa con hormigón de muy alto rendimiento.	45
6.4.2	Alternativa con losas alveolares.....	45
6.4.3	Alternativa con chapa colaborante	45
7.	Comparación:	46
7.1.	Comparación económica.....	47
7.2.	Comparación técnica.....	47
6.	Conclusiones.....	49
7.	Bibliografía:	51

1. Introducción

Durante el tercer año del Grado en Ingeniería de Obras Públicas, cursé una asignatura de Hormigón pretensado. Motivado por el interés en profundizar sobre esta, me dirigí a la profesora de la asignatura de pretensado y actual tutora de mi TFG Carmen Castro Bugallo. Ella me puso en contacto con mi cotutor Juan Navarro Gregori, y entre los tres se pensó que estudiar si el hormigón de muy alta resistencia (HMAR) puede llegar a ser una buena alternativa a las soluciones convencionales en forjados podría ser un tema interesante para realizar el TFG.

El HMAR tampoco es un completo desconocido para mí, puesto a que, en este último año del grado, en la asignatura de Hormigones Especiales, se nos ha hecho una breve introducción del material.

Las cualidades de este material lo hacen especialmente atractivo. Su resistencia a compresión suele ser mayor de 150 MPa y la incorporación de las fibras hacen que la resistencia a tracción no sea despreciable llegando a alcanzar 8 MPa en su valor de cálculo. Con este último dato, se puede jugar reduciendo la fuerza de pretensado necesaria para optimizar el comportamiento del material.

A parte, la mayor durabilidad de este material, debida a la poca porosidad y la escasez de fisuras, permite reducir los espesores, consiguiendo con ello elementos más esbeltos y ligeros. También cabe añadir que los acabados suelen ser agradables aportando un valor añadido a la obra.

Con esto, creo que este trabajo puede ser una excelente oportunidad para saciar mi curiosidad sobre estos dos temas, el hormigón pretensado y el HMAR.

1.1 Objetivos:

El objetivo de este trabajo, estudiar las soluciones convencionales para un forjado en una nave industrial y posteriormente analizar ese mismo forjado para una solución con HMAR. Tanto desde el punto de vista estructural como desde el punto de vista económico. Y con los resultados realizar una comparación para comprobar si se podría utilizar el HMAR de una forma eficiente en una situación habitual.

Para conseguir esta meta es necesario indagar sobre ciertos puntos.

- Análisis de las características de hormigón de muy alto rendimiento en base a estudios ya realizados y de recomendaciones existentes.
- Estudio de secciones que permita aprovechar al máximo las propiedades de este material
- Análisis del hormigón de muy alto rendimiento como alternativa a soluciones tradicionales para resolver un forjado.

1.2 Organización

El trabajo se va a dividir en varias partes. A continuación, me dispongo a hacer un breve resumen de lo que va a constar en cada una de ellas.

• Estado del arte:

En este apartado, movido por la necesidad de explicar las cualidades del nuevo material, se van a describir algunas de las propiedades del material tales como la resistencia a compresión y a tracción, el módulo de deformación, el comportamiento del material en relación a retracción y a la fluencia, etc.

- **Datos de partida y normativa utilizada:**

Debido a que el estudio es una comparación entre varias soluciones, es necesario que existan unos parámetros que equiparen la comparación. Por ello, en este punto, se van a plantear y desarrollar todos los datos comunes a todas las soluciones.

Complementariamente, se van a nombrar y justificar el uso de las normativas en cada uno de los puntos posteriores.

- **Alternativas con soluciones Tradicionales:**

El objeto de este punto es hacer una breve selección entre las alternativas más comunes para resolver un forjado de una nave industrial intermedia, y calcular con el CYPE dos de ellas con tal de tener una referencia a la hora de evaluar el forjado de HMAR,

- **Alternativa con hormigón de muy alto rendimiento (HMAR):**

El grueso del trabajo erradica en este punto. Se van a plantear algunas propuestas de geometría y posteriormente se va a calcular la que parece más apropiada, comprobando los estados límite de servicio y los estados límite últimos de esta.

- **Valoración económica:**

En este apartado, se va a realizar la valoración económica de los forjados a fin de poder realizar una comparativa más delante de este trabajo. En el mundo de la ingeniería civil, muy a menudo, la solución adoptada es la que más se ajusta a las necesidades económicas del promotor, no siendo siempre la mejor opción a largo plazo.

- **Comparación:**

En este apartado se va a realizar una valoración técnica subjetiva y una valoración económica de cada una de las soluciones estudiadas anterior mente. Con tal de que la comparación económica sea completa, se van a proponer los procesos constructivos de todas las soluciones calculadas.

- **Conclusiones.**

Por último, se van a presentar las conclusiones que se obtengan del estudio, bien sean positivas o negativas, intentado responder a la pregunta ¿Es viable construir una solución para un forjado con hormigón de muy alto rendimiento?



2. Estado del arte.

En este apartado, movido por la necesidad de explicar las cualidades del nuevo material, se van a describir algunas de las propiedades del material tales como la resistencia a compresión y a tracción, el módulo de deformación, el comportamiento del material en relación a retracción y a la fluencia, etc.

<u>2.</u>	<u>Estado del arte.</u>	7
<u>2.1</u>	<u>Descripción del material:</u>	8
<u>2.1.1</u>	<u>Propiedades del material</u>	8
<u>2.1.1.1</u>	<u>Densidad</u>	8
<u>2.1.1.2</u>	<u>Módulo de elasticidad o de Young</u>	9
<u>2.1.1.3</u>	<u>Retracción</u>	9
<u>2.1.1.4</u>	<u>Fluencia</u>	9
<u>2.1.1.5</u>	<u>Durabilidad</u>	9
<u>2.1.2</u>	<u>Características mecánicas</u>	10
<u>2.1.2.1</u>	<u>Resistencia a compresión</u>	10
<u>2.1.2.2</u>	<u>Resistencia a tracción</u>	11
<u>2.1.2.3</u>	<u>Resistencia a flexión</u>	11
<u>2.1.2.4</u>	<u>Ecuaciones constitutivas: Comportamiento del HMAR</u>	12
<u>2.1.2.5</u>	<u>Influencia de las fibras</u>	12
<u>2.1.3</u>	<u>Coste del material</u>	12
<u>2.1.4</u>	<u>Estética</u>	13

2. Estado del arte

Con tal de poder hacer un buen estudio del forjado a diseñar, es necesario conocer las principales propiedades de este material. Por ello se va a recopilar información sobre este.

2.1 Descripción del material:

En la actualidad existen varias patentes sobre hormigones de muy alto rendimiento. Con ellas se pueden llegar a fabricar hormigones de entre 150 y 225 MPa de resistencia a compresión y entre 8 y 12 MPa de resistencia a tracción.

Este hormigón está compuesto por cemento, humo de sílice, árido fino, fibras de acero o sintéticas, agua y super-plastificante.

Se suele prescindir del árido grueso ya que influye, entre otras cosas, a la homogeneidad de la mezcla. En cambio, el árido fino es imprescindible, ya que, con él se busca confinar la mezcla y reducir las discontinuidades en el hormigón. Lo habitual es no utilizar tamaños de áridos superiores a 2mm y de origen silíceo.

El contenido de cemento sobrepasa los 700 kg/m³ pudiendo llegar a los 1300 kg/m³. Esta es una de las circunstancias que incrementa de forma notable el coste, además de dificultar la trabajabilidad del material y variar los fenómenos de retracción y fluencia con respecto a los hormigones convencionales. Suele ser habitual el uso de cementos resistentes a sulfatos y con bajo calor de hidratación.

El uso de aditivo super-plastificante se hace necesario para mejorar la trabajabilidad del material ya que los tiempos de fraguado y adquisición de resistencia se ven muy afectados.

-El contenido de agua suele estar entre 175-220l/m³. Debido a la baja relación agua cemento se obtendrá un hormigón con alta resistencia y densidad relativa, baja porosidad y elevada permeabilidad. El cemento no hidratado, actuará como filler, y dotará al hormigón la capacidad de auto regeneración pudiendo hidratarse y cerrando las micro fisuras al interactuar el agua con este.

El humo de sílice permite la obtención de mayores resistencias mecánicas. Aparte, hace a la mezcla menos trabajable y consistente, y más cohesiva y compacta dada la finura de sus partículas.

Las fibras son elementos imprescindibles en el HMAR. Con ellas se mejora la ductilidad y la resistencia a tracción. Deben ser de acero de alto límite elástico. Con ellas se busca coser las fisuras y evitar la rotura frágil. Sin embargo, se reduce considerablemente la trabajabilidad del hormigón en estado fresco. Siendo el factor más influyente en esto la longitud de las mismas.

Con las fibras se puede llegar a conseguir incrementar los picos de resistencia una vez el hormigón ha llegado a la rotura. Permitiendo la redistribución de esfuerzos

Juntando todos estos elementos, se ha llegado a un material muy atractivo y con unas características muy favorables con respecto a las soluciones tradicionales de hormigón. El hecho de que se pueda contar con una resistencia a tracción lo hace muy útil para según que aplicaciones o usos. En la actualidad uno de los mayores hándicaps con los que se puede encontrar este nuevo material es su elevado coste de producción.

2.1.1 Propiedades del material

2.1.1.1 Densidad

El hormigón de muy alto rendimiento es un material muy compacto debido a su composición, gran cantidad de finos. Por ello su densidad es un poco más elevada que la del

hormigón convencional rondando entre los 23 y 27 kN/m³. No obstante, a la hora de calcular, puesto a que no lleva armadura pasiva se va a considerar que la densidad son 25 kN/m³ igual que en el hormigón armado o pretensado convencional.

Recordemos que la densidad del hormigón convencional es de entre 22 y 24 kN/m³ en masa y que son las armaduras pasivas las que la incrementan a 25 kN/m³ en el hormigón armado.

2.1.1.2 *Módulo de elasticidad o de Young*

En la actualidad existen multitud de correlaciones entre la resistencia a compresión del HMAR y su módulo de Young o elasticidad. El rango de valores oscila entre los 40-50 GPa, llegando a alcanzar los 60 GPa si se incluye árido grueso en la dosificación.

$$\text{Sritharan 2003} \rightarrow E = 4150\sqrt{f_c}$$

$$\text{Graybeal 2007} \rightarrow E = 3840\sqrt{f_c}$$

$$\text{Ma 2002} \rightarrow E = 16364 \ln f_c - 34828$$

$$\text{Ma 2004} \rightarrow E = 19000\sqrt[3]{\left(\frac{f_c}{10}\right)}$$

Para este proyecto se va a tomar un módulo de elasticidad de 50 GPa

2.1.1.3 *Retracción*

Se pueden diferenciar tres tipos de retracción. La retracción autógena, la de secado y la retracción global.

En contraposición al hormigón convencional, el HMAR, no cuenta con un esqueleto de árido grueso, por tanto, la retracción de secado va a ser mucho mayor. También debida a la mayor cantidad de cemento la retracción autógena también va a ser mayor que en el hormigón convencional

Según las recomendaciones de la AFGC-SETRA¹ la retracción es mayormente endógena (550 µm/m). la retracción debida al secado es de aproximadamente 150 µm/m.

En estas mismas recomendaciones, también apunta a que se si realiza un tratamiento térmico a las piezas en los primeros días después del hormigonado, se puede forzar a que la retracción se de en ese mismo momento.

En este TFG, se ha optado por no realizar tratamiento térmico. Y suponer que la retracción se da a lo largo de toda la vida útil del elemento. Cogiendo como referencia de la evolución de esta una gráfica que pone de ejemplo en las recomendaciones y que se verá más adelante en el trabajo cuando se calculen las pérdidas por retracción.

2.1.1.4 *Fluencia*

El coeficiente fluencia del hormigón de muy alto rendimiento, según las recomendaciones de la AGCF-SETRA¹, se puede considerar 0,8 si no se disponen datos experimentales sobre una dosificación específica y no se va a realizar tratamiento térmico.

2.1.1.5 *Durabilidad*

Uno de los puntos a favor de este hormigón, aparte de su resistencia a compresión y tracción, es la durabilidad.

Los ataques al hormigón suelen ser por agentes externos a la estructura. Sobre todo, ataques químicos, de carbonatación, cloruros, etc. En este caso, debido a que es un hormigón muy poco poroso y muy compacto, a que las fibras solo permiten que se formen microfisuras y a la capacidad autosanante del hormigón, la durabilidad del HMAR es muy superior a la de los hormigones convencionales.

La elevada durabilidad de este material se traduce en que la vida útil del material es mucho más larga, y las tareas de mantenimiento son escasas incluso nulas. También se traduce en que los recubrimientos de las armaduras son mucho menores, con las ventajas mecánicas que ello conlleva. Todos estos puntos a favor llevan a beneficios económicos

2.1.2 Características mecánicas

Para este trabajo, lo que es de mayor interés, es caracterizar las propiedades mecánicas y entenderlas. Para luego así poder obtener unos resultados convenientes y que se ajusten a las necesidades del problema a resolver. No hay que perder de vista que el precio del material supera el de los materiales con los que se construyen las soluciones tradicionales. Por ello, es necesario intentar ajustar al máximo nuestra solución.

2.1.2.1 Resistencia a compresión

La resistencia a compresión es una de las características con más relevancia en los hormigones. Hasta tal punto que llegan casi a clasificarlos.

El comportamiento a compresión del HMAR es muy similar al del resto de hormigones. Tiene una rama elástica mientras se va cargando y cuando llega al máximo el valor decae de forma irregular. En las recomendaciones de la AFGC-SETRA¹, podemos encontrar varios ejemplos experimentales de esta curva de rotura, como el que se presenta a continuación.

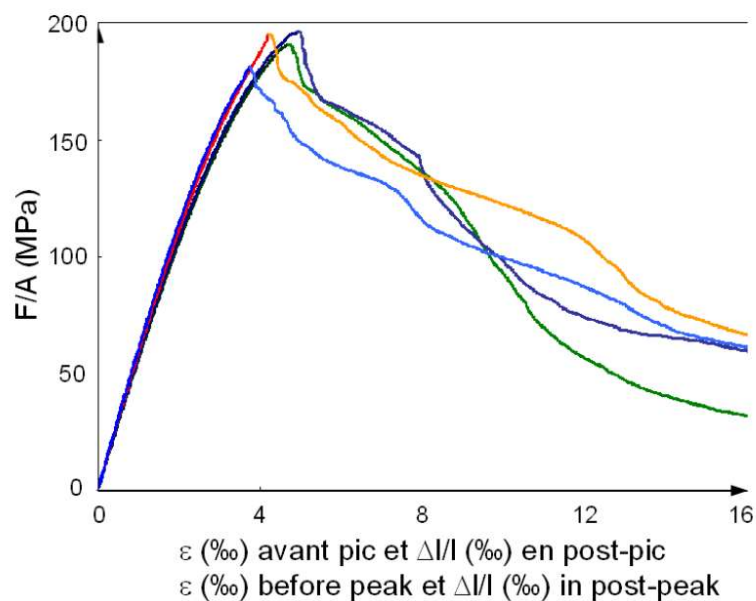


Ilustración 1: Comportamiento experimental de un hormigón de muy alto rendimiento (Fuente: Recomendaciones AFGC-SETRA¹)

En estas mismas recomendaciones, también se indica que la caída de la tensión a compresión soportada por el material puede ser extremadamente rápida si la cantidad de fibras es inferior a la recomendada (2%)¹.

La resistencia a compresión, como en todos los hormigones, se incrementa con el tiempo a la par que se van produciendo las reacciones químicas del fraguado del mismo. Para los hormigones de muy alto rendimiento, fácilmente, se pueden llegar a alcanzar los 150MPa¹ a los 28 días. El límite superior de la resistencia a compresión depende de la cantidad de fibras y de si se utilizan o no tratamientos térmicos.

2.1.2.2 Resistencia a tracción

La resistencia a tracción del HMAR es lo que lo hace realmente atractivo, en mi opinión, para sus aplicaciones en la ingeniería civil. Con él, se han llegado a construir vigas en celosía íntegramente de hormigón. Con hormigones convencionales, esto sería algo muy complicado, ya que en las celosías hay elementos que se puede decir están a tracción pura.

Otra aplicación muy atractiva de esta resistencia a tracción, y la que se va a intentar aprovechar en este trabajo, es la reducción del pretensado necesario. El hormigón de muy alto rendimiento alcanza unos valores de $f_{ct,el}$ que rondan los 8MPa^1 , más de cuatro veces la resistencia a tracción del hormigón convencional. Estos valores, y otros factores que comentaremos a continuación, permiten que se pueda tener en cuenta la contribución del hormigón para soportar las tracciones. Con ello, el estado de descompresión que se busca en los elementos de hormigón convencional se puede llevar un paso más allá. Esto, permite un ahorro económico en cantidad de pretensado.

La otra gran ventaja en relación a la resistencia a tracción del HMAR con respecto al hormigón convencional, erradica en las propias fibras. Tal y como indica en las recomendaciones francesas una vez alcanzado el valor de la resistencia a tracción las fibras entran en carga.

Las recomendaciones diferencian tres tipos de hormigones, “*strain-hardening*”, “*low strain-hardening*” y “*strain-softening*”. Como su propio nombre indica, en el “*strain-hardening*” una vez alcanzado la resistencia a tracción las fibras son capaces de continuar incrementando la tensión. En cambio, el “*low strain-hardening*” una vez se alcanza la resistencia a tracción, se crea una especie de rama dúctil. Por último, en el “*strain softening*” al alcanzar el valor de rotura por tracción la resistencia decae con una rama controlada por las fisuras. A continuación, podemos ver ejemplos del diagrama tensión-abertura de fisura que aparecen en las recomendaciones francesas.

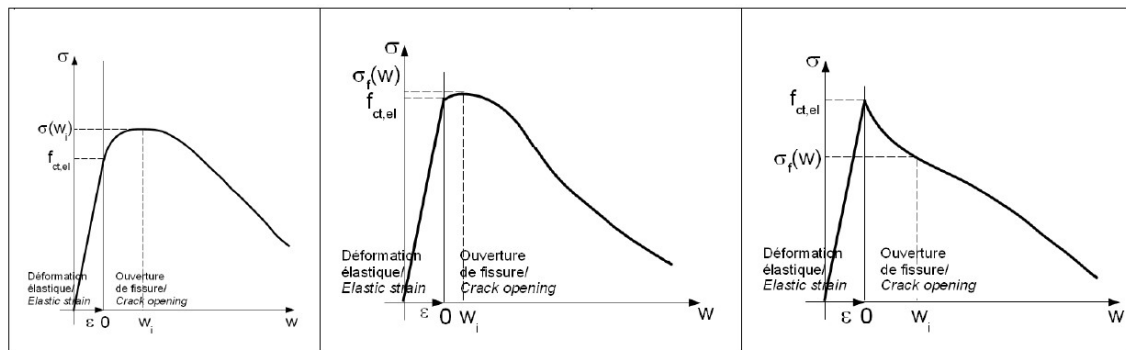


Ilustración 2: Ejemplos de la ley constitutiva del HMAR a tracción. Caso del “*strain-hardening*”, “*low strain-hardening*” y “*strain-softening*” respectivamente. (Fuente: Recomendaciones de la AFGC-SETRA¹)

2.1.2.3 Resistencia a flexión

El hormigón de muy alto rendimiento, en los ensayos a flexo-tracción realizados, ha alcanzado resistencias equivalentes que varían entre los 30 y los 50 MPa. Los mejores resultados se obtienen con hormigones mixtos que tienen fibras cortas y largas. Las cortas dotan al elemento de una mejor resistencia, en cambio las largas dotan al hormigón de una mayor ductilidad.

Un buen diseño del elemento permite prescindir de la armadura secundaria por la acción de las fibras, incluida la armadura de cortante. Esto es bastante favorable, puesto a que con ello, se eliminan los trabajos de ferrallado y se puede reducir la sección. Estos trabajos suelen ser muy costosos y lentos.

2.1.2.4 Ecuaciones constitutivas: Comportamiento del HMAR

Debido al carácter novedoso y al poco conocimiento que se tiene sobre el HMAR, para su caracterización, la AFGC, recomienda que se realicen ensayos con muestras normalizadas de la dosificación a utilizar. En las recomendaciones publicadas por la asociación francesa de ingeniería civil, proponen unos ensayos con ciertos parámetros estandarizados. Estos ensayos dependen del tipo de elemento a construir. Si va a ser una placa gruesa o delgada, o una viga.

En el Anejo 2 de este documento, muestra el procedimiento experimental a seguir para ensayar a flexión las vigas, placas y láminas gruesas. Determinando las dimensiones de las muestras a ensayar, el equipo, la obtención de resultados y finalmente la ley de tensión-abertura de fisura.

Para este trabajo, debido a que no es posible realizar los ensayos pertinentes, se han obtenido los datos de otras fuentes.

2.1.2.5 Influencia de las fibras

Las fibras son en gran medida las responsables del buen comportamiento del hormigón, sobre todo a tracción. Los factores a tener en cuenta para el buen funcionamiento de estas de una forma eficiente, son la cantidad de fibras y la orientación de estas.

Para que la orientación sea la deseada es necesario cuidar el vertido del hormigón, buscando que estas queden paralelas a la dirección del flujo. La propia gravedad también repercute en la orientación de las fibras. El factor más influyente en la orientación de las fibras es la proximidad de las mismas a las paredes de los encofrados con lo que se conoce como walleffect¹.

Estos efectos se ven acentuados en elementos a hormigonar de mayores espesores, pudiendo introducir variaciones en los diagramas de tensión-deformación que se obtienen. Es por ello que las recomendaciones francesas recomiendan un factor corrector $1/k$ que tiene en cuenta el efecto de los métodos de vertido y colocación del hormigón a la hora de obtener los valores de la resistencia a tracción con los ensayos.

2.1.3 Coste del material

En la ingeniería civil, el precio de las cosas es un factor determinante. Llegando al punto de que suele ser el factor que hace que nos decantemos por una u otra solución pese a que no sea la más óptima desde un punto de vista técnico. Por ello, es necesario conocer de qué depende el precio del HMAR si se pretende hacer una buena comparativa con las soluciones tradicionales.

Como es lógico, el coste depende de la dosificación, es decir, de la cantidad y el tipo de cemento, del uso de aditivos super-plastificantes, de la cantidad de humo de sílice, pero, sobre todo, de la cantidad y tipo de fibras empleadas. El precio de las fibras puede llegar a representar más de dos tercios del precio del hormigón.

El precio del HMAR, supera con creces el del hormigón convencional. Esto se debe a que lleva mucha más cantidad de cemento, y de super-plastificante, la adición de las fibras y no tiene árido grueso, que suele ser uno de los elementos más baratos. Este precio puede llegar a ser más de seis veces el del hormigón convencional. Por este motivo, es necesario realizar un diseño ajustado que, aprovechando las mejores características mecánicas, la mayor durabilidad y la menor o nula necesidad de mantenimiento, permita hacer competitivos a este tipo de hormigones.

Por ello, para realizar una valoración precisa de un elemento de HMAR es necesario no solo tener en cuenta el precio del material. También hay que tener en cuenta otros factores como los tiempos de montaje, el transporte, la reducción de volúmenes y peso, la reducción de la mano de obra y maquinaria requerida, un aumento de la vida útil requerida y el coste del mantenimiento.

Realizando una estimación al alza sobre el precio de los dos hormigones, se podría decir que el hormigón armado tiene un precio de 100€/m^3 y el HMAR puede llegar a alcanzar los 900€/m^3

2.1.4 Estética

Con este hormigón se obtienen elemento esbeltos y ligeros. Finalmente, estructuras más agradables a la vista que con hormigón convencional. Con estas cualidades y cierto gusto por parte del diseñador, se pueden conseguir soluciones que alejen a las estructuras de los tópicos de estructura pesadas y robustas que rodean a las estructuras de hormigón armado.

En este TFG la estética pasa a un segundo plano, puesto a que es un elemento que no va a estar expuesto a la vista de sus usuarios.



3. Datos de partida y normativa utilizada:

Debido a que el estudio es una comparación entre varias soluciones, es necesario que existan unos parámetros que equiparen la comparación. Por ello, en este punto, se van a plantear y desarrollar todos los datos comunes a todas las soluciones.

Complementariamente, se van a nombrar y justificar el uso de las normativas en cada uno de los puntos posteriores.

<u>3.</u>	<u>Datos de partida y normativa utilizada:</u>	14
<u>3.1</u>	<u>Condiciones e infraestructura:</u>	15
<u>3.2</u>	<u>Normativa utilizada:</u>	15
<u>3.3</u>	<u>Acciones a considerar</u>	16
<u>3.3.1</u>	<u>Acciones permanentes</u>	16
<u>3.3.2</u>	<u>Acciones variables</u>	16
<u>3.4</u>	<u>Clase de exposición:</u>	16
<u>3.5</u>	<u>Propiedades de los materiales:</u>	17
<u>3.5.1</u>	<u>Hormigón de muy alto rendimiento:</u>	17
<u>3.5.2</u>	<u>Hormigón convencional:</u>	17
<u>3.5.3</u>	<u>Armadura activa</u>	17

3. Datos de partida y normativa utilizada.

En este apartado, se van a fijar todos los aspectos comunes a todas las soluciones para el forjado, como puede ser, las condiciones geométricas y la infraestructura que va a soportar a los elementos, o las acciones a considerar. También se va a mencionar la normativa utilizada y la justificación de su uso. A parte, se van a describir las propiedades de los materiales.

3.1 Condiciones e infraestructura:

La infraestructura que soporta el forjado es común en todas las opciones, siendo una estructura del tipo aporticada con pilares HEB y vigas IPE. Las cimentaciones son zapatas aisladas.

La luz a salvar por el forjado va a depender principalmente del espaciado entre pilares de la nave. El espaciado de estos se ha supuesto que son 5m siendo este un valor bastante recurrente en naves prefabricadas. Para el ancho del forjado se ha optado por 6m. Este, no es el ancho crítico, puesto a que el forjado es del tipo unidireccional estando las vigas orientadas en la dirección opuesta. Si se desea más o menos ancho, lo único que hay que hacer es colocar más piezas, por ello, no es un dato que influya en el cálculo. A parte, la altura del forjado es de 4m.

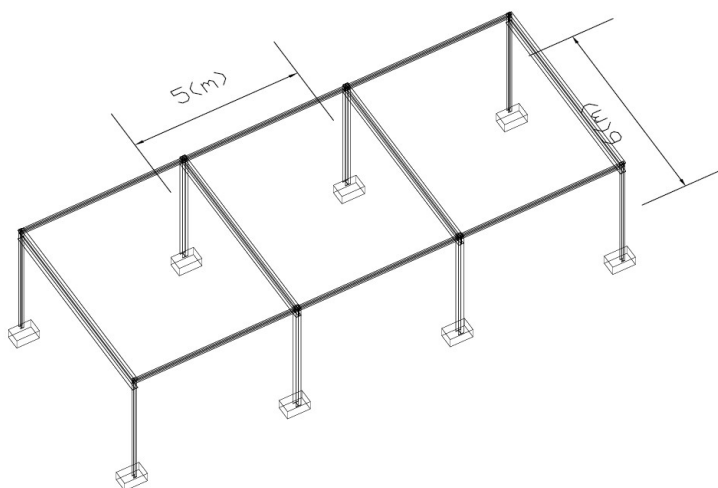


Ilustración 3: Vista en perspectiva de la estructura metálica del forjado. (Fuente: CypeCad)

El cálculo de la estructura metálica sobre la que apoya el forjado se incluye en el anejo de cálculo. El resultado son pilares HEB-180, las vigas sobre las que apoya el forjado son IPE-400, y las vigas en la dirección del forjado son IPE-140. El forjado es del tipo biapoyado.

3.2 Normativa utilizada:

En la actualidad, no existe una normativa vigente que regule el HMAR. Por ello, se han utilizado varias normativas y sobre todo unas recomendaciones de la Association Française de Génie Civile (AFGC-SETRA). Estas no son de obligado cumplimiento, pero, tienen una base de investigación detrás fiable. Estas recomendaciones basan su formulación en el Eurocódigo 2,

modificando solo los apartados que, debidos a la singularidad del material, varían el comportamiento de este y, por tanto, el modo de realizar las comprobaciones.

Para el resto de aspectos que no tienen que ver con el hormigón de muy alto rendimiento, como las comprobaciones de los forjados tradicionales, o la consideración de las acciones resistentes, se han utilizado las normativas vigentes en España (año 2017).

Las acciones, se han obtenido en función del Código Técnico de la Edificación (CTE-09) y el cálculo de los forjados convencionales se ha hecho de acuerdo a la instrucción Española de Hormigón Estructural (EHE-08).

Resumen de las normativas utilizadas:

- CTE-DB-SE-AE
- EHE-08
- AFGC-SETRA (*Recommendations Ultra High Performance Fibre-Reinforced Concret*)
- Eurocódigo 2.

3.3 Acciones a considerar

Como se trata de un forjado para una nave industrial, se va a utilizar el CTE (CTE09-DBSE-AE) para obtener las acciones que se deben tener en cuenta en el cálculo de la estructura.

3.3.1 Acciones permanentes

Como acciones permanentes se va a considerar el peso propio de la estructura, y el peso de las cargas muertas propias de los elementos necesarios para el uso correcto de las instalaciones que se van a disponer en las oficinas.

Dentro de estas cargas muertas, entra las cargas de la tabiquería y solera. El CTE en el apartado 2.1. Acciones en la edificación del DB-AE, dice “(...) *en general en viviendas bastará con considerar 1kN/m² por superficie construida*”³. Por ello, y teniendo en cuenta que la tabiquería que se va a colocar no es pesada, (se pretenden colocar mamparas de vidrio con pladur) se ha tomado el valor de 1kN/m² como valor para la tabiquería. A parte, también es necesario incluir el peso de la solera. Esta puede ser de varios materiales. El tipo de solera escogido es el de baldosa hidráulica o cerámica con 5mm de material de agarre. Siendo su peso de 0,8³ kN/m²

3.3.2 Acciones variables

El forjado que se pretende construir va a ser una zona de oficinas, quedando por debajo un almacén. Por ello, y tal y como indica la norma, las sobrecargas de uso a considerar son una carga repartida de 3 kN/m² y una carga concentrada de 2 kN. Estas dos fuerzas no actúan simultáneamente.

3.4 Clase de exposición:

La obra se sitúa en el polígono industrial de Puerto de Sagunto. Este se encuentra justo pegado al mar siendo la distancia menor de 5km en toda su superficie. Esto implicaría, según la EHE-08, que es una clase de exposición IIIa², corrosión por cloruros de forma aérea, pero al tratarse de un elemento situado en el interior de un edificio la normativa española dice que se considere como una clase de exposición I. Siendo que es una nave industrial, y que la zona de la que se trata tiene un grado alto de humedad por su proximidad al mar, se va a considerar que nos encontramos en una clase de exposición IIb.

Esta clase de exposición se va a utilizar para las soluciones tradicionales. En la solución con hormigón de muy alto rendimiento, se van a utilizar los criterios de las recomendaciones del

AFGC-SETRA, específicas del material que se pueden encontrar en el apartado de Requerimientos Geométricos por Durabilidad de este trabajo.

3.5 Propiedades de los materiales:

En este apartado se van a definir las propiedades mecánicas de los materiales, resistencias características, módulos de deformación.

3.5.1 Hormigón de muy alto rendimiento:

Tabla 1: Propiedades del hormigón de muy alto rendimiento

HMAR	f_{pk} (MPa)	150
	f_{cd} (MPa)	130
	f_{ctk} (MPa)	12
	f_{ctd} (MPa)	8
	γ (kN/m³)	25
	E (MPa)	50000

3.5.2 Hormigón convencional:

Tabla 2: Propiedades del hormigón convencional

Hc	f_{pk} (MPa)	30
	f_{pd} (MPa)	26,1
	γ (kN/m³)	25
	E (MPa)	28000

3.5.3 Armadura activa

Tabla 3: Propiedades de la armadura activa

Arm. Activa	f_{pk} (MPa)	1700
	f_{pd} (MPa)	1395
	E (MPa)	190000



4. Alternativa con soluciones “tradicionales”.

El objeto de este punto es hacer una breve selección entre las alternativas más comunes para resolver un forjado de una nave industrial intermedia, y calcular con el CYPE dos de ellas con tal de tener una referencia a la hora de evaluar el forjado de HMAR.

4. Alternativa con soluciones “tradicionales”	18
4.1 Introducción:	19
4.2 Solución con placas alveolares:	19
4.3 Solución con chapa colaborante:	20

4. Alternativas con soluciones “tradicionales”.

4.1 Introducción:

En este apartado del trabajo se van a resolver algunas de las soluciones más comunes para forjados de naves industriales. Entre ellas contamos con:

- Forjado de bovedillas aligeradas
- Losa de hormigón
- Losa aligerada con casetones
- Forjado de hormigón con chapa colaborante
- Forjado de viguetas de hormigón.

Algunas de estas tipologías en la actualidad no se utilizan para la construcción de forjados en naves industriales. Esto se debe a que la tendencia en este sector tiende a construir naves prefabricadas, siendo más eficiente utilizar elementos ya prefabricados que agilicen el proceso de construcción. Esto aboga a favor de los forjados de bovedillas pretensadas aligeradas porque el mismo proveedor que proporciona la estructura general puede proporcionar estos elementos sin la necesidad de otro suministrador de hormigón.

Los forjados convencionales que se han calculado para hacer el estudio son el de losas alveolares y el de chapa colaborante. El motivo por el que esto es así es que el forjado de losas alveolares, como se ha comentado en el párrafo anterior, es una solución bastante recurrente en este tipo de obras. A parte, se va a estudiar el forjado de chapa colaborante porque es, en parte, el impulsor del diseño del forjado de HMAR.

Para el cálculo de estos forjados se ha utilizado el CYPE con tal de obtener unos resultados fiables y simples, no olvidado que el trabajo consiste en el cálculo de un forjado de HMAR y de la comparación de este con soluciones tradicionales ya consolidadas.

A continuación, se van a exponer los datos de los forjados y el modo que tiene el programa para calcular los mismos según se expone en las memorias de cálculo de este.

4.2 Solución con placas alveolares:

Las placas alveolares son placas de hormigón pretensado con unos alveolos o aligeramientos. Su uso está muy extendido en la edificación. Una de sus principales propiedades es que son autoportantes, es decir, no necesitan sopandas durante la construcción del forjado.

El proceso de cálculo de las placas alveolares es bastante simple. Normalmente, los propios fabricantes de las placas proporcionan una autorización de uso de los distintos modelos que fabrican con la que se puede comprobar y dimensionar el forjado.

En nuestro caso, se ha seleccionado a la empresa HORTIVEN VALENCIA⁵ y los datos de la autorización de uso son los siguientes:

HORVITEN VALENCIA S.A. Canto total del forjado: 25 cm Espesor de la capa de compresión: 5 cm Ancho de la placa: 1200 mm Ancho mínimo de la placa: 300 mm Entrega mínima: 8 cm Entrega máxima: 20 cm Entrega lateral: 5 cm Hormigón de la placa: HA-45, Yc=1.35 (Pref.) Hormigón de la capa y juntas: HA-25, Yc=1.5 Acero de negativos: B 500 S, Ys=1.15 Peso propio: 4.17906 kN/m ² Volumen de hormigón: 0.05 m ³ /m ²

Ilustración 4: Ficha de características técnicas del forjado de placas aligeradas HORTIVEN: 20+5/150 AEH-500 (Fuente CYPE⁵)

Referencia	Flexión positiva							Cortante Último kN/m
	Momento		Rigidez		Momento de servicio Según la clase de exposición (1)			
	Último kN·m/m	Fisura	Total kN·m ² /m	Fisura	I	II	III	
P20*120-1	61.2	38.2	37179.9	37101.4	33.9	53.5	63.5	121.9
P20*120-2	73.3	38.2	37179.9	37248.6	42.2	61.9	72.0	121.9
P20*120-3	85.4	38.2	37179.9	37346.7	49.4	69.2	79.3	121.9
P20*120-4	95.1	38.2	37179.9	37454.6	56.9	76.9	87.1	121.9
P20*120-5	103.9	38.2	37179.9	37533.1	63.4	83.4	93.7	121.9
P20*120-6	112.0	38.2	37179.9	37591.9	69.3	89.3	99.6	121.9
P20*120-7	119.9	38.2	37179.9	37650.8	75.1	95.2	105.5	121.9
P20*120-8	126.4	38.2	37179.9	37690.0	79.8	99.9	110.2	121.9
P20*120-9	132.7	38.2	37179.9	37719.5	84.5	104.6	114.8	121.9
P20*120-10	140.7	38.2	37179.9	37817.6	91.5	111.8	122.2	121.9
P20*120-11	150.2	38.2	37179.9	37954.9	99.5	119.9	130.3	121.9
P20*120-12	159.6	38.2	37179.9	38092.2	107.3	127.8	138.2	121.9
P20*120-13	169.4	38.2	37179.9	38239.4	115.1	135.6	139.3	121.9
P20*120-14	178.4	38.2	37179.9	38396.3	123.2	138.8	138.8	121.9
P20*120-15	187.2	38.2	37179.9	38523.9	130.7	139.3	139.3	121.9
P20*120-16	195.6	38.2	37179.9	38680.8	137.5	139.9	139.9	121.9
P20*120-17	203.8	38.2	37179.9	38808.4	140.4	140.4	140.4	121.9

Ilustración 5: Esfuerzos por bandas de 1m de las placas aligeradas HORTIVEN: 20+5/150 AEH-500 (Fuente: CYPE⁵)

Ficha de características técnicas del forjado de placas aligeradas HORTIVEN: 20+5/150 AEH-500⁵

Según las comprobaciones efectuadas por el programa, la placa P20*120-1, cumple todas las sollicitaciones necesarias.

4.3 Solución con chapa colaborante:

Los forjados con chapa colaborante son aquellos que se componen de una losa y una chapa nervada que sirve de encofrado para la primera fase de construcción. Esta chapa en nuestro caso no va a ser únicamente un encofrado perdido, sino que el forjado se va a comportar como un elemento mixto.

En fase de construcción la chapa funciona como un encofrado. En fase de servicio, una vez el hormigón ha endurecido, la chapa actúa como si fuera una armadura a tracción resistiendo los momentos positivos. La chapa es capaz de transmitir tensiones rasantes en su interfaz con el hormigón siempre y cuando se disponga de un enlace mecánico proporcionado por deformaciones de la chapa (muescas y resaltos).

Las losas mixtas son aplicables a proyectos de estructuras de edificación en las que las cargas impuestas son predominantemente estáticas, el cual es nuestro caso. La chapa se apoya sobre vigas metálicas.

El proceso de cálculo y dimensionamiento se realiza en dos fases:

Fase de ejecución:

Con tal de calcular la resistencia de la chapa se tiene en cuenta el peso del hormigón, el de la chapa de acero, y las cargas de ejecución. Las cargas de ejecución representan el peso de los operarios y equipo de hormigonado y tienen en cuenta cualquier impacto o vibración que pueda ocurrir durante la ejecución de forjado.

Para el cálculo de la flecha no se tienen en cuenta las cargas de ejecución. Esto, se justifica teniendo en cuenta que la flecha que se produce por esta carga se va a recuperar al descargarse el elemento.

Se considera un coeficiente de empotramiento 0 entre los paños y las vigas perimetrales. Es decir, se tiene en cuenta que está simplemente apoyado.

En fase de servicio.

Se parte de la chapa calculada en la fase anterior y por defecto, el programa asigna un coeficiente de empotramiento 0. En nuestro caso, este coeficiente de empotramiento no se va a modificar. Dado a que el elemento con el que se quiere comparar también va a tener un coeficiente de empotramiento 0.

La resistencia de una losa mixta se puede considerar suficiente para soportar las cargas de cálculo y asegurar que no alcanza ningún estado límite de rotura cuando se comprueba lo siguiente.

Sección crítica I. Flexión: valor de cálculo del momento flector último en el centro de vano. Esta sección puede ser crítica si hay conexión total entre el hormigón y la chapa.

Sección crítica II. Esfuerzo rasante: la resistencia de la conexión es determinante impidiendo que se alcance el valor de cálculo del momento flector en la sección crítica I.

Sección crítica III. Cortante vertical y punzonamiento. Se alcanza el valor del cálculo del esfuerzo de cortante último junto al apoyo.

El valor de cálculo del momento flector resistente de cualquier sección se determina por la teoría del momento resistente plástico de una sección con conexión completa.

En el caso de la losa mixta que hemos introducido. El programa, nos indica que es necesario que coloquemos sopandas no separadas más de 2,55 m durante la fase de ejecución. Esto supone un incremento del precio en comparación a las otras dos alternativas. A parte. Dificulta el resto de trabajos de la obra.

Se van a colocar cuatro sopandas por paño a 2 m de cada una de las esquinas.



5. Solución con Hormigón de Muy Alto Rendimiento (HMAR).

El grueso del trabajo erradica en este punto. Se van a plantear algunas propuestas de geometría y posteriormente se va a calcular la que parece más apropiada, comprobando los estados límite de servicio y los estados límite últimos de esta.

<u>5.</u>	<u>Solución con Hormigón de Muy Alto Rendimiento (HMAR).</u>	22
<u>5.1</u>	<u>Introducción:</u>	23
<u>5.2</u>	<u>Estudio de soluciones geométricas:</u>	23
<u>5.3</u>	<u>Fases constructivas del forjado y consideraciones:</u>	24
<u>5.4</u>	<u>Geometría:</u>	25
<u>5.4.1</u>	<u>Requerimientos Geométricos por Durabilidad:</u>	25
<u>5.4.1.1</u>	<u>Clase de Exposición:</u>	25
<u>5.4.1.2</u>	<u>Recubrimiento mínimo:</u>	26
<u>5.4.1.3</u>	<u>Recubrimiento nominal:</u>	26
<u>5.4.2</u>	<u>Propiedades geométricas:</u>	27
<u>5.4.2.1</u>	<u>Sección mixta hormigón de muy alto rendimiento y hormigón convencional:</u>	27
<u>5.5</u>	<u>Estado límite de Servicio.</u>	28
<u>5.5.1</u>	<u>Pérdidas de pretensado</u>	28
<u>5.5.1.1</u>	<u>Pérdidas iniciales del pretensado:</u>	28
<u>5.5.1.2</u>	<u>Pérdidas diferidas del pretensado</u>	28
<u>5.5.2</u>	<u>Limitación tensional, control de fisuración:</u>	29
<u>5.5.2.1</u>	<u>Cálculo de tensiones:</u>	30
<u>5.5.3</u>	<u>Flecha.</u>	32
<u>5.5.3.1</u>	<u>Cálculo de flecha:</u>	32
<u>5.6</u>	<u>Estado Límite último</u>	33
<u>5.6.1</u>	<u>ELU Tensiones normales.</u>	34
<u>5.6.1.1</u>	<u>Armadura de la losa de compresión.</u>	35
<u>5.6.2</u>	<u>ELU Tensiones tangenciales.</u>	35
<u>5.6.2.1</u>	<u>ELU Tensiones tangenciales: Cortante.</u>	35

5. Alternativa con Hormigón de muy alto rendimiento.

5.1 Introducción:

La solución con hormigón de muy alto rendimiento es la que se va a estudiar con mayor detenimiento. En esta, se va a tratar de aprovechar algunas de las cualidades de este material, ya mencionadas en el apartado "2. Estado del Arte", para optimizar al elemento. Unos ejemplos de estas cualidades puede ser la resistencia a tracción del material que puede llegar a los 13 MPa (8 MPa como valor de cálculo). Con ello, se puede reducir la cantidad de pretensado necesaria y abaratar el coste. A parte, debido a las mejores características de este material con respecto a l hormigón convencional, se pretende que el elemento resultante de este estudio sea más esbelto y menos pesado que uno homólogo de hormigón convencional.

Como recordatorio del punto de normativa utilizada, me gustaría puntualizar que en la actualidad no existe normativa española vigente. Por ello, se van a utilizar unas recomendaciones publicadas por la Association Française de Génie Civil (AFGC) en el 2013.

5.2 Estudio de soluciones geométricas:

En este punto del trabajo, con tal de conseguir que la solución con HMAR sea lo más óptima posible es necesario hacer un buen estudio de la geometría que se quiere adoptar. Por otro lado, se va a dar una justificación de la geometría que se va a utilizar.

Como base se tomaron como ejemplo algunas soluciones ya consolidadas sustituyendo alguna de sus partes por hormigón de muy alto rendimiento. Algunos ejemplos de estas son los forjados de viguetas, los forjados de losas alveolares y los forjados con chapa colaborante.

En un principio, y motivado porque en otras actuaciones realizadas se ha buscado sustituir elementos de acero por elementos de hormigón de muy alto rendimiento, (Celosías, etc.) se pensó que podría ser una buena idea sustituir la chapa de acero de los forjados mixtos por una placa de hormigón de muy alta resistencia, pero la unión entre la chapa y la losa de hormigón requería de un estudio demasiado extenso.

Otra de las opciones fue hacer una losa alveolar de hormigón de muy alto rendimiento, pero la complejidad de adaptar el método constructivo de las losas alveolares y que parece que las mejores prestaciones de este hormigón se adaptan mejor a elementos más esbeltos se desechó la idea.

Por último, se analizó hacer un forjado de viguetas pretensadas de hormigón de muy alto rendimiento. Esta opción parece que es la que mejor se adapta a las características del material.

A la hora de diseñar la geometría se impuso en un primer dimensionamiento que el canto de la sección total del forjado no superara los 20cm. (15+5). Aparte, también se dotó a la sección de un sobrecanto para poder colocar varias armaduras activas respetando los recubrimientos y se escogió un ancho de alma que permitiera incluir barras, respetando los recubrimientos, en caso de que fuera necesario un refuerzo para resistir el cortante.

El resultado final es el siguiente:

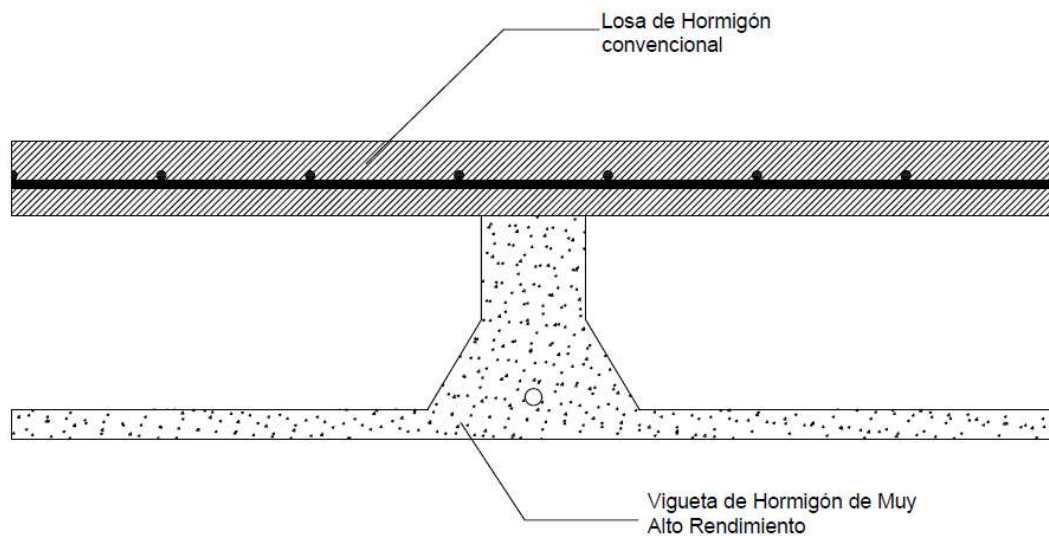


Ilustración 6: Imagen de la geometría adoptada para la alternativa con hormigón de muy alto rendimiento

5.3 Fases constructivas del forjado y consideraciones:

Con tal de tener un conocimiento fiel del comportamiento del forjado durante su vida útil es necesario hacer un estudio de este en todas y cada una de las fases por las que va a atravesar, desde que se hormigona, hasta que acaba su vida útil, pasando por la fase de tesado y la puesta en servicio.

El forjado, como ya se ha explicado, es una sección con dos hormigones diferentes. A parte, estos no entran a trabajar al mismo tiempo. A continuación, se van a explicar las fases constructivas del forjado y las consideraciones que se han tenido en cada una de ellas.

• Hormigonado de la parte de HMAR y tesado:

En esta primera fase las únicas acciones que debe soportar la pieza es el peso propio del hormigón de muy alto rendimiento y el pretensado característico inicial.

Para reducir la cantidad de pérdidas iniciales, se va a retesar el cable antes de cortarlo. Con esto, se consiguen eliminar las pérdidas por relajación del acero y las pérdidas por penetración de cuñas. Siendo las únicas pérdidas iniciales que hay que considerar las de acortamiento elástico del hormigón en el momento de la transmisión de esfuerzos.

• Almacenamiento en un parque de vigas de la fábrica prefabricadora:

Tras el tesado de las piezas, se prevé que se van a acopiar en la fábrica prefabricadora. Por ello, se hace necesario tener en cuenta las pérdidas diferidas que se van a dar en este punto. Como se indica en el anejo de cálculo, las pérdidas diferidas que se producen en los primeros 28/30 días son aproximadamente la mitad de las totales.

En esta fase, hay que tener especial cuidado en colocar los apoyos sobre los que se van a acopiar las piezas a una distancia similar o igual a los que van a ser los apoyos definitivos. Con ello, se evita introducir tensiones no deseadas manteniendo el esquema estructural para el cual está pensada la pieza.

- **Transporte, puesta en obra y construcción de la losa de compresión:**

Al igual que en la fase constructiva anterior, se debe mantener el esquema estructural biapoyado en esta fase tanto en las nuevas operaciones de izado como en el transporte en camión a la obra del elemento.

Una vez colocado el elemento en su sitio, se procede al hormigonado de la losa de compresión. En este punto, la sección resistente sigue siendo la de HMAR debido a que el hormigón de la losa está fresco y la única forma de la que influye es añadiendo una carga permanente igual al peso propio de la losa de compresión.

- **Endurecimiento de la losa de compresión y puesta en servicio del forjado.**

Una vez el hormigón de la losa se endurece, pasa a formar parte de la sección resistente del forjado. Pero el hecho de que la viga ya está deformada hace que el origen de deformación de la viga y del hormigón de la losa no sea el mismo. Este es un aspecto relevante a la hora de calcular las tensiones como veremos posteriormente.

Por último, se construye la solera y la tabiquería, y se pone en servicio el forjado. Siendo de aquí en adelante la sección resistente viga más losa de compresión.

5.4 Geometría:

En este apartado, se van a estudiar los requerimientos geométricos del elemento, según los requerimientos de durabilidad de las recomendaciones del AFGC-SETRA (2.3. *Requerimientos de Durabilidad*¹) y se van a obtener las propiedades geométricas de las secciones en todas las fases constructivas.

5.4.1 Requerimientos Geométricos por Durabilidad:

Los elementos de hormigón suelen trabajar en conjunto con barras y cables de acero. Normalmente, las tracciones las suelen resistir estos últimos, a parte, también son necesarios para controlar la fisuración que sufre el hormigón durante el proceso de secado.

Para evitar que estas partes metálicas pierdan propiedades mecánicas debido a procesos de oxidación, se aprovecha el carácter básico del hormigón (pH 12/13) que ejerce de capa protectora. Con tal de que esta protección esté asegurada, se controla el recubrimiento de hormigón que envuelve a las armaduras en función de las condiciones ambientales a las que va a estar expuesto el material.

5.4.1.1 Clase de Exposición:

El recubrimiento depende de las condiciones ambientales o la clase de exposición del elemento. La clase de exposición, según el Eurocódigo 2, "(...) son las condiciones químicas y físicas a las que está expuesta la estructura en adición a las acciones mecánicas"⁴

En nuestro caso, nos encontramos en el polígono industrial del Puerto de Sagunto, que está próximo al mar, en el interior de una nave industrial. Por ello y según las recomendaciones de la AFGC-SETRA¹, la clase de exposición a considerar es la XC3.



Ilustración 7: Vista aérea de Puerto de Sagunto. (Fuente: Google Earth)

5.4.1.2 Recubrimiento mínimo:

El recubrimiento mínimo es la distancia mínima que hay que dejar entre la superficie de armadura más próxima a la superficie de hormigón y esta última. Para determinar esta distancia se van a utilizar las recomendaciones de AFGC apartado 4.4.1.2 Recubrimiento mínimo

Según indican las recomendaciones de la AFGC-SETRA¹, el recubrimiento mínimo depende de diversos factores.

- Recubrimiento debido a las condiciones de colocación del hormigón
- Recubrimiento debido a la correcta transmisión de esfuerzos entre el hormigón y el acero.
- Recubrimiento debido a las condiciones ambientales.
- 10mm

En este caso el más limitante de los tres es el debido a la correcta transmisión de esfuerzos entre el acero y el hormigón.

$$c_{\min} = \max ((20+0-0-0) \text{ mm}; 22.4 \text{ mm}; 19.5 \text{ mm}; 10\text{mm}).$$

El recubrimiento mínimo es de 22,4 mm.

5.4.1.3 Recubrimiento nominal:

El recubrimiento nominal es aquel que se refleja en los planos, y se obtiene añadiendo al recubrimiento mínimo un incremento debido a las tolerancias que se prevén en la fase de diseño.

Según el apartado “4.4.1.3. Margen en el Diseño por las Tolerancias” de las recomendaciones del AFGC, en elementos prefabricados este incremento se puede considerar nulo. Por tanto, la parte de HMAR no tiene un incremento en el recubrimiento.

Como se supone que la capa de compresión se va a hormigonar una vez colocado el elemento en obra, es decir, no es un elemento prefabricado, para la armadura de esta el recubrimiento será diferente, y se verá incrementado en 5mm por el margen en el diseño que tiene en cuenta las tolerancias.

Resumiendo:

- Recubrimiento del HMAR: 22.4mm

- Recubrimiento del Hc: 27,4mm

5.4.2 Propiedades geométricas:

En este apartado se van a exponer las propiedades geométricas de la sección. Sección solo con HMAR (fases constructivas 1, 2 y 3):

Las propiedades de esta sección se van a hacer con respecto a la sección bruta. Esta decisión se ha tomado porque una de las condiciones, como veremos más adelante, es que la sección no fisure, y por tanto no es necesario calcular las propiedades de la sección fisurada. Si se hicieran con respecto a la sección homogeneizada, el pretensado, debido a las mejores características del acero con respecto al hormigón, mejoraría las propiedades geométricas. Teniendo en cuenta que el área del pretensado es casi despreciable, según criterios geométricos, en comparación al área de hormigón no van a variar mucho los resultados entre sección bruta y homogeneizada. En todo caso, nos deja del lado de la seguridad.

Tabla 4: Propiedades geométricas de la sección de HMAR

A, hmar (m ²)	0,02136
A, hc (m ²)	0
A, resist (m ²)	0,02136
h (m)	0,150
CDG (m)	0,031292
v1 (m)	0,119
v2 (m)	-0,031
I (m ⁴)	3,0164E-05
S (m ³)	-

5.4.2.1 Sección mixta hormigón de muy alto rendimiento y hormigón convencional:

Una vez el hormigón convencional de la losa endurece, ya no es posible utilizar la sección bruta. El motivo es evidente, la sección está formada por varios materiales con propiedades distintas con lo que es necesario homogeneizar las propiedades de la sección.

El hormigón de la losa de compresión tiene un área no despreciable con respecto al hormigón de muy alto rendimiento. En este caso, ya que se tiene que obtener de todas formas el área homogeneizada si que se va a tener en cuenta el pretensado. El área de las armaduras de refuerzo de la losa no se va a considerar. El motivo es que la justificación de la inclusión estas no es por razones resistentes, sino por la necesidad de controlar la fisuración debida a la retracción y a la fluencia del hormigón de la losa. En todo caso, al igual que el pretensado en el apartado anterior, nos deja del lado de la seguridad sin modificar en exceso las propiedades geométricas de la sección.

Como a la hora de calcular las tensiones no se va a utilizar la fórmula simplificada de Navier-Bernoulli, la inercia y el momento estático se van a obtener con respecto a h/2..

Tabla 5: Propiedades geométricas de la sección mixta HMAR y hormigón convencional

A, hmar (m²)	0,021360	S (m³)	-4,4494E-04
A, hc (m²)	0,014000	d	0,1720
A, resist (m²)	0,03574	v1' (m)	0,1
h (m)	0,200	v2' (m)	0,05
CDG (m)	0,087551	v1 (m)	0,05
h/2	0,100	v2 (m)	-0,1
I (m⁴)	2,1463E-04		

En esta sección v1' y v2' hacen referencia a la fibra superior e inferior de la losa respectivamente.

5.5 Estado límite de Servicio.

Al tratarse de un elemento pretensado, se van a estudiar primero los estados límite de servicio. Esto se justifica con que el pretensado se debe diseñar con limitaciones tensionales en servicio. Primero se van a calcular las pérdidas de pretensado a lo largo de toda la vida útil del elemento para poder así, comprobar si cumple los límites tensionales. Por último, se va a estudiar si el elemento cumple o no las condiciones de flecha impuestas por el código técnico de la edificación.

5.5.1 Pérdidas de pretensado

La fuerza de pretensado es una acción permanente de valor no constante, esto se debe a que, a lo largo del tiempo, el valor del pretensado varía reduciéndose su fuerza. Existen dos tipos de pérdidas, las iniciales y las diferidas.

5.5.1.1 Pérdidas iniciales del pretensado:

Las pérdidas iniciales son aquellas que se producen entre el momento de tesado y el de la transmisión del pretensado.

En este caso, debido a que se va a retesar el cable antes de realizar la transmisión las únicas pérdidas iniciales que hay que tener en cuenta son las de acortamiento elástico del hormigón.

El acortamiento elástico del hormigón se produce al transmitir la fuerza de pretensado provocando acortamiento del hormigón. Al estar este solidariamente unido a la armadura activa la deformación también se produce en esta, provocando una reducción de la tensión en la armadura y unas pérdidas en el pretensado.

Tras varias iteraciones, se ha llegado a la conclusión de que las pérdidas iniciales debidas al acortamiento elástico del hormigón son del 1,67% de la fuerza de tesado.

5.5.1.2 Pérdidas diferidas del pretensado

Las pérdidas diferidas, sobre todo, están causadas por la retracción y la fluencia del pretensado y se dan a partir del momento en que se pone en servicio la viga. Estas se van a estudiar en dos momentos de la vida útil. Cuando la viga está almacenada en el parque de vigas

de la planta prefabricadora y desde que se pone en servicio hasta el final de la vida útil del elemento.

Como, se ha comentado en las fases constructivas, las vigas van a estar 30 días almacenadas antes de su transporte a obra. En este tiempo, se produce aproximadamente la mitad de la retracción. Esto lo del podemos extraer de la figura 1.6; *Ejemplo de retracción de un elemento de HMAR con y sin tratamiento térmico* de las recomendaciones AFGC-SETRA¹. El resto de las pérdidas diferidas se van a producir una vez la sección ya se haya puesto en servicio..

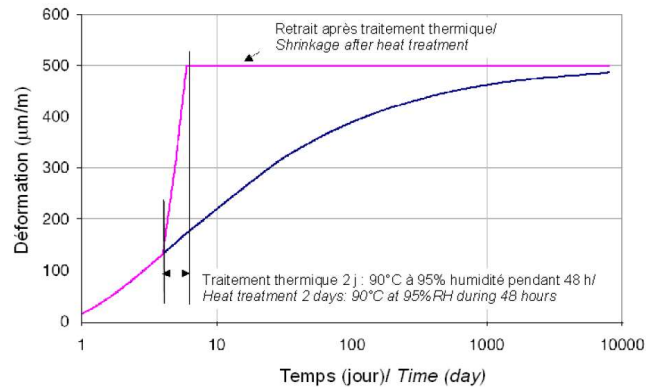


Ilustración 8: Ejemplo de retracción de un elemento de HMAR con y sin tratamiento térmico (Fuente: Recomendaciones del AFGC-SETRA 2013¹)

Las pérdidas diferidas, que se producen el parque de vigas son de 7,83kN tal y como se ha obtenido en la memoria de cálculo.

Las pérdidas diferidas, que se producen una vez el forjado ya se ha puesto en servicio son de 7,45 kN.

Pese a que se ha considerado que la mitad de la retracción se produce en el parque de vigas y la otra mitad cuando el elemento está en servicio, las pérdidas en uno y otro caso son diferentes. Esto se debe a que en el primer caso la sección era únicamente de hormigón de muy alto rendimiento y en el segundo la losa ya ha entrado en carga.

5.5.2 Limitación tensional, control de fisuración:

Una de las funciones principales del pretensado es la del control de la fisuración, con ello, se pretende que los elementos estén menos expuestos al ambiente favoreciendo a la durabilidad de estos.

Al tratarse de un elemento en una clase de exposición XC3, según las recomendaciones del AFGC-SETRA¹, tabla 7.1. la limitación de abertura de fisura es de 0,1mm como máximo. Pero añade un comentario que explica que esta abertura confía en la capacidad de curar las fisuras protegiendo a las fibras. Añade que, si el elemento está sujeto a cargas variables considerables, no se debe permitir la fisuración. Por ello, se va a analizar el forjado buscando un estado no fisurado.

Para que esto sea así se debe cumplir que la fibra más solicitada a tracción no alcance la resistencia característica a tracción para la combinación de acciones frecuente. A su vez se debe controlar que la fibra más comprimida no alcance $0,6 \cdot f_{ck}$ para la combinación de acciones más desfavorable.

Con estas condiciones, se tiene que los límites tensionales para los dos hormigones son:

Tabla 6: Limitación de tensiones en servicio

Mat	Tracción	Compresión
HMAR	-8	78
Hc	0	15

5.5.2.1 Cálculo de tensiones:

En este punto, se va a obtener la evolución de las tensiones en función de cada una de las fases constructivas detallando las tensiones máximas para la combinación de acciones poco probable y las mínimas para la combinación de acciones frecuente. También se van a anotar los esfuerzos que las provocan y en que sección se producen.

En el anejo de cálculo se puede consultar el estudio de los esfuerzos y las tensiones a lo largo de todo el elemento, así como el método que se ha seguido para obtenerlas.

• Fase constructiva 1: Hormigonado de la parte de HMAR y tesado.

Esta es la primera fase del elemento, el momento de tesado de la viga y corte de los cables de pretensado. Únicamente actúan como acciones el pretensado y el peso propio de la parte de HMAR. Es necesario tener en cuenta que el pretensado que actúa no es la fuerza de tesado, sino, el pretensado característico inicial. Esto es, la fuerza de tesado menos las pérdidas iniciales por acortamiento elástico del hormigón.

Las tensiones máximas y mínimas son:

COMP. TENSIONES		
$\sigma_{Max(PP)}$	6,343	CUMPLE
$\sigma_{Min(F)}$	0,821	CUMPLE

Estas tensiones se dan en la sección del centro de vano en la fibra superior para el momento máximo y el axil máximo ($\sigma_{Max(PP)}$) y en la sección de apoyos en la fibra superior y para la combinación de momento mínimo y axil mínimo ($\sigma_{Min(F)}$). Los esfuerzos que las provocan son:

ESFUERZOS		
	M_{Ed}	N_{Ed}
$\sigma_{Max(PP)}$	0,85 kNm	108 kN
$\sigma_{Min(F)}$	-1,25 kNm	97,73 kN

• Fase constructiva 2: Almacenamiento en un parque de vigas de la fábrica prefabricadora.

En esta segunda fase, simplemente se van a acopiar las vigas sobre apoyos de maderas en un parque de vigas, la única acción que actúa son las pérdidas diferidas de pretensado. Ya calculadas previamente.

Las tensiones máximas y mínimas son:

COMP. TENSIONES		
$\sigma_{Max(PP)}$	6,227	CUMPLE
$\sigma_{Min(F)}$	0,759	CUMPLE

Estas tensiones se dan en la sección del centro de vano en la fibra superior para el momento máximo y el axil máximo ($\sigma_{Max(PP)}$) y en la sección de apoyos en la fibra superior y para la combinación de momento mínimo y axil mínimo ($\sigma_{Min(F)}$). Los esfuerzos que las provocan son:

ESFUERZOS		
	M_{Ed}	N_{Ed}
$\sigma_{Max(PP)}$	0,85 kNm	108 kN
$\sigma_{Min(F)}$	-1,25 kNm	97,73 kN

• Fase constructiva 3: Transporte, puesta en obra y construcción de la losa de compresión:

Durante el transporte las tensiones tampoco van a variar, en esta fase la única acción que provoca una variación de tensiones es la construcción de la losa de hormigón

La sección resistente sigue siendo la misma, puesto a que la losa aún no ha endurecido ni entrado en carga.

Las tensiones máximas y mínimas son las siguientes:

COMP. TENSIONES		
$\sigma_{Max(PP)}$	11,957	CUMPLE
$\sigma_{Min(F)}$	0,08	CUMPLE

Estas tensiones se dan en la sección del centro de vano en la fibra superior para el momento máximo y el axil máximo ($\sigma_{Max(PP)}$) y en la fibra superior de centro de vano y para la combinación de momento mínimo y axil mínimo ($\sigma_{Min(F)}$) en la fibra inferior de la sección de centro de vano. Los esfuerzos que las provocan son:

ESFUERZOS		
	ΔM_{Ed}	ΔN_{Ed}
$\sigma_{Max(PP)}$	2,34 kNm	0 kN
$\sigma_{Min(F)}$	2,34 kNm	0 kN

• Fase constructiva 4: Endurecimiento de la losa de compresión y puesta en servicio del forjado.

En esta fase constructiva, la sección resistente ha cambiado, entrando en carga la losa de hormigón convencional. Por ello, no es posible utilizar la simplificación de Navier.

COMP. TENSIONES (HMAR)		
$\sigma_{Max(PP)}$	16,395	CUMPLE
$\sigma_{Min(F)}$	- 3,578	CUMPLE

COMP. TENSIONES (Hc)		
$\sigma_{Max(PP)}$	2,362	CUMPLE
$\sigma_{Min(F)}$	-	CUMPLE

Es necesario realizar la comprobación de tensiones tanto en el hormigón convencional como en el HMAR

Las tensiones del HMAR se dan en la sección del centro de vano en la fibra superior para el momento máximo y el axil máximo ($\sigma_{Max(PP)}$) y en la fibra superior de centro de vano y para la

combinación de momento mínimo y axil mínimo ($\sigma_{Min(F)}$) en la fibra inferior de la sección de cetro de vano.

Las tensiones del hormigón convencional se dan en la sección del centro de vano en la fibra superior de la losa para el momento máximo y el axil máximo ($\sigma_{Max(PP)}$) y en la sección de apoyos en la que el incremento de esfuerzos es nulo ($\sigma_{Min(F)}$) por lo que la variación de las tensiones en el hormigón convencional también.

• Fase constructiva 5: hasta el final de la vida útil del elemento:

Desde la puesta en servicio, hasta el fin de la vida útil del elemento, el único cambio que es necesario comprobar son las pérdidas diferidas. También calculadas previamente y cuyo valor es 7,45 kN

Volviendo a calcular las tensiones:

COMP. TENSIONES (HMAR)		
$\sigma_{Max(PP)}$	16,335	CUMPLE
$\sigma_{Min(F)}$	- 3,926	CUMPLE

COMP. TENSIONES (Hc)		
$\sigma_{Max(PP)}$	2,389	CUMPLE
$\sigma_{Min(F)}$	- 0,034	NO CUMPLE

Las tensiones del HMAR se dan en la sección del centro de vano en la fibra superior para el momento máximo y el axil máximo ($\sigma_{Max(PP)}$) y en la fibra superior de centro de vano y para la combinación de momento mínimo y axil mínimo ($\sigma_{Min(F)}$) en la fibra inferior de la sección de cetro de vano.

Las tensiones del hormigón convencional se dan en la sección del centro de vano en la fibra superior de la losa para el momento máximo y el axil máximo ($\sigma_{Max(PP)}$) y en la sección de apoyos ($\sigma_{Min(F)}$).

Las tensiones mínimas en el hormigón convencional salen inferiores a 0 debido a que las pérdidas de pretensado se han considerado como si fuera una fuerza de tracción. Por ello, en las zonas de los apoyos en las que el momento de las fuerzas gravitacionales es nulo, traccionan al elemento. Se va a considerar que el efecto de estas tracciones no es considerable puesto a que aún hay un margen bastante considerable hasta que se alcance la resistencia a tracción del hormigón convencional.

Una posible solución si se quisieran evitar esto, sería añadir unos manguitos que envuelvan la armadura activa para así limitar las zonas en las que esta se ancla. Con ello, se podría empezar a transmitir la fuerza a partir de un punto en el que estas tracciones se hagan nulas.

Tras comprobar todas las fases constructivas a lo largo de toda la vida útil del elemento, nos aseguramos de que este, se mantenga en unos niveles tensionales admisibles en servicio.

5.5.3 Flecha.

El estado límite de flecha es relevante ya no solo desde el punto de vista funcional del elemento. También tiene en cuenta la apariencia de la obra para los usuarios de la misma.

Para evaluar el elemento, como se trata de un edificio, se van a considerar la máxima admisible por el CTE-09³.

5.5.3.1 Cálculo de flecha:

El cálculo de la flecha del elemento se ha realizado para cada una de las acciones. Posteriormente, se ha obtenido la flecha diferida debida a la retracción y a la fluencia.

La flecha por retracción se ha obtenido modificando el módulo de elasticidad del hormigón, y la flecha por fluencia se ha sacado calculando la curvatura que se produce.

En la siguiente tabla se puede ver la flecha para cada una de las acciones.

Tabla 7: Resumen de flechas para cada una de las acciones

Acción	Y (m)
PP _{HMAR}	0,00364
P	-0,00145
PP _{LOSA}	0,00432
CM	0,00106
SU	0,00177
Fluencia	0,00210
Retracción	0,00517

El código técnico de la edificación especifica que para que se considere la integridad de elementos constructivos, se debe considerar una limitación de flecha relativa de 1/400 en pisos con tabiquería normal y suelo convencional con juntas.

Para considerar la integridad de la tabiquería y el suelo, se comprueba que la flecha posterior a la construcción de estas no supera $l/400^3$. Esta es la de retracción, fluencia y sobrecarga de uso.

$$L/400=0,0125 \text{ m}$$

La flecha posterior a la construcción de la solera y la tabiquería tiene un valor de:

$$y=0,00517+0,0021+0,00177= 0,00904 \text{ m} < 0,0125 \text{ m}$$

En el CTE-09 también se especifica que la flecha total no puede superar $L/300$ cuando se considere la apariencia de la obra. $L/300= 0,016\text{m}$

$$y_t = y_{0,g+q} - y_{0,g} + y_{\phi,g} + y_{cs}$$

$$Y_t= 0,00934-0,00785+0,00210+0,00517=0,00876 \text{ m} < 0,016\text{m}$$

Con estas comprobaciones nos aseguramos de que el elemento cumple los criterios de flecha exigidos por el CTE-09. No comprometiendo la integridad de los elementos frágiles que lo conforman y dentro de los estándares de apariencia admitidos por los usuarios.

5.6 Estado Límite último

Los estados límite último comprueban que el elemento no va a sufrir ninguna acción que provoque el fallo o rotura del mismo.

Tratándose de un forjado unidireccional, se va a estudiar el estado límite último para tensiones normales y tensiones tangenciales. En este último caso no se va a contemplar el torsor o el punzonamiento.

Esto se debe, a que el apoyo no va a realizarse sobre un pilar, si no que se va a dejar caer sobre las vigas que forman la infraestructura. Por ello, la comprobación a punzonamiento no tiene demasiado sentido, ya que la fuerza del apoyo no va a estar localizada en un punto concreto.

La comprobación por tensiones tangenciales debidas a un momento torsor tampoco son del ámbito de estudio de este trabajo puesto a que se va a despreciar su efecto. Al tratarse de

HIPÓTESIS INICIALES:

- El bloque de compresión no abandona la losa.
- La armadura activa trabaja plastificada.

Con la ecuación de equilibrio de axiles se ha obtenido la profundidad de la fibra neutra.

Profundidad fibra neutra	
X	0,016 m

Una vez se obtiene la x se pueden comprobar, las hipótesis. teniendo en cuenta que $h_{losa}=0.5m$, se puede asegurar que el bloque de compresión se mantiene en la losa.

A parte, se ha obtenido la $x_{AB'}=0,04m$, siendo superior a x del equilibrio. Con esto, podemos asegurar que la sección de rotura en la que nos encontramos está pivotando en A, fallo dúctil por rotura de la armadura activa, una vez ha plastificado.

Una vez comprobadas las hipótesis, se puede pasar a comprobar el momento último de la sección, para ello, se van a tomar momentos a la altura de la armadura activa realizando el equilibrio de momentos a la altura de la armadura activa.

MOMENTO ÚLTIMO (Mrd)	
22,87	kNm

Realizando la combinación de acciones más desfavorable para ELU, se ha obtenido un momento de cálculo $M_d=12,24$ kNm.

Como podemos observar, cumple con creces. La resistencia a flexión.

5.6.1.1 Armadura de la losa de compresión.

La armadura que se va a colocar en la losa de compresión es la necesaria por mínimos geométricos. Esta debe tener una cuantía mayor del 1.8‰ en la dirección transversal al forjado. En la dirección del forjado, se ha considerado que el elemento es tipo viga, y según EHE-08² el mínimo geométrico es del 2.8‰ para la cara de tracción y un 30% de ese valor para la capa de compresión.

La armadura resultante es de 3 ϕ 6 separados 30 cm en las dos direcciones.

5.6.2 ELU Tensiones tangenciales.

Como ya se ha comentado, únicamente se van realizar la comprobacion de cortante.

5.6.2.1 ELU Tensiones tangenciales: Cortante.

Al igual que en hormigón convencional, el cortante, se resiste mediante bielas y tirantes. Por ello, en las recomendaciones del AFGC-SETRA¹, divide la resistencia a cortante del elemento entre tres valores. Resistencia de las bielas comprimidas y resistencia de los montantes traccionados (Vrd).

Obteniendo el cortante de cálculo tal y como se indica en las recomendaciones de la AFGC-SETRA, el cortante resistente es de 23,7kN

Para comprobar las bielas comprimidas, también se han seguido las recomendaciones de la AFGC-SETRA¹. Obteniendo un valor de 278kN

Con estos dos valores se puede afirmar, que la pieza cumple el estado límite último de cortante.



6. Valoración económica.

En este apartado, se va a realizar la valoración económica de los forjados a fin de poder realizar una comparativa más adelante de este trabajo. En el mundo de la ingeniería civil, muy a menudo, la solución adoptada es la que más se ajusta a las necesidades económicas del promotor, no siendo siempre la mejor opción a largo plazo.

<u>6.</u>	<u>Valoración económica.</u>	36
<u>6.1</u>	<u>Unidades de Obra:</u>	37
<u>6.1.1</u>	<u>Alternativa con HMAR:</u>	37
<u>6.1.2</u>	<u>Alternativa con losas alveolares:</u>	37
<u>6.1.3</u>	<u>Alternativa con chapa colaborante:</u>	38
<u>6.2</u>	<u>Precios unitarios</u>	38
<u>6.2.1</u>	<u>Alternativa con hormigón de muy alto rendimiento:</u>	39
<u>6.2.2</u>	<u>Alternativa con losas alveolares.</u>	40
<u>6.2.3</u>	<u>Alternativa con chapa colaborante.</u>	42
<u>6.3</u>	<u>Mediciones:</u>	43
<u>6.3.1</u>	<u>Alternativa con hormigón de muy alto rendimiento.</u>	43
<u>6.3.2</u>	<u>Alternativa con losas alveolares</u>	44
<u>6.3.3</u>	<u>Alternativa con chapa colaborante</u>	44
<u>6.4</u>	<u>Valoración económica.</u>	45
<u>6.4.1</u>	<u>Alternativa con hormigón de muy alto rendimiento.</u>	45
<u>6.4.2</u>	<u>Alternativa con losas alveolares</u>	45
<u>6.4.3</u>	<u>Alternativa con chapa colaborante</u>	45

6. Valoración económica

6.1 Unidades de Obra:

Para realizar la valoración económica de todas las alternativas, se van a evaluar cada una de ellas según las unidades de obra que las componen. Con esto, tendremos una noción del precio de cada una de las soluciones.

Debido a la similitud entre las alternativas, las tres primeras unidades de obra van a ser comunes, correspondiendo a la estructura metálica que sustenta el forjado. La única unidad de obra diferente va a ser el m² de forjado.

6.1.1 Alternativa con HMAR:

U.O.1. kg DE ACERO ESTRUCTURAL LAMINADO CON SECCIÓN HEB-180

kg de acero estructural laminado con sección HEB-180 para los pilares del forjado. Incluso mano de obra y medios auxiliares. Totalmente terminado e instalado.

U.O.2. kg DE ACERO ESTRUCTURAL LAMINADO CON SECCIÓN IPE-400

Kg de acero estructural de perfil laminado con sección IPE-400 para las vigas perpendiculares a los forjados que unen los pilares (1-2; 3-4; 5-6). Incluso mano de obra y medios auxiliares. Totalmente terminado e instalado.

U.O.3. kg DE ACERO ESTRUCTURAL LAMINADO CON SECCIÓN IPE-140

Kg de acero estructural de Perfil laminado con sección IPE-140 para las vigas paralelas a la dirección del forjado que unen los pilares (1-3; 2-4; 3-5; 4-6; 5-7; 6-8). Incluso mano de obra y medios auxiliares. Totalmente terminado e instalado.

U.O.4. m² DE FORJADO CON HORMIGÓN DE MUY ALTO RENDIMIENTO.

m² de forjado de hormigón de muy alto rendimiento pretensado con una capa de compresión de 5cm y hormigón HA-30/b20/IIb y una cuantía de 1,8‰ en las dos direcciones. Incluido transporte a obra, montaje de la placa de hormigón, encofrado, ferrallado y hormigonado de la capa de compresión.

6.1.2 Alternativa con losas alveolares:

U.O.1. kg DE ACERO ESTRUCTURAL LAMINADO CON SECCIÓN HEB-160

kg de acero estructural laminado con sección HEB-180 para los pilares del forjado. Incluso mano de obra y medios auxiliares. Totalmente terminado e instalado.

U.O.2. kg DE ACERO ESTRUCTURAL LAMINADO CON SECCIÓN IPE-360

Kg de acero estructural de perfil laminado con sección IPE-400 para las vigas perpendiculares a los forjados que unen los pilares (1-2; 3-4; 5-6). Incluso mano de obra y medios auxiliares. Totalmente terminado e instalado.

U.O.3. kg DE ACERO ESTRUCTURAL LAMINADO CON SECCIÓN IPE-140

Kg de acero estructural de Perfil laminado con sección IPE-140 para las vigas paralelas a la dirección del forjado que unen los pilares (1-3; 2-4; 3-5; 4-6; 5-7; 6-8). Incluso mano de obra y medios auxiliares. Totalmente terminado e instalado.

U.O.4. m² DE FORJADO CON LOSAS ALVEOLARES PRETENSADAS

m² de forjado de losas alveolares pretensadas con una capa de compresión de 5cm de espesor con una cuantía del 1,8‰ y un refuerzo en los apoyos de 1φ6/60cm. Incluido transporte a obra, colocación de las losas, encofrado, ferrallado y hormigonado de la losa de compresión.

6.1.3 Alternativa con chapa colaborante:

U.O.1. kg DE ACERO ESTRUCTURAL LAMINADO CON SECCIÓN HEB-160

kg de acero estructural laminado con sección HEB-180 para los pilares del forjado. Incluso mano de obra y medios auxiliares. Totalmente terminado e instalado.

U.O.2. kg DE ACERO ESTRUCTURAL LAMINADO CON SECCIÓN IPE-360

Kg de acero estructural de perfil laminado con sección IPE-400 para las vigas perpendiculares a los forjados que unen los pilares (1-2; 3-4; 5-6). Incluso mano de obra y medios auxiliares. Totalmente terminado e instalado.

U.O.3. kg DE ACERO ESTRUCTURAL LAMINADO CON SECCIÓN IPE-140

Kg de acero estructural de Perfil laminado con sección IPE-140 para las vigas paralelas a la dirección del forjado que unen los pilares (1-3; 2-4; 3-5; 4-6; 5-7; 6-8). Incluso mano de obra y medios auxiliares. Totalmente terminado e instalado

U.O.4. m² DE FORJADO MIXCO CON CHAPA GRECADA DE 1,20mm DE ESPESOR

m² de forjado mixto con chapa grecada colaborante de 1,2mm de espesor con altura de greca 44mm, espaciamiento entre grecas 172mm, ancho de la greca en la zona superior de 53mm y en la zona inferior de 71mm, con una losa de hormigón HA-25/B20/IIb y una cuantía del 1,8‰ en la cara superior y en las dos direcciones. Con sopandas durante la fase de construcción separadas no más de 2m. Incluye transporte y colocación en obra, encofrado, ferrallado y hormigonado de la losa.

6.2 Precios unitarios

En este apartado se van a descomponer los precios unitarios de cada una de las alternativas para así poder cuantificar cada una de las unidades de obra. rendimiento:

6.2.1 Alternativa con hormigón de muy alto rendimiento:

Código	Unidad	Descripción	Rendimiento	Precio unitario	Importe
Auxiliar	m3	Hormigón de muy alto rendimiento para la fabricación en central de un forjado unidireccional. Incluido encofrado, hormigonado, tesado, desencofrado y acopio en central para su posterior carga y transporte hasta la zona de obra.			
1		Materiales			
	t	Cemento 52,5 IP/SR	0,980	96,07 €	94,15 €
	t	Humo de silice	0,098	160,00 €	15,68 €
	t	Arena silícea φmax 0,5	0,308	28,00 €	8,62 €
	t	Arena silícea φmax 2,0	0,781	32,00 €	24,99 €
	t	Fibras cortas Dramix 13/0,16 OL o similares	0,156	2.495,00 €	389,22 €
	litro	Aditivo superplastificante Glenium ACE31 o similar	32,000	2,00 €	64,00 €
	m3	Agua	0,215	0,88 €	0,19 €
		Subtotal materiales:			596,85 €
		Costes directos (1+2+3+4):			596,85 €
	%	Costes indirectos (10%)			59,69 €
		TOTAL			656,54 €

Código	Unidad	Descripción	Rendimiento	Precio unitario	Importe
Auxiliar 2	m2	Placa de hormigón de muy alto rendimiento pretensada para la construcción de un forjado unidireccional, incluido hormigonado del HMAR, colocación de la armadura activa tesado, y acopio en obra.			
1		Materiales			
	m3	Hormigón de muy alto rendimiento para la fabricación en central de un forjado unidireccional. Incluido encofrado, hormigonado, tesado, desencofrado y acopio en central para su posterior carga y transporte hasta la zona de obra.	0,050	656,54 €	32,83 €
	kg	Acero para pretensar, UNE 36094 Y 1860 S7, para losas con una distancia entre ejes de pilares menor de 7 m. Incluso anclajes, vainas y todos los accesorios necesarios para las operaciones de enfilado, tesado e inyección y sellado de cajetines.	0,785	5,40 €	4,24 €
		Subtotal materiales:			37,07 €
3		Mano de obra			
	h	Oficial 1ª hormigonado de planta prefabricadora	0,20	18,10 €	3,62 €
	h	Ayudante hormigonado de planta prefabricadora	0,20	16,94 €	3,39 €
		Subtotal mano de obra:			7,01 €
		Costes directos (1+2+3):			44,08 €
	%	Costes indirectos (10%)			4,41 €
		TOTAL			48,49 €

Código	Unidad	Descripción	Rendimiento	Precio unitario	Importe
U.O.1.		kg de acero estructural laminado con sección HEB-180 para los pilares del forjado. Incluso mano de obra y medios auxiliares. Totalmente terminado e instalado.			
1		Materiales			
	kg	Acero laminado UNE-EN 10025 S275JR, en perfiles laminados en caliente, piezas simples, para	1,05	0,99 €	1,04 €
	l	Imprimación de secado rápido, formulada con resinas alquídicas modificadas y fosfato de zinc.	0,05	4,80 €	0,24 €
		Subtotal materiales:			1,28 €
2		Equipo y maquinaria			
	h	Equipo y elementos auxiliares para soldadura eléctrica.	0,015	3,09 €	0,05 €
		Subtotal equipo y maquinaria:			0,05 €
3		Mano de obra			
	h	Oficial 1ª montador de estructura metálica.	0,02	18,10 €	0,36 €
	h	Ayudante montador de estructura metálica.	0,02	16,94 €	0,34 €
		Subtotal mano de obra:			0,70 €
		Costes directos (1+2+3):			2,03 €
	%	Costes indirectos (10%)			0,20 €
		TOTAL			2,23 €

Código	Unidad	Descripción	Rendimiento	Precio unitario	Importe
U.O.2.		Kg de acero estructural de perfil laminado con sección IPE-400 para las vigas perpendiculares a los forjados que unen los pilares (1-2; 3-4; 5-6). Incluso mano de obra y medios auxiliares. Totalmente terminado e instalado.			
1		Materiales			
	kg	Acero laminado UNE-EN 10025 S275JR, en perfiles laminados en caliente, piezas simples, para aplicaciones estructurales.	1,05	0,99 €	1,04 €
	l	Imprimación de secado rápido, formulada con resinas alquídicas modificadas y fosfato de zinc.	0,05	4,80 €	0,24 €
		Subtotal materiales:			1,28 €
2		Equipo y maquinaria			
	h	Equipo y elementos auxiliares para soldadura eléctrica.	0,015	3,09 €	0,05 €
		Subtotal equipo y maquinaria:			0,05 €
3		Mano de obra			
	h	Oficial 1ª montador de estructura metálica.	0,02	18,10 €	0,36 €
	h	Ayudante montador de estructura metálica.	0,02	16,94 €	0,34 €
		Subtotal mano de obra:			0,70 €
		Costes directos (1+2+3):			2,03 €
	%	Costes indirectos (10%)			0,20 €
		TOTAL			2,23 €

Código	Unidad	Descripción	Rendimiento	Precio unitario	Importe
U.O.3.		Kg de acero estructural de Perfil laminado con sección IPE-140 para las vigas paralelas a la dirección del forjado que unen los pilares (1-3; 2-4; 3-5; 4-6; 5-7; 6-8). Incluso mano de obra y medios auxiliares. Totalmente terminado e instalado.			
1		Materiales			
	kg	Acero laminado UNE-EN 10025 S275JR, en perfiles laminados en caliente, piezas simples, para aplicaciones estructurales.	1,05	0,99 €	1,04 €
	l	Imprimación de secado rápido, formulada con resinas alquídicas modificadas y fosfato de zinc.	0,05	4,80 €	0,24 €
		Subtotal materiales:			1,28 €
2		Equipo y maquinaria			
	h	Equipo y elementos auxiliares para soldadura eléctrica.	0,015	3,09 €	0,05 €
		Subtotal equipo y maquinaria:			0,05 €
3		Mano de obra			
	h	Oficial 1ª montador de estructura metálica.	0,02	18,10 €	0,36 €
	h	Ayudante montador de estructura metálica.	0,02	16,94 €	0,34 €
		Subtotal mano de obra:			0,70 €
		Costes directos (1+2+3):			2,03 €
%		Costes indirectos (10%)			0,20 €
		TOTAL			2,23 €

Código	Unidad	Descripción	Rendimiento	Precio unitario	Importe
U.O.4.	m2	m2 de forjado de hormigón de muy alto rendimiento pretensado con una capa de compresión de 5cm y hormigón HA-30/b20/IIb y una cuantía de 1,8% en las dos direcciones. Incluido transporte a obra, montaje de la placa de hormigón, encofrado, ferrallado y hormigonado de la capa de compresión.			
1		Materiales			
	m2	Placa de hormigón de muy alto rendimiento para la fabricación en fábrica de un forjado unidireccional. Incluido encofrado, hormigonado, tesado, desencofrado y acopio en central para su posterior carga y transporte hasta la zona de obra.	1,00	48,49 €	48,49 €
	Ud	Separador homologado para malla electrosoldada.	4,000	0,08 €	0,32 €
	m²	Malla electrosoldada ME 20x30 Ø 6-6 B 500 T 6x2,20 UNE-EN 10080.	1,000	1,07 €	1,07 €
	m³	Hormigón HA-30/B/12/IIa, fabricada en central.	0,050	84,65 €	4,23 €
		Subtotal materiales:			54,11 €
2		Equipo y maquinaria			
	h	Grúa autopropulsada de brazo telescópico con una capacidad de elevación de 30 t y 27 m de altura máxima de trabajo.	0,186	66,84	12,43 €
		Subtotal equipo y maquinaria:			12,43 €
3		Mano de obra			
	h	Oficial 1ª montador de estructura prefabricada de hormigón.	0,187	18,10 €	3,38 €
	h	Ayudante montador de estructura prefabricada de hormigón.	0,187	16,94 €	3,17 €
	h	Peón ordinario construcción.	0,061	15,92 €	0,97 €
	h	Peón especializado construcción.	0,061	16,25 €	0,99 €
		Subtotal equipo y maquinaria:			8,51 €
		Costes directos (1+2+3):			75,06 €
%		Costes indirectos			7,51 €
		TOTAL			82,56 €

6.2.2 Alternativa con losas alveolares.

Código	Unidad	Descripción	Rendimiento	Precio unitario	Importe
U.O.1.		kg de acero estructural laminado con sección HEB-180 para los pilares del forjado. Incluso mano de obra y medios auxiliares. Totalmente terminado e instalado.			
1		Materiales			
	kg	Acero laminado UNE-EN 10025 S275JR, en perfiles laminados en caliente, piezas simples, para	1,05	0,99 €	1,04 €
	l	Imprimación de secado rápido, formulada con resinas alquídicas modificadas y fosfato de zinc.	0,05	4,80 €	0,24 €
		Subtotal materiales:			1,28 €
2		Equipo y maquinaria			
	h	Equipo y elementos auxiliares para soldadura eléctrica.	0,015	3,09 €	0,05 €
		Subtotal equipo y maquinaria:			0,05 €
3		Mano de obra			
	h	Oficial 1ª montador de estructura metálica.	0,02	18,10 €	0,36 €
	h	Ayudante montador de estructura metálica.	0,02	16,94 €	0,34 €
		Subtotal mano de obra:			0,70 €
		Costes directos (1+2+3):			2,03 €
%		Costes indirectos (10%)			0,20 €
		TOTAL			2,23 €

Código	Unidad	Descripción	Rendimiento	Precio unitario	Importe
U.O.2.		Kg de acero estructural de perfil laminado con sección IPE-400 para las vigas perpendiculares a los forjados que unen los pilares (1-2; 3-4; 5-6). Incluso mano de obra y medios auxiliares. Totalmente terminado e instalado.			
1	Materiales				
	kg	Acero laminado UNE-EN 10025 S275JR, en perfiles laminados en caliente, piezas simples, para aplicaciones estructurales.	1,05	0,99 €	1,04 €
	l	Imprimación de secado rápido, formulada con resinas alquídicas modificadas y fosfato de zinc.	0,05	4,80 €	0,24 €
		Subtotal materiales:			1,28 €
2	Equipo y maquinaria				
	h	Equipo y elementos auxiliares para soldadura eléctrica.	0,015	3,09 €	0,05 €
		Subtotal equipo y maquinaria:			0,05 €
3	Mano de obra				
	h	Oficial 1ª montador de estructura metálica.	0,02	18,10 €	0,36 €
	h	Ayudante montador de estructura metálica.	0,02	16,94 €	0,34 €
		Subtotal mano de obra:			0,70 €
		Costes directos (1+2+3):			2,03 €
%		Costes indirectos (10%)			0,20 €
		TOTAL			2,23 €

Código	Unidad	Descripción	Rendimiento	Precio unitario	Importe
U.O.3.		Kg de acero estructural de Perfil laminado con sección IPE-140 para las vigas paralelas a la dirección del forjado que unen los pilares (1-3; 2-4; 3-5; 4-6; 5-7; 6-8). Incluso mano de obra y medios auxiliares. Totalmente terminado e instalado.			
1	Materiales				
	kg	Acero laminado UNE-EN 10025 S275JR, en perfiles laminados en caliente, piezas simples, para aplicaciones estructurales.	1,05	0,99 €	1,04 €
	l	Imprimación de secado rápido, formulada con resinas alquídicas modificadas y fosfato de zinc.	0,05	4,80 €	0,24 €
		Subtotal materiales:			1,28 €
2	Equipo y maquinaria				
	h	Equipo y elementos auxiliares para soldadura eléctrica.	0,015	3,09 €	0,05 €
		Subtotal equipo y maquinaria:			0,05 €
3	Mano de obra				
	h	Oficial 1ª montador de estructura metálica.	0,02	18,10 €	0,36 €
	h	Ayudante montador de estructura metálica.	0,02	16,94 €	0,34 €
		Subtotal mano de obra:			0,70 €
		Costes directos (1+2+3):			2,03 €
%		Costes indirectos (10%)			0,20 €
		TOTAL			2,23 €

Código	Unidad	Descripción	Rendimiento	Precio Unitario	Importe
U.O.4	m2	m2 de forjado de losas alveolares pretensadas con una capa de compresión de 5cm de espesor con una cuantía del 1,8‰ y un refuerzo en los apoyos de 1φ6/60cm. Incluido transporte a obra, colocación de las losas, encofrado, ferrallado y hormigonado de la losa de compresión.			
1	Materiales				
	m²	Placa alveolar prefabricada de hormigón pretensado de 20 cm de canto y 120 cm de anchura, con junta lateral abierta superiormente. Según UNE-EN 1168.	1,000	33,70 €	33,70 €
	Ud	Separador homologado para malla electrosoldada.	3,000	0,08 €	0,24 €
	m²	Malla electrosoldada ME 20x30 Ø 6-6 B 500 T 6x2,20 UNE-EN 10080.	1,000	1,07 €	1,07 €
	kg	Ferralla elaborada en taller industrial con acero en barras corrugadas, UNE-EN 10080 B 500 S, de varios diámetros.	4,000	0,81 €	3,24 €
	m³	Hormigón HA-30/B/12/I/a, fabricado en central.	0,050	84,65 €	4,23 €
		Subtotal materiales:			42,48 €
2	Equipo y maquinaria				
	h	Grúa autopropulsada de brazo telescópico con una capacidad de elevación de 30 t y 27 m de altura máxima de trabajo.	0,186	66,84 €	12,43 €
		Subtotal equipo y maquinaria:			12,43 €
3	Mano de obra				
	h	Oficial 1ª montador de estructura prefabricada de hormigón.	0,187	18,10 €	3,38 €
	h	Ayudante montador de estructura prefabricada de hormigón.	0,187	16,94 €	3,17 €
	h	Peón ordinario construcción.	0,061	15,92 €	0,97 €
	h	Peón especializado construcción.	0,061	16,25 €	0,99 €
		Subtotal mano de obra:			8,51 €
		Costes directos (1+2+3):			63,43 €
		Costes indirectos (10%)			6,34 €
		TOTAL			69,77 €

6.2.3 Alternativa con chapa colaborante.

Código	Unidad	Descripción	Rendimiento	Precio unitario	Importe
U.O.1.		kg de acero estructural laminado con sección HEB-180 para los pilares del forjado. Incluso mano de obra y medios auxiliares. Totalmente terminado e instalado.			
1		Materiales			
	kg	Acero laminado UNE-EN 10025 S275JR, en perfiles laminados en caliente, piezas simples, para	1,05	0,99 €	1,04 €
	l	Imprimación de secado rápido, formulada con resinas alquídicas modificadas y fosfato de zinc.	0,05	4,80 €	0,24 €
		Subtotal materiales:			1,28 €
2		Equipo y maquinaria			
	h	Equipo y elementos auxiliares para soldadura eléctrica.	0,015	3,09 €	0,05 €
		Subtotal equipo y maquinaria:			0,05 €
3		Mano de obra			
	h	Oficial 1ª montador de estructura metálica.	0,02	18,10 €	0,36 €
	h	Ayudante montador de estructura metálica.	0,02	16,94 €	0,34 €
		Subtotal mano de obra:			0,70 €
		Costes directos (1+2+3):			2,03 €
%		Costes indirectos (10%)			0,20 €
		TOTAL			2,23 €

Código	Unidad	Descripción	Rendimiento	Precio unitario	Importe
U.O.3.		Kg de acero estructural de Perfil laminado con sección IPE-140 para las vigas paralelas a la dirección del forjado que unen los pilares (1-3; 2-4; 3-5; 4-6; 5-7; 6-8). Incluso mano de obra y medios auxiliares. Totalmente terminado e instalado.			
1		Materiales			
	kg	Acero laminado UNE-EN 10025 S275JR, en perfiles laminados en caliente, piezas simples, para aplicaciones estructurales.	1,05	0,99 €	1,04 €
	l	Imprimación de secado rápido, formulada con resinas alquídicas modificadas y fosfato de zinc.	0,05	4,80 €	0,24 €
		Subtotal materiales:			1,28 €
2		Equipo y maquinaria			
	h	Equipo y elementos auxiliares para soldadura eléctrica.	0,015	3,09 €	0,05 €
		Subtotal equipo y maquinaria:			0,05 €
3		Mano de obra			
	h	Oficial 1ª montador de estructura metálica.	0,02	18,10 €	0,36 €
	h	Ayudante montador de estructura metálica.	0,02	16,94 €	0,34 €
		Subtotal mano de obra:			0,70 €
		Costes directos (1+2+3):			2,03 €
%		Costes indirectos (10%)			0,20 €
		TOTAL			2,23 €

Código	Unidad	Descripción	Rendimiento	Precio unitario	Importe
U.O.2.		Kg de acero estructural de perfil laminado con sección IPE-400 para las vigas perpendiculares a los forjados que unen los pilares (1-2; 3-4; 5-6). Incluso mano de obra y medios auxiliares. Totalmente terminado e instalado.			
1		Materiales			
	kg	Acero laminado UNE-EN 10025 S275JR, en perfiles laminados en caliente, piezas simples, para aplicaciones estructurales.	1,05	0,99 €	1,04 €
	l	Imprimación de secado rápido, formulada con resinas alquídicas modificadas y fosfato de zinc.	0,05	4,80 €	0,24 €
		Subtotal materiales:			1,28 €
2		Equipo y maquinaria			
	h	Equipo y elementos auxiliares para soldadura eléctrica.	0,015	3,09 €	0,05 €
		Subtotal equipo y maquinaria:			0,05 €
3		Mano de obra			
	h	Oficial 1ª montador de estructura metálica.	0,02	18,10 €	0,36 €
	h	Ayudante montador de estructura metálica.	0,02	16,94 €	0,34 €
		Subtotal mano de obra:			0,70 €
		Costes directos (1+2+3):			2,03 €
%		Costes indirectos (10%)			0,20 €
		TOTAL			2,23 €

Código	Unidad	Descripción	Rendimiento	Precio unitario	Importe
U.O.4.	m2	m2 de forjado mixto con chapa grecada colaborante de 1,2mm de espesor con altura de greca 44mm, espaciamiento entre grecas 172mm, ancho de la greca en la zona superior de 53mm y en la zona inferior de 71mm, con una losa de hormigón HA-25/B20/IIb y una cuantía del 1,8‰ en la cara superior y en las dos direcciones. Con sopandas durante la fase de construcción separadas no más de 2m. Incluye transporte y colocación en obra, encofrado, ferrallado y hormigonado de la losa.			
1 Materiales					
	m ²	Perfil de chapa de acero galvanizado con forma grecada, de 1,2 mm de espesor, 70 mm de altura de perfil y 210 mm de intereje, 13 a 14 kg/m ² . Incluso tornillos autotaladrantes rosca-chapa para fijación de las chapas.	1,050	27,47 €	28,84 €
	Ud	Separador homologado para losas.	3,000	0,08 €	0,24 €
	kg	Ferralla elaborada en taller industrial con acero en barras corrugadas, UNE-EN 10080 B 500 S, de varios diámetros.	1,000	0,81 €	0,81 €
	kg	Alambre galvanizado para atar, de 1,30 mm de diámetro.	0,031	1,10 €	0,03 €
	m ²	Malla electrosoldada ME 15x30 Ø 10-10 B 500 T 6x2,20 UNE-EN 10080.	1,150	3,65 €	4,20 €
	m ³	Hormigón HA-25/B/20/IIa, fabricado en central.	0,065	76,88 €	5,00 €
	Ud	Conector de acero galvanizado con cabeza de disco, de 19 mm de diámetro y 81 mm de altura, para fijar a estructura de acero mediante soldadura a la chapa colaborante.	10,000	0,69 €	6,90 €
	l	Agente filmógeno para curado de hormigones y morteros.	0,150	1,94 €	0,29 €
					Subtotal materiales: 46,31 €
2 Equipo y maquinaria					
	día	Puntales codales y elementos auxiliares	10,000	0,20 €	2,00 €
	h	Equipo y elementos auxiliares para soldadura de conectores.	0,504	17,54 €	8,84 €
					Subtotal equipo y maquinaria: 10,84 €
3 Mano de obra					
	h	Oficial 1º montador de estructura metálica.	0,631	18,10 €	11,42 €
	h	Ayudante montador de estructura metálica.	0,244	16,94 €	4,13 €
	h	Oficial 1º ferrallista.	0,040	18,10 €	0,72 €
	h	Ayudante ferrallista.	0,038	16,94 €	0,64 €
	h	Oficial 1º estructurista, en trabajos de puesta en obra del hormigón.	0,014	18,10 €	0,25 €
	h	Ayudante estructurista, en trabajos de puesta en obra del hormigón.	0,057	16,94 €	0,97 €
					Subtotal mano de obra: 18,13 €
					Costes directos (1+2+3): 75,28 €
					7,53 €
					TOTAL 82,81 €
			Costes indirectos (10%)		

6.3 Mediciones:

6.3.1 Alternativa con hormigón de muy alto rendimiento.

U.O.1.	kg	DE ACERO ESTRUCTURAL LAMINADO CON SECCIÓN HEB-180		
		nº Perfiles	Longitud/Perfil (m)	Peso/m (kg/m)
		8	4	51,2
		Medición	..... 1638,4	
U.O.2.	kg	DE ACERO ESTRUCTURAL LAMINADO CON SECCIÓN IPE-400		
		nº Perfiles	Longitud/Perfil (m)	Peso/m (kg/m)
		8	4	66,3
		Medición	..... 2121,6	
U.O.3.	kg	DE ACERO ESTRUCTURAL LAMINADO CON SECCIÓN IPE-140		
		nº Perfiles	Longitud/Perfil (m)	Peso/m (kg/m)
		8	4	12,9
		Medición	..... 412,8	
U.O.3.	m2	m² DE FORJADO CON HORMIGÓN DE MUY ALTO RENDIMIENTO.		
		Ancho	Largo	
		6	15	
		Medición	..... 90	

6.3.2 Alternativa con losas alveolares

U.O.1.	kg	DE ACERO ESTRUCTURAL LAMINADO CON SECCIÓN HEB-180		
		nº Perfiles	Longitud/Perfil (m)	Peso/m (kg/m)
		8	4	51,2
		Medición	..... 1638,4	
U.O.2.	kg	DE ACERO ESTRUCTURAL LAMINADO CON SECCIÓN IPE-400		
		nº Perfiles	Longitud/Perfil (m)	Peso/m (kg/m)
		8	4	66,3
		Medición	..... 2121,6	
U.O.3.	kg	DE ACERO ESTRUCTURAL LAMINADO CON SECCIÓN IPE-140		
		nº Perfiles	Longitud/Perfil (m)	Peso/m (kg/m)
		8	4	12,9
		Medición	..... 412,8	
U.O.3.	m2	m² DE FORJADO CON LOSAS ALVEOLARES PRETENSADAS		
		Ancho	Largo	
		6	15	
		Medición	..... 90	

6.3.3 Alternativa con chapa colaborante

U.O.1.	kg	DE ACERO ESTRUCTURAL LAMINADO CON SECCIÓN HEB-180		
		nº Perfiles	Longitud/Perfil (m)	Peso/m (kg/m)
		8	4	51,2
		Medición	..... 1638,4	
U.O.2.	kg	DE ACERO ESTRUCTURAL LAMINADO CON SECCIÓN IPE-400		
		nº Perfiles	Longitud/Perfil (m)	Peso/m (kg/m)
		8	4	66,3
		Medición	..... 2121,6	
U.O.3.	kg	DE ACERO ESTRUCTURAL LAMINADO CON SECCIÓN IPE-140		
		nº Perfiles	Longitud/Perfil (m)	Peso/m (kg/m)
		8	4	12,9
		Medición	..... 412,8	
U.O.3.	m2	DE FORJADO MIXCO CON CHAPA GRECADA DE 1,20mm DE ESPESOR		
		Ancho	Largo	
		6	15	
		Medición	..... 90	

6.4 Valoración económica.

Una vez se han obtenido las unidades de obra, se han estimado los precios unitarios de estas y se han realizado las mediciones, el siguiente paso es realizar una valoración económica de las alternativas.

En el sector de la construcción el precio suele ser un factor determinante, provocando por desgracia, que la mejor alternativa técnica no sea siempre la solución adoptada. Por ello, se hace imprescindible realizar una comparación económica entre las tres alternativas.

6.4.1 Alternativa con hormigón de muy alto rendimiento.

Tabla 8: Valoración económica de la alternativa con hormigón de muy alto rendimiento

VALORACIÓN CAHAPA COLABORANTE			
	Precio unitario	Medición	Precio
U.O.1	2,23 €	1638,4	3.658,55 €
U.O.2	2,23 €	2121,6	4.737,53 €
U.O.3	2,23 €	412,8	921,78 €
U.O.4	82,56 €	90	7.430,70 €
TOTAL			16.748,56 €

6.4.2 Alternativa con losas alveolares

Tabla 9: valoración económica de la alternativa con losas alveolares

VALORACIÓN CAHAPA COLABORANTE			
	Precio unitario	Medición	Precio
U.O.1	2,23 €	1638,4	3.658,55 €
U.O.2	2,23 €	2121,6	4.737,53 €
U.O.3	2,23 €	412,8	921,78 €
U.O.4	69,77 €	90	6.279,53 €
TOTAL			15.597,39 €

6.4.3 Alternativa con chapa colaborante

Tabla 10: Valoración económica de la alternativa con chapa colaborante

VALORACIÓN CAHAPA COLABORANTE			
	Precio unitario	Medición	Precio
U.O.1	2,23 €	1638,4	3.658,55 €
U.O.2	2,23 €	2121,6	4.737,53 €
U.O.3	2,23 €	412,8	921,78 €
U.O.4	82,81 €	90	7.452,72 €
TOTAL			16.770,58 €



7. Comparación:

Debido a que el estudio es una comparación entre varias soluciones, es necesario que existan unos parámetros que equiparen la comparación. Por ello, en este punto, se van a contraponer varios factores de las tres alternativas.

7. Comparación:

En este punto se va a realizar una comparación técnica y económica de las tres alternativas con tal de encontrar cuales son los puntos fuertes y débiles de cada una de ellas.

7.1. Comparación económica.

Habitualmente, en el mundo de la ingeniería civil, la economía es uno de los factores que más peso tiene. Muchas veces se puede llegar a optar por una solución que no es la óptima desde un punto de vista puramente técnico para ajustar el presupuesto.

En esta solución de compromiso que por la naturaleza de nuestra profesión nos vemos envueltos, hay que aplicar un ojo crítico para que la elección sea la adecuada.

Analizando los forjados desde un punto de vista económico, la mejor de las alternativas es la de losas alveolares pretensadas. También hay que destacar, que la solución de hormigón de muy alto rendimiento mejora a la de chapa colaborante.

VALORACIÓN		
L. Alveolares	HMAR	Chapa Col
15.597,39 €	16.748,56 €	16.770,58 €

La diferencia de precio no es tan grande como se podría llegar a esperar viendo la diferencia entre el coste del HMAR y el hormigón convencional (Casi 10 veces su coste). A parte, no hay que perder de vista, que las losas alveolares son un elemento que lleva muchos años en el mercado y sobre el cual se han hecho muchas optimizaciones.

Tampoco hay que perder de vista, que la durabilidad del hormigón de muy alto rendimiento es mucho mayor que la del hormigón convencional. Haciendo que las tareas de mantenimiento sean escasa o incluso nulas y con ellos el coste de estas.

7.2. Comparación técnica.

Desde un punto de vista estructural, los tres forjados cumplen las especificaciones exigidas por las normativas correspondientes. Por ello, todos son soluciones viables técnicamente. Ahora bien, la alternativa con hormigón de muy alto rendimiento mejora algunos aspectos con respecto a las otras dos.

Si comparamos el proceso constructivo, el primer asunto que salta a la vista, es que la alternativa con chapa colaborante necesita sopandas durante la construcción. Esto, aparte de encarecer la obra, supone que hay una zona de ella sobre la que no se puede continuar trabajando durante un periodo aproximado de tiempo de entre 20-28 días que tiene que estar apuntalado el forjado.

Otro aspecto a tener en cuenta en el proceso constructivo es que el forjado de hormigón de muy alto rendimiento es menos pesado que los otros dos. Esto facilita las operaciones de montaje a los operarios mejorando los rendimientos. En caso del forjado que se ha estudiado en este TFG puede que no sea muy relevante, pues la superficie que tiene no es muy extensa, pero en otros casos, como por ejemplo una casa de varias plantas, puede llegar a suponer una gran diferencia de plazo.

Siguiendo con el peso de las distintas alternativas, también hay que considerar que la maquinaria de elevación a emplear puede no llegar a ser la misma en uno y otro caso.

Uno de los aspectos en el que el hormigón de muy alto rendimiento supera con creces al hormigón convencional, tanto de la losa mixta como de las losas alveolares, es la durabilidad.



El hormigón convencional tiende a deteriorarse con el tiempo debido a los ataques químicos que sufre y a la corrosión de las armaduras producida por el agua que se infiltra por las fisuras.

En cambio, el hormigón de muy alto rendimiento tiene un comportamiento mucho más favorable con lo que respecta a estos problemas.

El hormigón de muy alto rendimiento cuando alcanza su límite a tracción sufre una microfisuración que es mucho más débil que la fisuración que sufre el hormigón convencional. A parte, la gran cantidad de cemento que llevan las dosificaciones de hormigón de muy alto rendimiento, hacen que no todo se combine con el agua y actúe como fino. Esto dota al elemento de una capacidad de autosanación de las fisuras inexistentes en el hormigón convencional.

Otro de los aspectos que mejora la durabilidad del HMAR, es que, debido al nivel de compacidad de este, tiene una porosidad mucho más escasa que el hormigón convencional. Con ello, se consigue reducir el efecto de los ataques químicos.

Aparte, las mejores prestaciones que se consiguen con el HMAR hacen que el material trabaje de una forma mucho más eficiente.



6. Conclusiones.

Por último, se van a presentar las conclusiones que se obtengan del estudio, bien sean positivas o negativas, intentado responder a la pregunta ¿Es viable construir una solución para un forjado con hormigón de muy alto rendimiento?

6. Conclusiones.

Una vez realizado el trabajo es necesario extraer unas conclusiones de el en base a los objetivos que se plantearon al comienzo de este.

El hormigón de muy alto rendimiento es un excelente material con unas propiedades muy atractivas. Su fascinante resistencia a compresión, su durabilidad y, sobre todo, su resistencia a tracción. Hacen de este material uno de los mayores avances en la ingeniería civil en lo que respecta a el hormigón.

El análisis realizado en este trabajo, aun siendo la opción menos económica, es favorable. El valor añadido que aporta la durabilidad y el escaso mantenimiento que requiere consigue que sea una solución tan atractiva como la más económica.

Tras este punto, en mi opinión, el siguiente paso sería realizar una segunda optimización de la sección, un estudio de cómo afecta la ligereza de este hormigón en el proceso constructivo, etc. Con esto, es muy probable que se llegara a una solución más económica que a la que se ha llegado con el forjado de losas alveolares.

Personalmente, me siento orgulloso de este trabajo. Ha supuesto un reto para mi teniendo que consultar normativa y recomendaciones desconocidas y en otros idiomas. Esto ha sido clave para mejorar como ingeniero, saliendo de la zona de confort en la que estamos acostumbrados a trabajar en los años universitarios.



7. Bibliografía:

- 1) Association Francaise de Genie Civil (AFGC, Groupe de travail BFUP). Betons fibres a ultra-hautes performances. Recommandation provisoires. Edition révisée Juin 2013
- 2) Instrucción de Hormigón Estructural. EHE-08 / Comisión Permanente del Hormigón 5ª Edición – Madrid: Ministerio de Fomento. Centro de Publicaciones, febrero 2012.
- 3) Código Técnico de la Edificación (CTE-09). Ministerio de Vivienda, España.
- 4) EN 1992-1-1:2004 y EN 1992-1-2:2004 Eurocódigo 2: Proyecto de estructuras de hormigón
- 5) CYPE Ingenieros. 2016.o