



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

TRABAJO FINAL DE GRADO

**ESTUDIO DE SOLUCIONES PARA LA  
REHABILITACIÓN DE LOS FORJADO DEL EDIFICIO  
DE LA ANTIGUA PRISIÓN PROVINCIAL DE MURCIA.**

---

**ANEJO VII: Desarrollo de la solución adoptada**

---

# ÍNDICE

<b>1. OBJETO.....</b>	<b>3</b>
<b>2. ESTADO DEL ARTE. ....</b>	<b>3</b>
2.1. Introducción .....	3
2.2. Dosificación y materiales del UHPC .....	5
2.3. Propiedades del UHPC.....	6
2.3.1. Propiedades en estado fresco. ....	6
2.3.2. Propiedades en estado de endurecimiento.....	6
2.3.2.1. Compresión. ....	6
2.3.2.2. Tracción.....	7
2.3.2.3. Flexión. ....	8
2.3.2.4. Durabilidad.....	11
2.3.2.5. Otras propiedades.....	11
<b>3. CARACTERÍSTICAS ESPECÍFICAS DEL MATERIAL A EMPLEAR.....</b>	<b>14</b>
<b>4. CÁLCULO DE LA SOLUCIÓN ADOPTADA.....</b>	<b>15</b>
4.1. Cálculo de espesor de HMAR necesario.....	15
4.2. Autorización de uso del forjado metálico. ....	16
<b>5. COMPARACIÓN CON RESPECTO A LA ALTERNATIVA 1. ....</b>	<b>22</b>
<b>6. COLOCACIÓN Y PUESTA EN OBRA. ....</b>	<b>23</b>
<b>7. CONCLUSIÓN .....</b>	<b>28</b>
<b>8. REFERENCIAS. ....</b>	<b>29</b>

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Curva constitutiva a compresión el UHPC con diferentes porcentajes de fibras. (Fuente: Fehling, 2004). .....	6
Figura 2. Comportamiento del UHPFRC a tracción directa. (Fuente: Spasojevic, 2006) .....	7
Figura 3. Curva a tensión equivalente-flecha en un ensayo a flexión (Fuente: Spasojevic, 2006).....	8
Figura 4. Diagrama Tensional en zona A (Fuente: López Martínez, 2012).....	9
Figura 5. Diagrama tensional en zona B (Fuente: López Martínez, 2012) .....	9
Figura 6. Diagrama tensional en zona C (izquierda) y zona D (derecha). (Fuente: López Martínez, 2014) .....	10
Figura 7. Croquis de la sección del forjado estudiado, cotas en centímetros. (Fuente: elaboración propia) .....	16
Figura 8. Desmontaje de la cubierta. (Fuente: Elaboración propia).....	23
Figura 9. Demolición de las particiones interiores. (Fuente: Elaboración propia).....	24
Figura 10. Demolición de las particiones interiores en forjado de planta baja (forjado de planta primer oculto). (Fuente: Elaboración propia) .....	25
Figura 11. Ejecución de vaciados para el refuerzo de cimentaciones. (Fuente: Elaboración propia).....	25
Figura 12. Ejecución de las vigas de atado y de las zapatas. (Fuente: Elaboración propia). .....	25
Figura 13. Colocación de los pilares metálicos. (Fuente: Elaboración propia).....	26
Figura 14. Ejecución del refuerzo de la capa de compresión con hormigón UHPC (Fuente: Elaboración propia). .....	26
Figura 15. Colocación de solado y acabados de la cara inferior del forjado de primera planta. (Fuente: Elaboración propia) .....	27
Figura 16. Estado final del edificio de la antigua prisión provincia de Murcia. (Fuente: Elaboración propia). .....	27

## **1. Objeto.**

El objetivo de este anejo es el de desarrollar la solución adoptada de las alternativas propuestas en el anejo de estudio de soluciones. Para ello se va a proceder a realizar un estado del arte de este material innovador, pero ya utilizado en el mercado para obras de rehabilitaciones, para posteriormente explicar cómo es su puesta en obra.

## **2. Estado del arte.**

### **2.1. Introducción**

El concepto de Ultra High Performance Concrete tal y como lo define la recomendación francesa se refiere a materiales con una matriz de cemento y una resistencia a compresión característica superior a 150 Mpa, y en la mayoría de los casos alcanzando una resistencia característica de 250 Mpa, y fibras de acero que contienen con el fin de lograr un comportamiento dúctil menores de diez años, y si es posible, para prescindir de la necesidad de refuerzo pasivo (no pretensado).

Este novedoso material se asocia a los hormigones con resistencia característica superior a 150 Mpa en probeta cilíndrica, alto contenido de cemento y elevada compacidad que le confiere una muy alta durabilidad.

La historia del hormigón ha experimentado una continua evolución a lo largo del tiempo, el cual ha ido variando, dependiendo de la etapa histórica, las circunstancias locales y avanzadas gracias a los conocimientos y estudios dedicados a este material.

La primera aparición de los hormigones reforzados con fibras data de la década de 1960, diez años más tarde aparece el concepto de hormigones con alta resistencia, que eran capaces de soportar cargas a compresión de 120 a 200 Mpa. A finales de los años 80' aparecen un nuevo concepto dentro del ámbito del hormigón, se trata de los hormigones autocompactantes, con una característica muy singular, ya que este tipo de hormigones son capaces de adaptarse a diferentes tipos de ambientes y con capacidad de trabajar para un cierto tipo de diseño. Por último, los hormigones tipo UHPC o HMAR se puede decir que es una combinación de estos tres hormigones especiales, que a continuación se va a proceder a comentar.

### **HORMIGONES AUTOCOMPACTANTES.**

Este tipo de hormigones presentan las características de poseer una consistencia fluida, capaz de fluir por el interior del encofrado, llenándose y repartiéndose por todo él de forma natural, pasar entre las barras de armadura y consolidándose sin necesidad de medios auxiliares para la compactación, sino únicamente bajo la acción de su peso propio, sin producirse segregación de sus componentes.

### **HORMIGONES DE ALTA RESISTENCIA.**

Son hormigones que presentan resistencia característica mucho mayor a los hormigones convencionales. Según la EHE-08 se considera hormigón especial cuando sus resistencias son superiores a 50 Mpa. Este tipo de hormigones se crearon con el objetivo de reducir las dimensiones de los elementos y mejorar la durabilidad. Este avance en prestaciones fue posible gracias al desarrollo de los cementos tanto en finura como en composición, la aparición de los aditivos y la utilización del humo de sílice como un producto industrial.

### **HORMIGÓN CON FIBRAS.**

Un gran avance para los hormigones, que aumentan su ductilidad y consiguen disminuir la abertura de fisuras es la incorporación de fibras en el hormigón. Las fibras cortas, aleatorias y discretas en la composición de los hormigones, el ACI define los hormigones con fibras a los hormigones hechos a partir de cementos hidráulicos, que contienen áridos finos, gruesos y fibras discretas.

Las fibras utilizadas en los hormigones buscan la reducción de mano de obra, un incremento de la durabilidad y conseguir la eliminación de los refuerzos de las armaduras pasivas, consiguiendo reducir costes. En el caso de los HMAR, la incorporación de las fibras en este tipo de hormigones resulta crucial para poder obtener grandes resistencias a tracción-flexión, así como el mejorar su durabilidad y poder alargar la vida útil del hormigón.

Es importante destacar que el uso de las fibras, se puede hacer con fibras de distintos materiales, con ello se pueden conseguir un aumento de la resistencia al fuego. En la actualidad, la gran mayoría de estos nuevos hormigones HMAR para uso estructural son productos patentados como lo son Ductal®, BSI®, BCV®, CEMTEC® o PLANITOP®.

## 2.2. Dosificación y materiales del UHPC

Como todos los hormigones, estos hormigones contienen las materias primas que suelen utilizar en los hormigones convencionales, aunque hay variaciones circunstanciales en cuanto al contenido de estos, un elemento que no se utiliza para la dosificación de estos hormigones es el árido grueso, por lo que se introduce una mayor cantidad de cemento.

Por ello, las materias primas a utilizar para poder obtener los UHPC son los siguientes:

- Áridos silicios de tamaño reducido que sean  $<2\text{mm}$ .
- Elevada cantidad de cemento.
- Aditivos superplastificantes de tercera generación.
- Adición activa.
- Fibras de alto límite elástico.
- Puede añadirse si es necesario harina de cuarzo.

Es importante tener en cuenta que tras estudios realizados en la UPV (Camacho Torregrosa, 2013) en el que se elaboró un estudio con más de 110 dosificaciones, se ha podido deducir las siguientes conclusiones:

- En la gran mayoría de casos los UHPFRC tienen un tamaño máximo de árido inferior a 0.8 mm
- La proporción de humo de sílice y harina de cuarzo respecto al peso de cemento es de alrededor del 25%. Un 30% de las dosificaciones no contiene harina de cuarzo, por lo que aumentan el contenido de cemento u otras adicciones.
- La elección del tipo de cemento es fundamental. Habitualmente se recurre a cementos de clase resistente intermedia para reducir el calor de hidratación y la demanda de agua.
- La adición de harina de cuarzo ( $\text{SiO}_2$  cristalina) a las dosificaciones permite reducir el contenido de cemento y complementar la curva granulométrica para los tamaños más pequeños.

## 2.3. Propiedades del UHPC

### 2.3.1. Propiedades en estado fresco.

El comportamiento reológico de este tipo de materiales depende de varios parámetros, aunque entre ellos destacan la relación Agua/Cemento, la mezcla, el contenido en finos, y la cantidad de fibras y su ordenación dentro del hormigón.

### 2.3.2. Propiedades en estado de endurecimiento.

#### 2.3.2.1. Compresión.

Realizando una comparación entre los distintos tipos de hormigones, en los que los hormigones convencionales poseen una resistencia a la compresión con valores comprendidos entre 28 y 55 MPa aproximadamente; para un HAR los valores ascienden a 83 y 124 MPa. Por otro lado, para los hormigones HMAR oscilan entre unos valores de entre 150 y 220 MPa, en los que existen grandes diferencias dependiendo no solo de las dosificaciones, sino por su tratamiento de curado y su porcentaje en fibras.

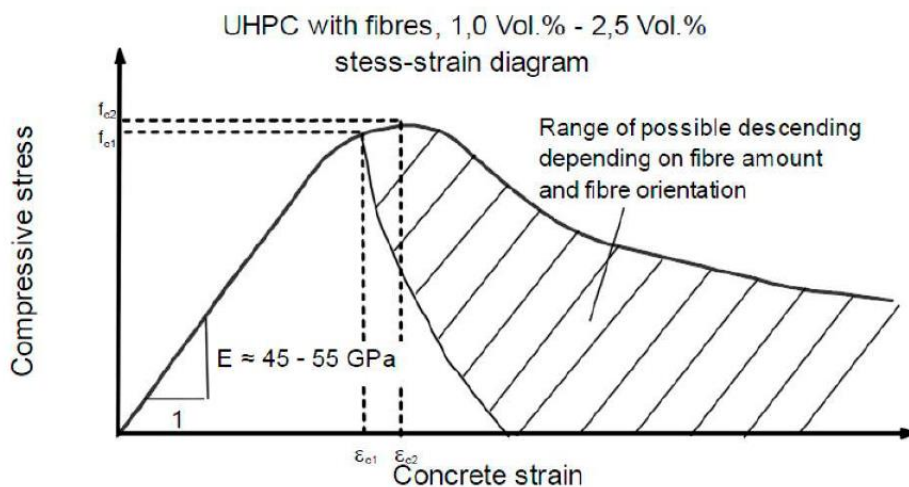


Figura 1. Curva constitutiva a compresión el HMAR con diferentes porcentajes de fibras.  
(Fuente: Fehling, 2004).

La resistencia de los hormigones de muy altas resistencias reforzadas con fibras, tienen una resistencia característica a los 28 días superiores a los 150 MPa. Por otro lado, la adquisición de resistencias es un proceso, por lo que el tiempo o edad del hormigón es un factor que influye considerablemente en su resistencia. Por ello, en este tipo de hormigones es muy importante destacar que el contenido en aditivos es bastante importante y que por ellos la adquisición de la resistencia depende de la clase de aditivos.

### 2.3.2.2. Tracción.

Este tipo de hormigones, además de contar con una resistencia a compresión mayor, también se obtienen resistencias a tracción mayores, con un contenido en fibras del 2%. La resistencia a tracción obtenida en el ensayo de tracción directa es del orden de 10 - 12 MPa. Es importante destacar que este tipo de hormigones, si no se contara con las fibras en la matriz, se convierte en un material extremadamente frágil.

En la figura, pueden distinguirse 3 fases diferenciadas, las diferentes fases corresponden a lo siguiente; rama elástica, una rama de endurecimiento, y por último una rama de ablandamiento tras la rotura.

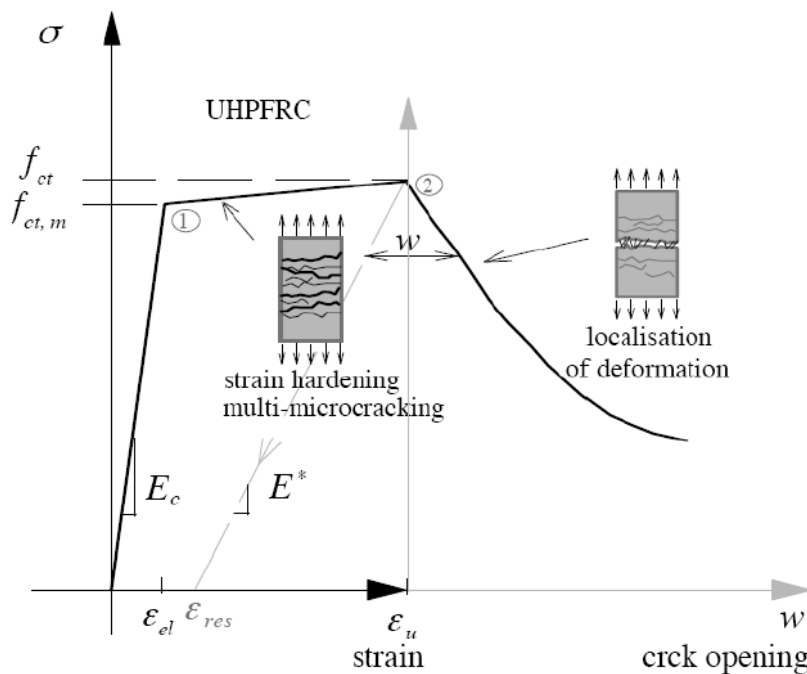


Figura 2. Comportamiento del HMPFRC a tracción directa. (Fuente: Spasojevic, 2006)

Tal y como se ha comentado antes, este tipo de hormigones, pueden llegar a alcanzar los 11 MPa de resistencia a tracción e incluso puede ser mayor a este valor si se aumentan el contenido en fibras. Este tipo de hormigones cuenta con una mayor resistencia a tracción que los hormigones convencionales, ya que hay un gran contenido de fibras en una matriz que se caracteriza por ser muy compacta, y que pierde parte de su fragilidad gracias al contenido en fibras. Por esta razón, para poder evaluar, cuantificar y caracterizar este tipo de hormigones, se tiene muy presente su contenido en fibras.

Estas cualidades que tiene el hormigón se traducen en una mejora de la rigidez a flexión, lo que se traduce como una reducción de la deformación bajo carga y una reducción considerable de la abertura de flecha. Cabe destacar, que la tensión equivalente en un ensayo a flexotracción, puede llegar a ser de 50 Mpa, estas capacidades mecánicas se consiguen, mediante una reducción considerable de la relación agua/cemento. Por otro lado, la longitud de las fibras también tiene una relación directa con la resistencia a flexión, ya que con fibras de longitud reducidas se alcanzan picos de resistencia mayores, y a medida que se aumenta la longitud de las fibras, se consigue una mayor ductilidad. Por ello, se puede observar, que estos hormigones presentan unas características mecánicas idóneas para su uso con grandes requisitos de resistencia a flexión.

Por esta razón, cuando se realiza un ensayo a flexión, gracias a las fibras de acero de alto límite elástico, se puede considerar en el análisis seccional la contribución del hormigón traccionado, al contrario que pasa en el análisis seccional en servicio, en el que en un hormigón convencional no se debe tener en cuenta la contribución del hormigón traccionado.

### 2.3.2.3. Flexión.

Tal y como se ha comentado anteriormente, estos hormigones, presentan características idóneas para su uso a flexión, para poder explicar más en profundidad acerca de esta propiedad mecánica, se realiza un ensayo en el cual se aprecia en la siguiente figura.

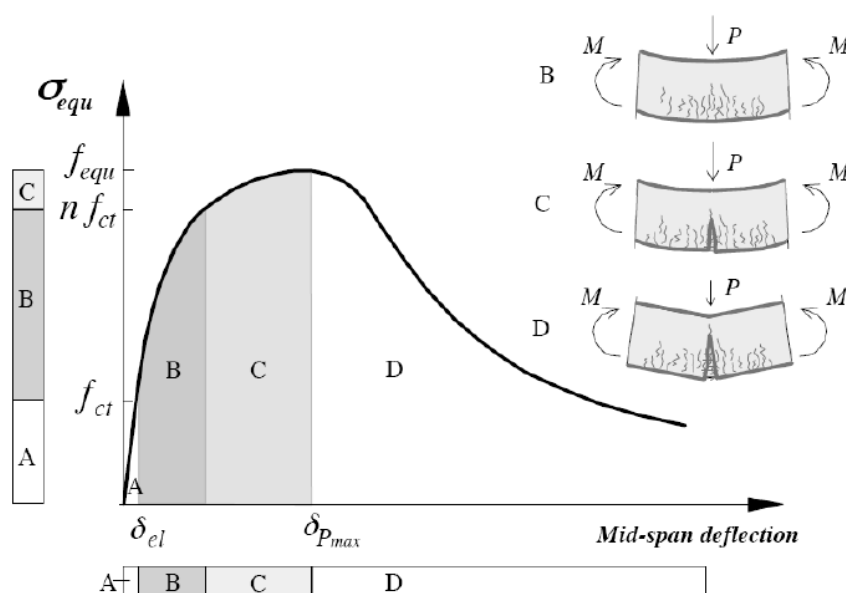


Figura 3. Curva a tensión equivalente-flecha en un ensayo a flexión (Fuente: Spasojevic, 2006)

Tal y como puede observarse en la figura anterior, se puede distinguir 3 zonas caracterizadas por su estado de fisuración. Una primera zona, en la figura se denomina como Zona A, en la que puede apreciarse que el material se comporta de una forma elástica, en esta fase se alcanza una resistencia total a flexión del orden del 35-40 % de la resistencia máxima, y en cuanto a la deformación se llega a alcanzar una deformación del 10% de la deformación máxima en rotura. El límite de la zona A, se alcanza cuando la fibra más traccionada del hormigón alcanza el valor umbral de deformación elástica. En la siguiente figura, se puede apreciar como el diagrama tensional en la zona A se trata de una distribución de tensiones lineal.

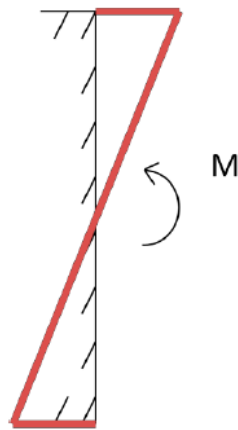


Figura 4. Diagrama Tensional en zona A (Fuente: López Martínez, 2012)

La Zona B, corresponde la fase de microfisuración, por el cual el diagrama tensional ya no adopta una distribución lineal, sino que se trata de una distribución de esfuerzos asimétrica, en esta zona, se produce un desplazamiento de la fibra neutra hacia la zona de tracción.

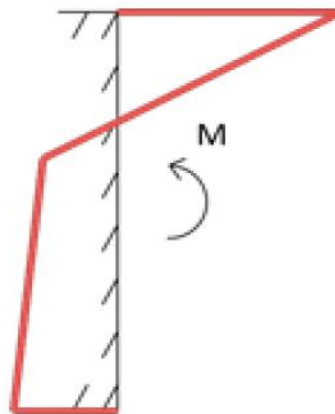


Figura 5. Diagrama tensional en zona B (Fuente: López Martínez, 2012)

Las Zonas C y D, corresponde a la fase de macrofisuración, esto suele producirse debido a la distribución no uniforme de las fibras. La sección D, se produce cuando en él se alcanza a flexión la carga que coincide con un estado en el que, en la sección crítica de rotura, la deformación a tracción máxima es superior a la deformación asociada a la máxima tensión.

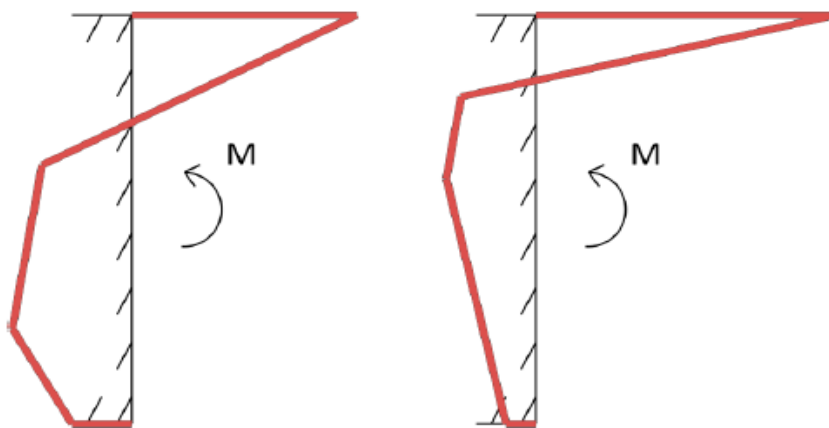


Figura 6. Diagrama tensional en zona C (izquierda) y zona D (derecha). (Fuente: López Martínez, 2014)

#### 2.3.2.4. Durabilidad.

La durabilidad es una propiedad muy relacionada con la vida útil del hormigón, en los hormigones convencionales, la durabilidad viene limitada por la corrosión de las armaduras, tanto activas como pasivas del hormigón. La durabilidad en los hormigones de muy alto rendimiento es mucho mayor que la de los convencionales.

La durabilidad está relacionada a nivel microscópico con la porosidad, en estos hormigones la porosidad es muy reducida, todo gracias a la elevadísima compacidad y la baja relación Agua/Cemento de estos hormigones. Por ello, la cantidad total de poros es realmente baja, que cuenta con un dato del orden del, 3 al 5% y que presenta otra ventaja y es que estos no están interconectados. Por esta razón y según un dato que recoge la Norma Francesa para hormigones UHPC (NF P 18-470, 2016) es que la permeabilidad al oxígeno para el HMARRF es mil veces inferior que para el HC.

Es por ello, que la elevada durabilidad, se traduce en una vida útil más larga del material y de la estructura, acompañada de escasos e incluso nulos requisitos de mantenimiento, y de bajos recubrimientos de la armadura embebida, en caso de necesidad de armadura, todo esto en caso de que no haya percances, como pueden ser fisuras por desprendimientos, se traduce en un ahorro económico a medio y largo plazo.

### 2.3.2.5. Otras propiedades.

#### MÓDULO DE YOUNG

En estos novedosos hormigones, el rango del módulo de elasticidad se encuentra en un intervalo de 40-50 GPa, pudiéndose alcanzar los 60 GPa añadiendo en la dosificación árido grueso de alta resistencia. La Recomendación Francesa, recomienda coger un valor medio de 55 GPa.

#### RETRACCIÓN.

Primero se va a proceder a describir las distintas retracciones que se producen durante el endurecimiento del hormigón:

Retracción de secado: es aquella que se produce en los 20 días iniciales, y esto se produce debido a la disminución de la presión capilar en los poros a consecuencia de la evaporación de parte del agua al medio.

Retracción autógena: es aquella que se produce debido a las reacciones de hidratación del binder, y dan lugar a un volumen de productos inferior al volumen de reactivos. Esta retracción, también es conocida como retracción química o autodesecación. Es importante destacar que es gracias a la presencia de fibras, no se produce fisuración a edades tempranas en el hormigón.

La retracción en este tipo de hormigones es autógena y se puede conseguir incluso eliminarla casi por completo con un simple tratamiento térmico, así es como lo indica la Norma Francesa para hormigones UHPC (NF P 18-470, 2016)

#### DENSIDAD.

En cuanto a esta propiedad, en este tipo de hormigones, se encuentra muy por encima de los hormigones convencionales, oscila entre 2320-2760 Kg/m<sup>3</sup>. En comparación con el acero, la densidad del hormigón es del orden de un tercio menor, y su resistencia a compresión característica es muy similar, lo que lo convierte en un material cuyo desarrollo ofrece una amplia gama de nuevas posibilidades.

## TRATAMIENTO TÉRMICO.

Los tratamientos térmicos, son muy útiles en este tipo de hormigones, ya que se consigue mejorar muchas propiedades. Por ejemplo, durante el tratamiento térmico, el humo de sílice se hidrata antes, por lo tanto, la adquisición de resistencias es mucho más rápida y la porosidad capilar y la interconexión entre poros se ven reducidas de modo que obtiene un material con una mayor vida útil. Hay que destacar que los hormigones que son tratados hasta 14 veces adquieren un 42 % más en cuanto a las características resistentes.

## FLUENCIA.

Para hormigón de estas características se adopta un coeficiente de fluencia para tiempo infinito de 0,78 mientras que para un hormigón convencional esta cifra oscila entre 2 y 4. Para los hormigones HMARRF tras la aplicación de un tratamiento térmico el coeficiente de fluencia es capaz de reducirse hasta 0,2.

## FATIGA.

En cuanto a esta propiedad, el fallo por ciclos de carga y descarga está bien cubiertas en estos hormigones, gracias a la colaboración de las fibras que consiguen que al fisurarse el hormigón no pueda propagarse la fisura, cabe destacar que esta propiedad es una propiedad importante que tener en cuenta en este tipo de hormigones ya que puede llegar a ser un criterio importante en los diseños para estructuras de este tipo de materiales.

## RESISTENCIA AL FUEGO

Una medida que se puede utilizar para poder mejorar la resistencia al fuego, es la siguiente, si se emplean un total de 0.6 % del volumen total en volumen de fibras del tipo polipropilenos, conseguiremos que la porosidad se reduzca, evitando así que el vapor de agua circule por el interior, por ello es necesario la utilización de fibras poliméricas para que en caso de que el calor pueda derretirlas, estas formen cavidades y eviten así que se produzca la destrucción del hormigón.

## ESTÉTICA

Es importante destacar que los hormigones de muy alto rendimiento reforzados con fibra de vidrio suponen un gran avance para poder obtener soluciones de elementos más esbeltos y ligeros, así como de estructuras que sean mejores estéticamente, y puedan dejarse de

lado los tópicos de que las estructuras de hormigón han de ser pesadas y robustas como sucede en el caso de hormigón convencional. Como conclusión, puede obtenerse que la mejora estética a favor de estos hormigones es el resultado de un aumento considerable de su resistencia, su baja porosidad, y su elevada compacidad, pudiéndose así evitar las dimensiones elevadas necesarias para poder cumplir los requisitos de recubrimiento que han de darse en los hormigones convencionales. Por último, hay que destacar la capacidad autocompactante de este tipo de hormigones, que puede proporcionar acabados superficiales de muy alta calidad.

### **3. Características específicas del material a emplear.**

Estos tipos de hormigones tal y como se ha comentado con anterioridad, suelen ser suministrados en sacos de aproximadamente 25 Kg, este tipo de hormigón es suministrado por marcas registradas, que han patentado este tipo de hormigones, para su puesta en obra resulta bastante sencillo.

Para poder realizar la rehabilitación del forjado se ha escogido un hormigón de una marca registrada del tipo hormigón HPC, el producto seleccionado tal como dispone la marca y vende su producto, disponen de todas las características del producto. La propia marca ha desarrollado un software de cálculo para poder saber con certeza la cantidad necesaria del producto a poner en obra, los cálculos cumplen con las normas CNR DT 204/2006, NTC 2008 y el EUROCÓDIGO 2. Este tipo de softwares, han sido creado precisamente por las marcas para poder vender de una forma más segura el producto.

Tal y como asegura el suministrador es perfecto para la utilización en reparación y refuerzo de estructuras horizontales cuyos espesores o particulares estados de degradación exijan la utilización de morteros fluidos de elevadas prestaciones.

En cuanto a sus características técnicas se trata de un mortero premezclado, en polvo, compuesto por cementos de alta resistencia, áridos seleccionados, aditivos especiales y fibras rígidas de acero, según una formulación desarrollada en los Laboratorios de I+D de la marca. Las fibras empleadas en el producto se tratan de fibras rígidas conformadas, de acero latonado.

El hormigón HPC de la marca, mezclado con agua, se transforma en un mortero fluido, idóneo para su aplicación mediante vertido en encofrado, sin riesgo de segregación, en espesores comprendidos entre 1 y 4 cm, sin ayuda de malla electrosoldada.

Para permitir un correcto y completo desarrollo de los fenómenos expansivos, debe de fraguar en un ambiente húmedo, condición ésta que, sin embargo, es difícil de garantizar en la obra.

Las características de este material son las siguientes:

- Densidad aparente 1.400 Kg/m<sup>2</sup>
- Temperatura de aplicación permitida: de +5°C a +35°C
- La duración de la mezcla es de aproximadamente 1 hora a una temperatura de +20°C
- Resistencia a compresión según EN 12190 es superior a 130 MPa después de 28 días
- Resistencia a flexión según EN 196/1 es superior a 32 MPa después de 28 días
- Resistencia a tracción según BS 6319 es de 8,5 MPa después de 28 días
- Módulo elástico a compresión según EN 13412 es de 38 GPa después de 28 días
- Adherencia al hormigón según EN 1542 superior a 2 MPa después de 28 días
- Consumo por cm de espesor es de aproximadamente 21 Kg/m<sup>2</sup>

El producto tal y como se ha mencionado en el apartado 2 en lo referente a los hormigones de altas prestaciones, ofrece en forma de sacos todo ya preparado para su fácil colocación en obra, con el fin de realizar los trabajos de rehabilitación sin tener un gran conocimiento de la materia. Es por esta razón que los precios del material son bastante mayores a los precios en los que se puede fabricar realmente este tipo de hormigones con estas características en su dosificación, tal y como puede comprobarse en la valoración económica realizada tanto para este tipo de material como lo que costaría fabricarlo en una central.

Es importante destacar que el precio de estas marcas patentadas suele ser muy superior al que realmente costaría de fabricar un hormigón de estas características en una central de hormigón.

## 4. Cálculo de la solución adoptada

### 4.1. Cálculo de espesor de HMAR necesario.

Resistencia a tracción de las barras de acero.

$$T = A * F_{yk} = \pi * 3^2 * 500 * 2 = 15 \text{ kN}$$

$$T = A * F_{yk} = \pi * 4^2 * 500 * 2 = 25 \text{ kN}$$

$$\text{Resistencia a tracción resistida} = 2 * 15 + 25 = 55 \text{ kN}$$

Espesor necesario del hormigón para poder resistir la fuerza de tracción producida por las barras de acero en una sección de ancho 70 cm.

$$\text{Espesor necesario para resistir las tracciones} = \frac{55 * 1000}{700 * 5} = 16 \text{ mm}$$

Una vez se ha obtenido las características del forjado y el espesor mínimo de hormigón HMAR para poder asegurar que puede resistir los momentos generados por las acciones, se procede a verificar la resistencia seccional del forjado, también denominado como autorización de uso con el fin de asegurar un correcto funcionamiento del forjado.

Para proceder a la realización de esta autorización de uso, se procede a elaborar una hoja Excel, programada para poder asegurar que el forjado mixto cumpla con las especificaciones mínimas. Esta parte de cálculo ha sido la más laboriosa de los cálculos del forjado. Puesto que este tipo de forjados mixtos ya no suelen emplearse para la realización de forjados de nueva construcción, en las normativas no viene reflejado como poder proceder a realizar el cálculo con un forjado compuesto por dos materiales distintos pero resistiendo cargas en conjunto.

### 4.2. Autorización de uso del forjado metálico.

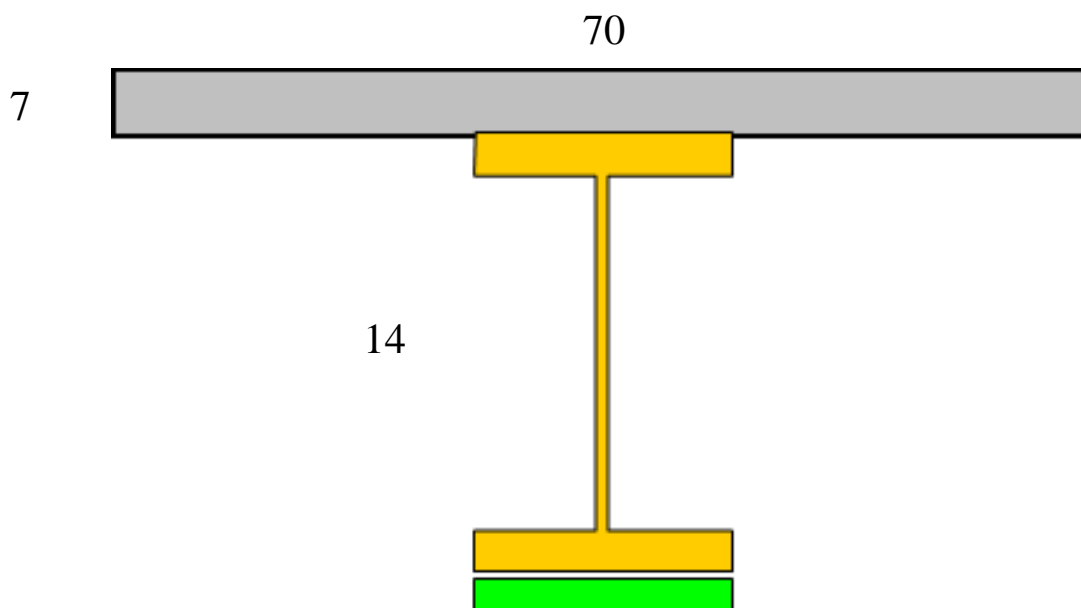
El coeficiente máximo de deformación para una flecha máxima es de 1/300.

Se parte de la siguiente base para la sección más desfavorable:

- L (Luz): 5,2 metros
- T (Espesor de capa de compresión): 7 cm
- S (Separación entre vigas): 70 cm

- Perfil de las viguetas: IPN 140
  - **I** (Inercia):  $574 \text{ cm}^4$
  - **W** (Módulo resistente):  $82 \text{ cm}^3$
  - **A<sub>v</sub>** (Sección efectiva a cortante):  $27 \text{ cm}^2$
  - **A** (Área):  $18,3 \text{ cm}^2$
  - **W<sub>ms</sub>** (Momento estático en medio de la sección):  $47,7 \text{ cm}^3$

A continuación, se resume en un pequeño croquis la sección con sus dimensiones en cm:



*Figura 7. Croquis de la sección del forjado estudiado, cotas en centímetros. (Fuente: elaboración propia)*

Para las características de los materiales se emplean los siguiente valores:

#### **Acero laminado**

$$E_s \text{ (módulo de elasticidad)} = 21.000 \text{ kN/cm}^2$$

$$f \text{ (tensión máxima segura a flexión)} = 18 \text{ kN/cm}^2$$

$$f_v \text{ (tensión máxima segura a cortante)} = 10,4 \text{ kN/cm}^2$$

### Hormigón

$$E_c \text{ (módulo de elasticidad)} = 3.000 \text{ kN/cm}^2$$

$$f \text{ (tensión de servicio a compresión)} = 1 \text{ kN/cm}^2$$

$$n (E_s/E_c) = 7$$

Por una parte se obtendrán las características de la sección únicamente contabilizando el acero y posteriormente se realizará mediante el cálculo para un comportamiento mixto al 100%.

Para poder obtener el valor de carga máxima resistida se definirá como el valor mínimo de la carga resistida de las siguientes restricciones:

Por deformación máxima (**Flecha 1/300**):

$$Def \text{ máx} : \frac{0,0001 * 77 * E_s * I}{300 * S * L^3} = 3,3 \frac{kN}{m^2}$$

Por resistencia a momento:

$$Resist, mto : \frac{0,01 * 8 * W * f}{S * L^2} = 6,5 \frac{kN}{m^2}$$

Por resistencia a cortante:

$$Resist. V : \frac{2 * A_v * f_v}{S * L} = 158,3 \frac{kN}{m^2}$$

Por lo tanto, el valor máximo de carga resistida es de 3,3 kN/m<sup>2</sup>

Una vez obtenidos los valores para la parte resistente del acero únicamente, se obtiene para un comportamiento de la viga con una cabeza de hormigón.

Con estos datos obtenidos de un prontuario se obtiene la una anchura equivalente del hormigón será de:

$$Seq: 100 * \frac{S}{n} = 10 \text{ centímetros}$$

La cota inferior al centro de gravedad de la sección será de:

$$Z_{inf}: \frac{As * \frac{h}{2} + Seq * T * \left(\frac{T}{2} + h\right)}{As + Seq * T} = 15,3 \text{ centímetros}$$

Para el cálculo de la inercia equivalente del hormigón se procede a realizar el siguiente procedimiento:

$$I_{eq}: \frac{Seq * T^3}{12} = 286 \text{ cm}^4$$

Una vez obtenida las diferentes partes que conforman la sección, se procede a realizar el cálculo de la sección reforzada, para ello se obtiene primeramente la Inercia de la sección reforzada:

$$I_r: I_{eq} + I + Seq * T * \left(h + \frac{t}{2} - Z_{inf}\right)^2 + As * \left(Z_{inf} - \frac{h}{2}\right)^2 = 2.458 \text{ cm}^4$$

El módulo resistente de la sección reforzada será el siguiente:

$$W_r: \frac{I_r}{Z_{inf}} = 160 \text{ cm}^3$$

Para obtener la distancia al centro de gravedad desde la parte inferior, se obtiene que:

$$Z: \frac{I_r}{\frac{W_{ms} * Z_{inf}}{\frac{h}{2}}} = 23,5 \text{ cm}$$

Por ello para una resistencia de carga en servicio necesaria **Q** de 10,1 kN/m<sup>2</sup>, obtenida realizando la combinación de acciones para estado límite de servicio.

Por ello el rasante máximo (**V/z**) con sección mixta el 100% se obtendrá que:

$$\frac{V}{z}: \frac{100 * Q * S * L}{2 * z} = 76,6 \frac{kN}{m}$$

Una vez se obtienen estos datos, se obtiene la fracción para incrementar la inercia, y la fracción para incrementar el momento:

$$\% \text{ incrementar inercia} : 1 - \frac{Def \text{ máx}}{q} = 67\%$$

$$\% \text{ incrementar momento} : 1 - \frac{Resist. mto}{q} = 36\%$$

Para obtener el grueso de referencia inferior equivalente, se escogerá el valor máximo de porcentaje a incrementar de la inercia puesto que es el mayor.

Grueso de referencia inferior equivalente:

$$T_{inf. equiv.} : \frac{(0,67 * 10 * Seq * T)}{14} = 33,5 \text{ mm}$$

Al igual que sucede en el anterior caso con el acero trabajando únicamente se tiene que:

Para poder obtener el valor de carga máxima resistida se definirá como el valor mínimo de la carga resistida de las siguientes restricciones:

Por deformación máxima (**Flecha 1/300**):

$$Def \text{ máx} : \frac{0,0001 * 77 * Es * Ir}{300 * S * L^3} = 14,3 \frac{kN}{m^2}$$

Por resistencia a momento:

$$Resist, mto : \frac{0,01 * 8 * Wr * f}{S * L^2} = 12,7 \frac{kN}{m^2}$$

Por resistencia a cortante:

$$Resist. V : \frac{2 * Av * fv}{S * L} = 158,3 \frac{kN}{m^2}$$

Por lo tanto, el valor máximo de carga resistida es de 12,7 kN/m<sup>2</sup>

Al ser la carga máxima con refuerzo de 12,7 kN/m<sup>2</sup> mayor a la carga de servicio necesaria a resistir se puede afirmar que la sección mixta al 100% resiste la carga de servicio necesario, además, para poder asegurar la nueva capa de compresión de HMAR no

necesita de pernos conectores para la resistencia tangencial se calcula el total de conectores en L/4.

Para poder comprobar la resistencia a rasante del hormigón se cogen como resistencia a rasante de 0.2 Mpa, repartida durante toda la superficie se crea un conector equivalente de hormigón de 70 cm de anchura.

La resistencia de conectar a cortante será de:

$$\text{Resist conector a cortante} : 0,1 * f_s * 0,67 * 100 * 700 = 469 \text{ kN}$$

Sección en contacto con el hormigón:

$$\text{Sección en contacto con el hormigón} : \frac{\text{Resist conector a cortante}}{1} = 469 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Por ello se procede a realizar el cálculo del total de conectores necesarios:

$$\text{TOTAL DE CONECTORES EN L/4} : \frac{0,67 * 0,75 * \frac{V}{Z} * L}{4 * 1017,7} = 0$$

Con todo esto y tras poder afirmar que el valor máximo de la carga resistida es superior al valor de la carga q en estado límite de servicio, se puede afirmar que para un forjado con canto de 7 cm el forjado mixto resiste, y para el caso de inclusión de una capa de 2cm al forjado actual de HMAR no sería necesario introducir conectores.

A continuación, se ha procedido a calcular el número de conectores que serían necesario en el caso de colocar una nueva capa de compresión para anclar la capa de compresión a las viguetas metálicas.

Para un conector tipo de 10 mm de diámetro y una resistencia a cortante de 10 kN/cm<sup>2</sup> se obtiene lo siguiente

$$\text{Resist conector a cortante} : 0,1 * f_s * 0,67 * 10^2 * \frac{\pi}{4} = 5,3 \text{ kN}$$

$$\text{Sección en contacto con el hormigón} : \frac{\text{Resist conector a cortante}}{1} = 5,3 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$TOTAL DE CONECTORES EN \frac{L}{4} : \frac{0,67 * 0,75 * \frac{V}{Z} * L}{4 * 5,3} = 9 \text{ ud}$$

$$Separación en apoyos : \frac{25}{L * TOTAL CONECTORES} = 5,3 \frac{kN}{m^2}$$

Con todo esto, se obtiene que los valores de recrecimiento en el caso del HMAR o bien la colocación de la nueva capa de compresión son aceptables para su funcionamiento en cuanto a nivel seccional, con ello se ha verificado que tanto la alternativa 3 cumple con las restricciones tanto en el análisis general como en el análisis seccional.

## 5. Comparación con respecto a la Alternativa 1.

En el actual apartado del presente anejo, se va a proceder a realizar una comparación con la alternativa 1 puesto que es la que más próxima se ha quedado en el análisis multicriterio realizado en el apartado anterior, la cual consta de la demolición de la actual capa de compresión y de la colocación de una nueva de 7 centímetros de espesor.

Tras realizar un análisis exhaustivo en el cálculo y comprobar que ambos forjados son aptos, uno con armaduras pasivas y otro únicamente con el beneficio de la capa de compresión de 2 centímetros de espesor, puede llegarse a la conclusión siguiente:

- Al tener en funcionamiento el mismo espesor de hormigón sobre las viguetas metálicas no se aplicará en la alternativa 3 un mayor peso sobre el forjado por lo tanto podrá resistir los esfuerzos.
- Al tener una resistencia a compresión características superior a los 150 Mpa la capa inferior deteriorada ya no deberá soportar las acciones puntuales en su superficie al transferirse de manera más equitativa en toda la masa de hormigón existente.
- La no necesidad de colocación de armadura de negativos en la capa de HMAR supone tanto una disminución de los plazos como de la cantidad de gente durante su ejecución
- Al presentar una consistencia fluida, el hormigón podría sellar las posibles fisuras que hubiera en el hormigón existente y así reforzar y asegurar la continuidad en la transferencia de esfuerzos en la capa de compresión inferior

- Al ser un hormigón con una capacidad con mayor resistencia y compacidad podría ser beneficioso para los materiales que se ubiquen debajo puesto que evitaría infiltraciones de agua al no estar conectados los poros entre sí, además al tener la misma densidad que un hormigón convencional y tener el mismo espesor de capa de compresión global no se añadiría peso extra a las viguetas.
- El hormigón HMAR es capaz de resistir las tracciones producidas por los momentos negativos y al contar con una capa de compresión existente con malla electrosoldada y pernos de anclaje la resistencia a tracción que pudiera soportar el forjado en su conjunto sería mayor incluso que si se colocase una capa de compresión de hormigón convencional HA-25 con malla electrosoldada de 7 centímetros.

## 6. Colocación y puesta en obra.

Este tipo de hormigones presentan muchas facilidades de puesta en obra, al ser hormigones de resistencia fluida, su colocación se realiza de forma mucho más rápida. No solo en cuanto a su colocación, ya que este tipo de material puede ser amasado en obra puesto que la dosificación ya viene realizada, a falta de agua para poder realizar la colocación en obra en caso de venir en sacos preparados.

Otro aspecto característico a destacar es que sus características mecánicas, ayudan a que su colocación sea más rápida ya que suelen colocarse espesores de capa menores, y la no necesidad de colocación de una malla electrosoldada, lo que supone una disminución del número de operarios además de ser mucho más rápido. En cuanto a la vida útil del material puede asegurarse que presentan durabilidades mayores, ya que al tener una matriz cementosa muy compacta evita la entrada de humedad y proteger así a las capas inferiores de posibles ataques químicos que pudieran reducir la vida útil de la estructura.

Por ello, para la realización de la rehabilitación del forjado, puesto que los muros de carga iniciales han de ser demolidos, se procederá del siguiente modo:

Inicialmente, se procederá a apear el forjado a rehabilitar, para posteriormente demoler la cubierta, para así poder tener al aire libre y poder conseguir así el acceso de la torre grúa para realizar las demoliciones posteriores.



*Figura 8. Desmontaje de la cubierta. (Fuente: Elaboración propia)*

Una vez se haya retirado la cubierta, se procederá a realizar las demoliciones de los tabiques y de los muros de carga existentes en el forjado de la primera planta de la antigua prisión provincial de Murcia que pueden apreciarse en los planos de demoliciones a realizar correspondiente en el Plano 05.



*Figura 9. Demolición de las particiones interiores. (Fuente: Elaboración propia)*

Tras la realización de las demoliciones de la primera planta, se procederá a demoler los muros de carga existentes en la planta baja de la siguiente manera, los muros de carga se demolerán primero en las zonas donde se ubicarán los nuevos pilares de la estructura.

Las demoliciones a realizar en la planta baja pueden verse en el plano de demoliciones a realizar en planta baja, ubicado en el Plano 06



*Figura 10. Demolición de las particiones interiores en forjado de planta baja (forjado de planta primer oculto). (Fuente: Elaboración propia)*

Tras este proceso de demoliciones, se procederá a realizar la cimentación de los futuros pilares, para su posterior ubicación, y con ello poder colocar las vigas que sustentarán al forjado de primera planta.



*Figura 11. Ejecución de vaciados para el refuerzo de cimentaciones. (Fuente: Elaboración propia)*



*Figura 12. Ejecución de las vigas de atado y de las zapatas. (Fuente: Elaboración propia).*

Una vez realizadas las cimentaciones, se procederán a colocar los nuevos pilares, que serán de perfiles de acero laminados en caliente, tras este proceso se procederá a colocar las vigas que soportarán el peso del forjado de primera planta.



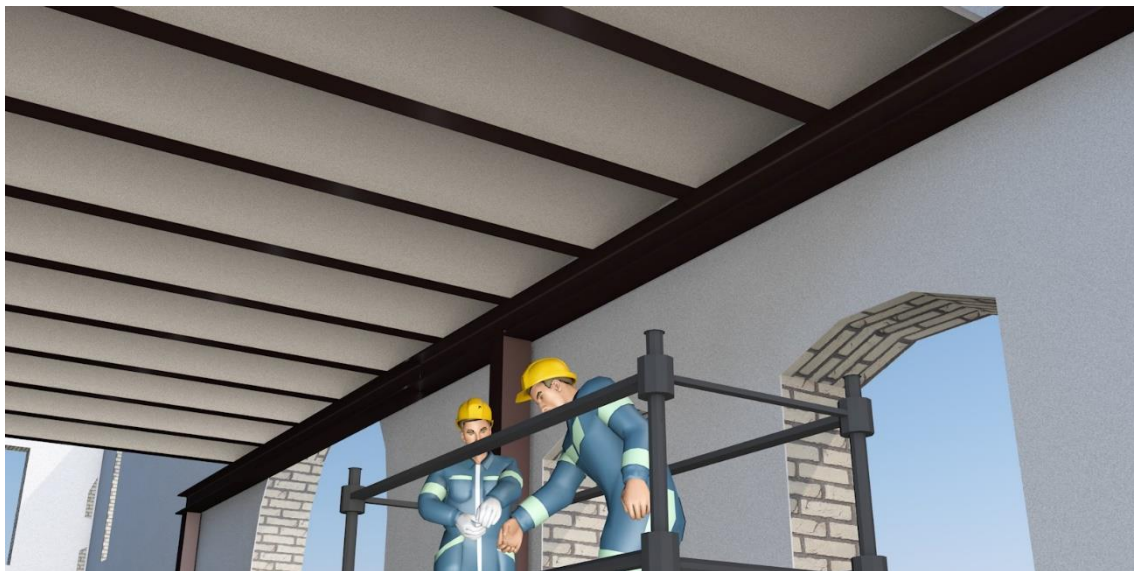
*Figura 13. Colocación de los pilares metálicos. (Fuente: Elaboración propia)*

Tras este proceso, se procederá corrección de las patologías localizadas tal y como aparece en el plano Patologías del Forjado, para posteriormente, proceder a la colocación de la capa de Hormigón UHPC, que en caso de ser el producto comercial se realizará directamente con una amasadora, tras esto, se procede a realizar la descarga del forjado sobre las vigas, y retirar los apeos utilizados para realizar la capa del nuevo hormigón. Tras este proceso en el cual el número de trabajadores se reduce considerablemente con respecto a las técnicas de rehabilitación convencionales de los forjados, ya se tendría el forjado para su uso, además al tratarse de hormigones autonivelantes, el firme quedaría en perfectas condiciones para la colocación del solado.



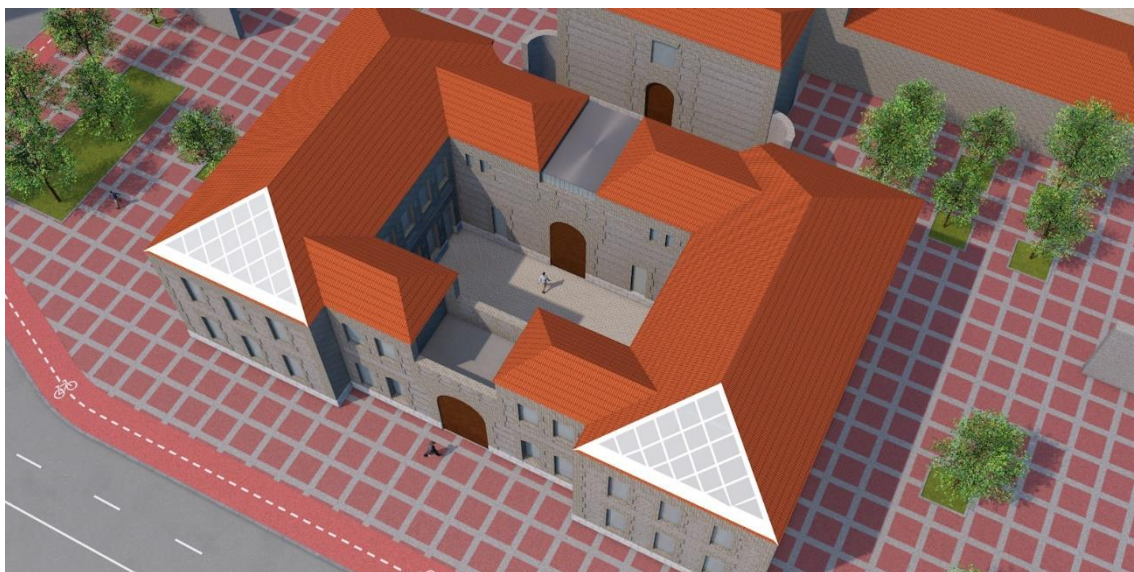
*Figura 14. Ejecución del refuerzo de la capa de compresión con hormigón UHPC (Fuente: Elaboración propia).*

Tras este proceso, se realizará el pintado de las viguetas del forjado con pintura ignífuga para evitar el deterioro acelerado de la estructura en caso de incendio, así como del enlucido de la cara inferior en la zona abovedada para conservar la estética inicial del edificio. Una vez se haya realizado esto, se procederá a la realización de la tabiquería y a la colocación del solado.



*Figura 15. Colocación de solado y acabados de la cara inferior del forjado de primera planta. (Fuente: Elaboración propia)*

Con todo ello, se procedería a la colocación de la cubierta, quedándose el estado definitivo de la siguiente manera.



*Figura 16. Estado final del edificio de la antigua prisión provincia de Murcia. (Fuente: Elaboración propia).*

## **7. Conclusión**

Tras analizar este material, aunque parezca novedoso, lleva mucho tiempo utilizándose, pero su práctica no se ha extendido todo lo rápido que debería de haber sido, ya que este tipo de hormigones no solo presenta beneficios mecánicos, si no, que también es un gran avance para su durabilidad.

Tal y como se ha podido comprobar el número de trabajadores durante la ejecución de la rehabilitación se reduce, por lo tanto, también se reduce el coste de personal, y aun reduciendo el coste del personal, al ser hormigón autocompactante se reparte muy bien por la superficie, y el acabado es mucho mejor que si se realizara con técnicas convencionales.

Por ello, se ha considerado que es una de las mejores opciones en cuanto a técnicas de rehabilitación para elementos horizontales.

Por ello tal y como se ha comentado en el apartado anterior del estado del arte, las características de estos hormigones, que se han estudiado en la Universitat Politècnica de Valencia, podrían presentar incluso resistencias mayores a las que se dan tal y como se ha comentado anteriormente.

En la actualidad, en las plantas de fabricación de hormigón no se ha extendido la fabricación de estos hormigones, no así en el caso de las plantas de prefabricados de hormigón donde se suele utilizar hormigones con prestaciones mayores a los convencionales. Además de lo comentado anteriormente, es interesante destacar que estos hormigones no sirven únicamente para la rehabilitación, sino que debido a las características mecánicas que aporta se podrían reducir en gran cantidad los volúmenes de hormigón para conseguir prestaciones similares. Por ello es interesante que se fomente el uso de este tipo de hormigones, así como la inclusión o realización de una normativa, o bien una recomendación española que sirva de guía para poder promover el uso de este tipo de hormigón siempre amparado en alguna norma.

## 8. Referencias.

- Norme française NF P 18-470, 2016. Bétons fibrés à Ultra Hautes Performances, 2016
- Proyecto fin de carrera. “Hormigones de Altas Prestaciones”. Por D. David Martínez Ponce.
- Contratación Ayuntamiento de Murcia, 2019. Disponible en: <https://contratacion.murcia.es/> [consultado 18.07.2019]
- Catálogo de características MAPEI HPC
- Bétón fibré ultra-performant (BFUP): Matériaux, dimensionnement et exécution, fprSIA 2052, 2014.