



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Trabajo final de grado

Anejo de Cálculo

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:

Anejo de Cálculos:	3
1. Hormigón de muy alto rendimiento.	4
1.1 Introducción:	4
1.2 Modelo estructural.....	4
1.3 Fases constructivas del forjado y consideraciones:	4
4.1 Acciones consideradas.	5
4.2 Combinación de acciones.....	6
4.3 Estudio de soluciones geométricas:	7
4.4 Justificación de la geometría adoptada:	8
4.5 Geometría:	9
4.5.1 Requerimientos Geométricos por Durabilidad:	9
4.5.1.1 Clase de Exposición:	9
4.5.1.2 Recubrimiento mínimo:	10
4.5.1.3 Recubrimiento nominal:.....	11
4.5.2 Propiedades geométricas:.....	12
4.5.2.1 Sección solo con HMAR (fases constructivas 1, 2 y 3):	12
4.5.2.2 Sección mixta hormigón de muy alto rendimiento y hormigón convencional:	12
12	
4.6 Estado límite de Servicio.	13
4.6.1 Pérdidas de pretensado	13
4.6.1.1 Pérdidas iniciales del pretensado:.....	14
4.6.1.2 Pérdidas diferidas del pretensado	14
4.6.2 Limitación tensional, control de fisuración:	16
4.6.3 Cálculo de tensiones en servicio:	17
4.6.3.1 Método para el cálculo de esfuerzos	17
4.6.3.2 Método para el cálculo de tensiones en servicio.....	18
4.6.3.3 Tensiones y esfuerzos en la fase constructiva 1:	19
4.6.3.4 Tensiones y esfuerzos en la fase constructiva 2:	22
4.6.3.5 Tensiones y esfuerzos en la fase constructiva 3.	25
4.6.3.6 Tensiones y esfuerzos en la fase constructiva 4.	28
4.6.3.7 Tensiones en la fase constructiva 5.....	31
4.6.4 Flecha.	34
4.6.4.1 Cálculo de flecha:	34



4.7	Estado Límite último	35
4.7.1	ELU Tensiones normales.	36
4.7.1.1	Armadura de la losa de compresión.	38
4.7.2	ELU Tensiones tangenciales.	39
4.7.2.1	ELU Tensiones tangenciales: Cortante.	39



Anejo de Cálculos:

En este anejo, se van a justificar todos los cálculos realizados para el dimensionamiento del forjado de Hormigón de Muy Alto rendimiento y las comprobaciones realizadas por el CYPE de la estructura metálica que sostiene a las tres alternativas.

1. Hormigón de muy alto rendimiento.

1.1 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.

1.2 Modelo estructural.

A la hora de modelizar el forjado de hormigón de muy alto rendimiento, se tiene en cuenta que los nervios del forjado van a actuar como si fueran elementos lineales. Se va a aplicar la teoría de vigas. En la zona de apoyos sería necesario realizar un estudio detallado de bielas y tirantes, pero siendo que este trabajo es un estudio previo, y no un diseño definitivo queda fuera del alcance del trabajo.

El modelo estructural adoptado es una viga biapoyada de 5m de longitud.

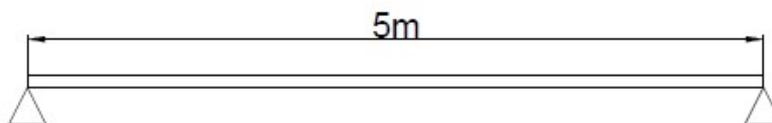


Ilustración 1: Modelo estructural de la alternativa de hormigón de muy alto rendimiento

1.3 Fases constructivas del forjado y consideraciones:

Antes de establecer las acciones a las que va a estar sometido el forjado es necesario determinar cuáles van a ser las fases constructivas de este.

1. Hormigonado de la parte de HMAR y tesado:

En esta primera fase, la sección resistente es únicamente la parte de hormigón de muy alto rendimiento. Las acciones consideradas son el pretensado característico inicial y el peso propio del hormigón.

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.

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

En esta fase de la vida útil del elemento, las acciones no cambian (PPviga y pretensado característico inicial) pero es necesario tener en cuenta, que el elemento va a estar durante 28/30 días en el parque de vigas antes de su transporte a la obra.

En este tiempo, el hormigón ya ha comenzado el proceso de retracción. Como vemos en la figura 1.6 de las recomendaciones de la AFGC-SETRA¹, la mitad del acortamiento que sufre el hormigón debido a la retracción se da en este primer mes en que las vigas están en el parque de vigas. Esto implica que en este punto el pretensado ya ha sufrido unas pérdidas, siendo necesario calcular como varían las tensiones.

La sección resistente sigue siendo la de HMAR y el esquema estructural se pretende que sea biapoyado, tal y como va a serlo en la situación definitiva. Con ello, se busca que los esfuerzos en situaciones intermedias no sean muy diferentes de los de la situación definitiva y así evitar añadir refuerzos o pretensado que no estén trabajando óptimamente una vez se pasa al esquema estructural definitivo. Para conseguir esto, es necesario que el elemento siempre esté apoyado únicamente en dos puntos. Las operaciones de izado se realizarán con dos puntos de anclaje en los extremos y el almacenamiento se hará apoyado sobre tacos de madera también colocados en los extremos del elemento. La distancia entre los enganches para el izado y los tacos debe ser próxima a los cinco metros que es la luz definitiva.

3. 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.

4. 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.

1.4 Acciones consideradas.

Acciones en la primera fase constructiva:

Acción	Valor
PP _{HMAR}	0,6315 kN/m

$P_{inicial}$	102,88 kN
---------------	-----------

Acciones en la segunda fase constructiva:

Acción	Valor
$\Delta P, dif, 1$	-7,83 kN

Acciones en la tercera fase constructiva:

Acción	Valor
PP (Losa)	1,05 kN/m

Acciones en la cuarta fase constructiva:

Acción	Valor
CM	1,26 kN/m
SU	2,1 kN/m

Acciones en la quinta fase constructiva:

Acción	Valor
$\Delta P, dif, 2$	- 7,45 kN

1.5 Combinación de acciones.

A continuación, se van a plantear las distintas combinaciones de acciones que se han tenido en cuenta a lo largo del trabajo y los coeficientes de combinación que se han utilizado según el CTE³.

- **Estado Límite Último.**
Situaciones persistentes o transitorias.

$$\sum \gamma_g G + \sum \gamma_{g^*} G^* + \gamma_P P + \gamma_Q Q_1 + \sum \gamma_Q Q \psi_0$$

- **Estado Límite de Servicio.**
Poco Probable o Característica.

$$\sum \gamma_g G + \sum \gamma_{g^*} G^* + \gamma_P P + \gamma_Q Q_1 + \sum \gamma_Q Q \psi_0$$

Frecuente:

$$\sum \gamma_g G + \sum \gamma_{g^*} G^* + \gamma_P P + \gamma_Q Q_1 \psi_1 + \sum \gamma_Q Q \psi_2$$

Coefficientes de combinación:

Acción	γ ELS	
	Favorable	Desfavorable
Permanentes	1	1
Variables	0	1
Pretensado	0,95	1,05

Acción	γ ELU	
	Favorable	Desfavorable
Permanentes	1	1,35
Variables	0	1,5
Pretensado	1	1

1.6 Estudio de soluciones geométricas:

Con tal de lograr que el trabajo del HMAR sea adecuado a su naturaleza, Al principio del trabajo, se barajaron varias opciones de geometría.

Como parece lógico, estas soluciones se basaron en algunas tipologías ya existentes, sustituyendo con hormigón de muy alto rendimiento, alguno de sus materiales.

Otros usos de este hormigón han ido orientados a sustituir las vigas del tipo celosía de acero. Por ello, se pensó que sustituir el acero de las chapas colaborantes podría ser una buena opción. Este tipo de chapas consiguen la adherencia chapa-hormigón por medio de unas pestañas que impiden, hasta cierto punto, el deslizamiento entre la chapa y el hormigón.

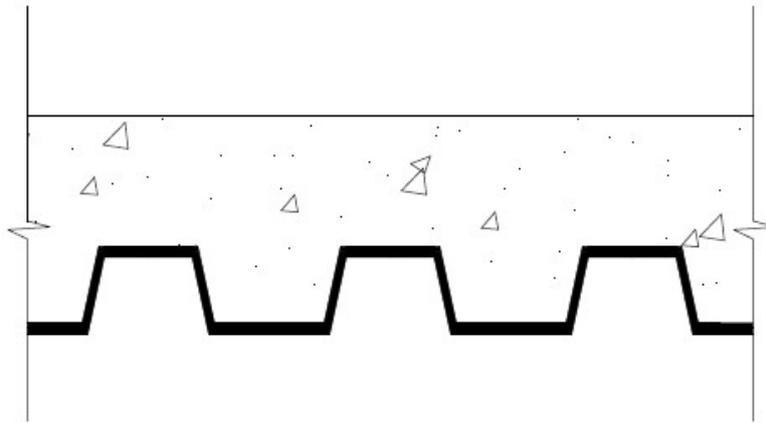


Ilustración 2: Dibujo de Forjado con Chapa colaborante.

Debido a la complejidad de diseñar estas pestañas, se optó por variar un poco el diseño manteniendo la filosofía, que sea el hormigón de muy alto rendimiento el que absorba las tracciones, y posteriormente hormigonar una losa de compresión que sirva para repartir las cargas. Con esta premisa, se pensó en forjados unidireccionales con hormigones en dos fases. Como, por ejemplo, los forjados de viguetas y bovedillas. Estos constan de nervios formados por viguetas pretensadas, aligeramientos, y una losa de compresión.

Para mejorar el comportamiento sin la losa y evitar colocar sopandas durante el proceso constructivo (algo bastante habitual en los forjados de chapa colaborante), se pensó en dotar al elemento de una mayor inercia. Con este fin, se unieron las viguetas con un ala inferior. A parte de incrementar la inercia, se consigue la posibilidad de juntar varias piezas facilitando el proceso de montaje y haciendo que el forjado trabaje solidariamente.

Ampliando el espectro de visión, se puso la vista sobre algunas de las tipologías más utilizadas en las naves industriales de hormigón para resolver forjados intermedios. En este punto, se pensó en los forjados de losas alveolares. Imitando la forma de estos, se diseñó una geometría intentando aprovechar las características del HMAR. Se pensó que dado a que el

comportamiento del nuevo material es mejor en casi todos los aspectos, se podía imitar reduciendo los espesores y aumentando el tamaño de los alveolos, teniendo así una pieza más ligera que presumiblemente iba a cumplir las mismas funciones, incluso mejorando algunas como la durabilidad.

Esta opción se descartó porque los forjados de losas alveolares se hacen con hormigones que tienen una consistencia muy seca, aprovechando esta con unos moldes que avanzan en conjunto con la hormigonera dando la forma a los alveolos. Estos una vez pasa la hormigonera, mantienen su forma y no se desmoronan.

En cambio, el HMAR, es un hormigón auto-compactable, con una consistencia muy fluida, haciendo imposible utilizar esta técnica para la construcción de los alveolos.

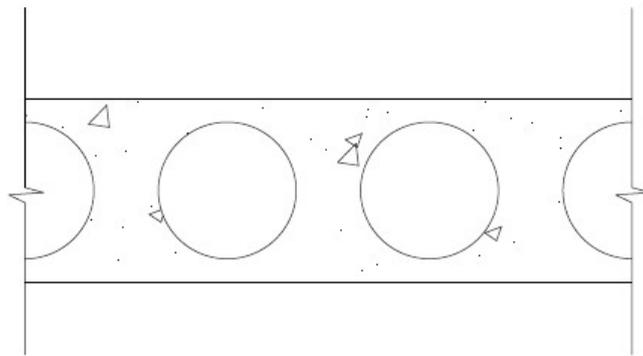


Ilustración 3: Imagen de una losa alveolar

Con toda esta información, se llegó a la conclusión de que la mejor opción era desarrollar la segunda opción, el forjado de “viguetas”.

1.7 Justificación de la geometría adoptada:

La geometría adoptada es similar a la de los forjados tradicionales de viguetas puesto a que se trata de un forjado compuesto por varios nervios.

El intereje entre estos nervios, se ha establecido en 70cm y en una primera aproximación al diseño del elemento, se supuso que el canto total del forjado fuera de 20 cm.

Como en los forjados tradicionales, de losas y de viguetas, se va a añadir una capa de compresión con lo que el forjado tiene un canto de 15+5 cm.

El ancho del alma de la pieza viene condicionado por si resultara necesario añadir armadura de cortante. Se pensó que con un recubrimiento de 30cm y $\phi 12$ como armado de cortante podría ser una opción lógica en caso de que fuera necesario refuerzo por cortante.

El sobreancho de la parte inferior permite que con esta misma geometría se pueda modificar la cantidad de armaduras activas. Con ello, nos permitiría reforzar más o menos la pieza según las necesidades del forjado.

A parte, se pensó que hacer las alas inferiores anchas podría resultar beneficioso para solidarizar una pieza con otra, sin mencionar las mejoras de las características mecánicas que esto supone.

Con todo esto un croquis de la pieza resultante podría ser el siguiente.

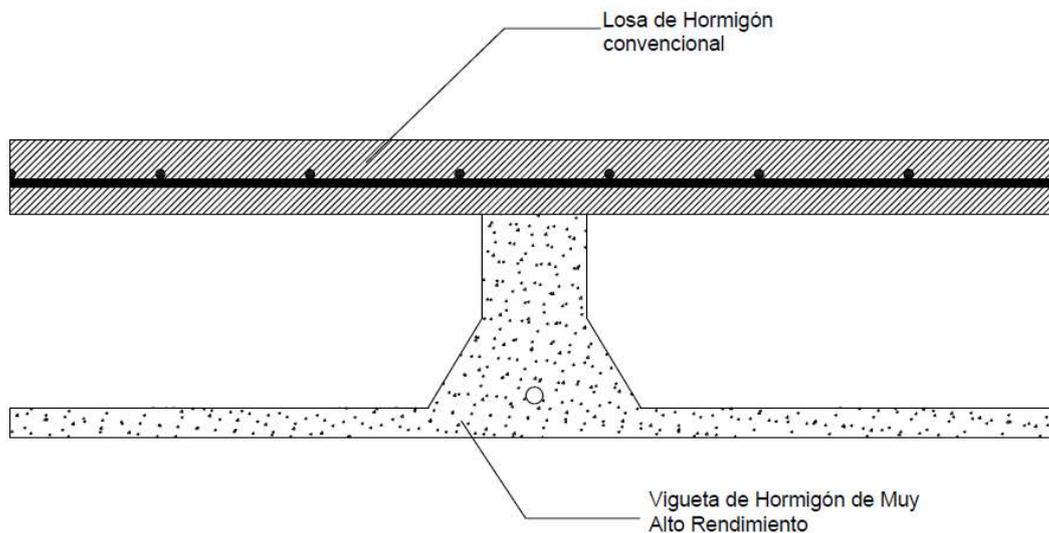


Ilustración 4: Imagen de la geometría adoptada para la alternativa con hormigón de muy alto rendimiento

1.8 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*) y se van a obtener las propiedades geométricas de las secciones en todas las fases constructivas.

1.8.1 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.

1.8.1.1 Clase de Exposición:

Como se ha comentado en el punto anterior, 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 mecánicas⁴”

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.

Para determinar la clase de exposición se ha utilizado las recomendaciones del AFGC (4.2. Condiciones Ambientales), que se basan en el Eurocódigo 2. Como apunta en las recomendaciones, no hay cambios respecto del Eurocódigo 2, excepto los ejemplos informativos de la tabla 4.1 del Eurocódigo.

La clase de exposición resultante es la XC3 Hormigón en el interior de edificios con humedad moderada o alta (Nota 2 del apartado 4.2 de las recomendaciones del AFGC: “Las partes de edificios protegidos de la lluvia (...) deben de ser consideradas XC1, excepto partes expuestas a una condensación alta por la frecuencia o permanencia en el tiempo que deben ser clasificadas como XC3. Este es el caso de ciertas partes de (...) Naves industriales¹”). Debido a la proximidad del mar, la humedad en el ambiente es considerable.

En esta clase de exposición, el peligro de corrosión viene dado por el proceso de carbonatación del hormigón que provoca que este pierda su carácter básico dejando las armaduras desprotegidas.



Ilustración 5: Vista aérea de Puerto de Sagunto. (Fuente: Google Earth)

1.8.1.2 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 mínimo¹

Este, debe satisfacer el recubrimiento debido a las condiciones ambientales, el requerido para una correcta transmisión de esfuerzos hormigón-armadura y para que el vertido del hormigón se realice correctamente.

$$c_{\min} = \max (c_{\min, \text{bond}}; c_{\min, \text{dur}} + \Delta c_{\text{dur}, \gamma} - \Delta c_{\text{dur}, \text{st}} - \Delta c_{\text{dur}, \text{add}}; c_{\min, \text{p}}; 10\text{mm})$$

- Recubrimiento debido a las condiciones de colocación del hormigón ($c_{\min, p}$)

$$c_{\min, p} = \max(1.5 l_f, 1.5 D_{\max}; \phi)$$

Donde l_f es la longitud de las fibras, D_{\max} es el tamaño máximo del árido y ϕ , es el diámetro de las armaduras pasivas o de refuerzo.

- $1,5 * l_f = 13 * 1.5 = 19.5 \text{ mm}$
- $1,5 * D_{\max} = 10 * 1.5 = 15 \text{ mm}$
- $\phi = 11.2 \text{ mm}$

- Recubrimiento debido a la correcta transmisión de esfuerzos entre el hormigón y el acero. ($c_{\min, \text{bond}}$):

Para elementos pretensados con armaduras pretesas, el doble del diámetro del cable o del tamaño máximo del árido, lo que sea mayor.

- $2 * \phi = 2 * 11,2 = 22,4 \text{ mm}$
- $2 * D_{\max} = 15 \text{ mm}$

- Recubrimiento debido a las condiciones ambientales ($c_{\min, \text{dur}}$)

El recubrimiento por las condiciones ambientales depende de la clase estructural que tenga el elemento. Para edificios la clase estructural requerida es S4, siendo los únicos posibles cambios en ella debidos a la vida útil de la estructura. El elemento a diseñar se quiere que tenga una vida útil de 100 años, aumentando la clase estructural en 2. La clase estructural resultante es S6.

De acuerdo a la tabla 4.1.¹ de las recomendaciones del AFGC, el $c_{\min, \text{dur}}$ para una clase de exposición XC3, y una clase estructural S6, son 20mm.

Para los valores de $\Delta c_{\text{dur}, \gamma}$, $\Delta c_{\text{dur}, \text{st}}$, $\Delta c_{\text{dur}, \text{add}}$, el Eurocódigo 2, recomienda unos valores de 0.

Con todos estos datos, $c_{\min} = \max(c_{\min, \text{bond}}; c_{\min, \text{dur}} + \Delta c_{\text{dur}, \gamma} - \Delta c_{\text{dur}, \text{st}} - \Delta c_{\text{dur}, \text{add}}; c_{\min, p}; 10 \text{ mm})$ queda de la siguiente forma.

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

El recubrimiento mínimo es de 22,4 mm.

1.8.1.3 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 Tolerancias¹⁷” 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

1.8.2 Propiedades geométricas:

En este apartado se van a exponer las propiedades geométricas de la sección. En el anejo de planos se pueden ver detalladas las dos secciones.

1.8.2.1 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 la hemos 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 1: 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)	-

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

En este caso no es posible utilizar el área 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 2: 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.

1.9 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, establecer cómo cambian las tensiones, a continuación se va a estudiar si el elemento cumple o no las condiciones de flecha impuestas por el código técnico de la edificación.

1.9.1 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.

Las pérdidas iniciales suceden entre el tiempo transcurrido entre el momento del tesado y el de la transmisión de pretensado siendo la penetración de cuñas, la relajación del acero, el acortamiento elástico del hormigón.

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.

1.9.1.1 Pérdidas iniciales del pretensado:

Debido a que en el momento antes de la transmisión del pretensado se van a retesar los cables para evitar las pérdidas por relajación y penetración de cuñas, las únicas pérdidas iniciales son las debidas al acortamiento elástico del hormigón.

El acortamiento elástico del hormigón se produce en el momento de la transmisión, el esfuerzo de compresión que introduce el pretensado provoca que el hormigón se acorte y con él, la armadura activa pues está trabajando solidariamente con el hormigón. Esto varía la tensión en la armadura activa.

Se ha calculado la tensión en el hormigón a la altura de la armadura activa, posteriormente, dividiendo por el módulo de elasticidad del HMAR, se ha obtenido la deformación del hormigón en este punto, teniendo en cuenta que la armadura activa actúa adherida al hormigón se le ha impuesto esta deformación y con ella se ha obtenido el incremento de tensión en la armadura. Por último, multiplicando por el área de la armadura activa se han obtenido las pérdidas iniciales del pretensado debidas al acortamiento elástico.

En una primera iteración estas son del 1,69%. Teniendo en cuenta estas pérdidas, y volviendo a iterar, estas resultan del 1,66%. En la siguiente iteración no se aprecian cambios significativos, por lo que resulta razonable tomar como válido que las pérdidas iniciales por acortamiento elástico son del 1,66% de la fuerza de tesado.

Tabla 3: Pérdidas instantáneas por acortamiento elástico del hormigón

Pérdidas instantáneas por acortamiento elástico del hormigón	
$\Delta\sigma_{\text{HMAR}}$ (MPa)	4,56
ϵ_{HMAR}	0,0001
$\Delta\sigma_p$ (MPa)	17,35
ΔP (kN)	1,73
$\Delta P, \text{ini}\%$	1,67

1.9.1.2 Pérdidas diferidas del pretensado

Las pérdidas diferidas, se van a estudiar en dos momentos de la vida útil. Cuando la viga está almacenada en el parque de vigas de la prefabricadora, sección únicamente de hormigón de muy alto rendimiento, y cuando la viga se pone en servicio, sección mixta HMAR y losa de hormigón convencional.

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-SETRA.

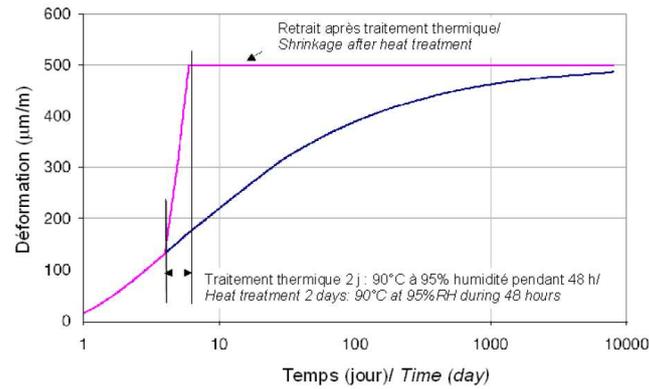


Ilustración 6: Ejemplo de retracción de un elemento de HMAR con y sin tratamiento térmico (Fuente: Recomendaciones del AFGC-SETRA 2013¹)

Las pérdidas diferidas se van a calcular con la siguiente fórmula que propone la EHE-08²:

$$\Delta P_{dif} = \frac{n\varphi(t, t_0)\sigma_{cp} + E_p \varepsilon_{cs}(t, t_0) + 0,80\Delta\sigma_{pr}}{1 + n \frac{A_p}{A_c} \left(1 + \frac{A_c y_p^2}{I_c}\right) (1 + \chi\varphi(t, t_0))} A_p$$

Ilustración 7: Fórmula propuesta por la EHE-08 para el cálculo de las Pérdidas diferidas (Fuente: EHE-08²)

Siendo:

n: coeficiente de homogeneización del pretensado.

$\varphi(t, t_0)$: Coeficiente de fluencia del hormigón.

σ_{cp} : Tensión del hormigón a la altura de las armaduras activas, teniendo en cuenta la acción del pretensado, las cargas muertas, y el peso propio.

E_p : Modulo de Young del pretensado

$\varepsilon_{cs}(t, t_0)$: coeficiente de retracción del hormigón.

$\Delta\sigma_{pr}$: Pérdidas por relajación a longitud constante.

$$\Delta\sigma_{pr} = \rho_f \frac{P_{ki}}{A_p}$$

A_p : Área de pretensado.

A_c : Área de hormigón.

y_p : distancia entre el centro de gravedad de la sección y el centro de gravedad de las armaduras activas.

χ : Coeficiente de envejecimiento

I_c : inercia de la sección de hormigón

Los coeficientes de fluencia y retracción del hormigón se han obtenido de las recomendaciones del AFGC-SETRA. El coeficiente de relajación del acero, debido a que no se disponen datos del fabricante, se ha obtenido según el artículo 38.9², tablas 38.9.a², en la que especifica el coeficiente de relajación en función de la tensión inicial para 1000 días, y 38.9.b, en la que especifica como varía en función del tiempo. El coeficiente de envejecimiento, tal y como recomienda la normativa española, se ha tomado 0,8. Para obtener la tensión del hormigón a la altura de la armadura activa, se ha considerado únicamente el peso propio de HMAR y el pretensado, puesto a que al tratarse de elementos acopiados no van a soportar otras cargas permanentes.

Tabla 4: Datos para obtener las pérdidas diferidas producidas en el parque de vigas

n	3,8	$\Delta\sigma_p$	1,851 MPa
ϕ	0,8	A_p	1*E-04 m ²
σ_{cp}	4,0604 MPa	A_c	0,02526 m ²
E_p	190000 MPa	γ_p	-0,011542 m
$\varepsilon/1000$	0,00035	I_c	4,5170E-05 m ⁴
χ	0,8		

Con todo esto las pérdidas que se producen en el parque de vigas son:

$\Delta P_{dif, 1}$	7,83 kN
---------------------	----------------

Durante el resto de la vida útil, se considera que las pérdidas que se van a producir son una vez la sección mixta ya está trabajando. Con ello se tiene que los datos de inercia y área serán los de la sección completa. En este caso, la tensión del hormigón a la altura de la armadura activa también tiene en cuenta el peso de la losa de hormigón y de las cargas muertas. Quedando de la siguiente forma:

Tabla 5: Datos para obtener las pérdidas diferidas producidas a partir de que la viga entra en servicio.

n	3,8	$\Delta\sigma_p$	2.057,56
ϕ	0,8	A_p	1,00E-04 m ²
σ_{cp}	4,22 MPa	A_c	0,05 m ²
E_p	190000 MPa	γ_p	- 0,17 m
$\varepsilon/1000$	0,00035	I_c	2,54 E-04 m ⁴
χ	0,8		

Con todo esto, las pérdidas que se producen a partir de que se pone en servicio el elemento son:

$\Delta P_{dif, 2}$	7,45 kN
---------------------	----------------

1.9.2 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-SETRA, tabla 7.1.¹ 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

1.9.3 Cálculo de tensiones en servicio:

1.9.3.1 Método para el cálculo de esfuerzos

Principalmente, el forjado va a estar solicitado a dos tipos de cargas. Las cargas uniformemente repartidas en toda su superficie, y las cargas puntuales como el pretensado y las pérdidas de pretensado.

Las cargas uniformemente repartidas, únicamente generan momentos flectores.

El valor del momento en función de x, siendo x la distancia de la sección de estudio con respecto al apoyo izquierdo toma un valor de:

$$M_{Ed}(x) = \frac{q \cdot l}{2} * x + \frac{q \cdot x^2}{2}$$

Siendo:

q: el valor de la carga distribuida.

l: la longitud del elemento l=5m

x: distancia entre el apoyo y la sección de estudio.

Las cargas puntuales a las que esta solicitado el forjado, llevan la dirección longitudinal de este, generando un esfuerzo axil y debido a la excentricidad que tienen un momento flector.

El valor de los esfuerzos generados por las cargas puntuales se va a obtener con las siguientes expresiones:

$$N_{Ed} = P$$

$$M_{Ed} = P \cdot e$$

Siendo:

P: Fuerza de pretensado característico inicial

e: la excentricidad del pretensado.

1.9.3.2 Método para el cálculo de tensiones en servicio.

Para el cálculo de tensiones se han adoptado dos métodos diferentes. Cuando la sección resistente es únicamente de Hormigón de muy alto rendimiento, si que es posible aplicar la simplificación de la fórmula de Navier que se expone a continuación, pero, a partir del hormigonado de la losa ya no es posible.

Debido a la coexistencia entre hormigones con características diferentes, el momento estático a la altura del centro de gravedad no es nulo. Por ello, es necesario utilizar la fórmula general para obtener las tensiones. Para ello, se ha homogeneizado la sección.

Cálculo de tensiones con la fórmula simplificada:

$$\sigma_i = \frac{N}{A} + \frac{M}{I} v_i$$

Siendo:

σ_i : la tensión en un punto.

N: la fuerza en la dirección longitudinal del elemento.

A: El área resistente del elemento.

M: el momento flector del eje perpendicular al elemento

I: La inercia del elemento en la dirección del momento

v_i : La distancia entre el centro de gravedad y el punto del que se quiere obtener la tensión

Cálculo de tensiones con la fórmula general:

Al establecer una hipótesis de no fisuración, como condición de que se cumplan los límites tensionales, se puede aplicar el principio de superposición de acciones, siendo los cálculos de estas fases un incremento de las tensiones previas a las nuevas acciones.

$$\begin{pmatrix} \Delta \varepsilon_0 \\ \Delta c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_h & -S_h \\ -S_h & A_h \end{pmatrix} \begin{pmatrix} N \\ M \end{pmatrix}$$

Siendo:

$\Delta \varepsilon_0$: incremento de tensión en la fibra de referencia.

Δc : Incremento de la pendiente de las tensiones.

I_h : Inercia de la sección homogeneizada sobre la fibra de referencia en la dirección del momento.

S: Momento estático homogeneizado sobre la fibra de referencia en la dirección del momento.

A_h : Área de la sección homogeneizada.

1.9.3.3 Tensiones y esfuerzos en la fase constructiva 1:

En esta fase constructiva actúa el peso propio del hormigón de muy alto rendimiento, el pretensado característico inicial.

Como se obtuvo en el apartado de pérdidas iniciales, estas son un 1,67% de la fuerza de tesado. Las acciones que actúan en esta fase son:

Tabla 7: Acciones en la fase constructiva 1:

Acción	Valor	γ		Valor	
		DESFV	FAV	DESFV	FAV
PP _{HMAR}	0,6315 kN/m	1	1	0,6315 kN/m	0,6315 kN/m
P _{inicial}	102,88 kN	1,05	0,95	108,02 kN	97,73 kN

El PP_{HMAR} es una carga distribuida y la fuerza del pretensado, a su vez, es una carga puntual. Los esfuerzos se van a calcular tal y como se indica en el punto 1.1. *Método de cálculo de esfuerzos* de este mismo anejo.

El pretensado es una fuerza puntual aplicada con una excentricidad de valor, $e=0,0115\text{m}$, resultado de restarle a la posición del centro de gravedad el recubrimiento de la armadura activa y la mitad del diámetro de esta, siendo un tendón de $1\text{E-}4\text{m}^2$ de área.

Con todo esto los esfuerzos y las tensiones a lo largo de todo el elemento son:

Tabla 8: Esfuerzos y tensiones para la combinación de acciones poco probable o característica de la fase constructiva 1.

L	ELS (POCO PROBABLE O CARACTERÍSTICA)									
	Mmax	Mmin	Nmax	Nmin	σ_1 (Mpa)		σ_2 (Mpa)		σ_p (Mpa)	
					Max	Min	Max	Min	Max	Min
-	-1,128	- 1,247	108,022	97,734	1,5188	0,8213	5,2650	4,9618	4,565	4,1877
0,25	- 0,753	- 0,872	108,022	97,734	2,4354	1,7378	4,9364	4,6332	4,4688	4,0919
0,50	- 0,418	-0,536	108,022	97,734	3,2555	2,5579	4,6424	4,3392	4,3831	4,0062
0,75	- 0,122	- 0,240	108,022	97,734	3,9791	3,2815	4,3830	4,0798	4,3075	3,9305
1,00	0,135	0,016	108,022	97,734	4,6062	3,9086	4,1582	3,8549	4,2419	3,8650
1,25	0,352	0,233	108,022	97,734	5,1368	4,4393	3,9679	3,6647	4,1864	3,8095
1,50	0,530	0,411	108,022	97,734	5,5710	4,8734	3,8123	3,5091	4,1411	3,7641
1,75	0,668	0,549	108,022	97,734	5,9087	5,2111	3,6912	3,3880	4,1058	3,7288
2,00	0,766	0,648	108,022	97,734	6,1499	5,4523	3,6047	3,3015	4,0805	3,7036
2,25	0,826	0,707	108,022	97,734	6,2946	5,5970	3,5529	3,2497	4,0654	3,6885
2,50	0,845	0,727	108,022	97,734	6,3428	5,6453	3,5356	3,2324	4,0604	3,6834
2,75	0,826	0,707	108,022	97,734	6,2946	5,5970	3,5529	3,2497	4,0654	3,6885
3,00	0,766	0,648	108,022	97,734	6,1499	5,4523	3,6047	3,3015	4,0805	3,7036
3,25	0,668	0,549	108,022	97,734	5,9087	5,2111	3,6912	3,3880	4,1058	3,7288
3,50	0,530	0,411	108,022	97,734	5,5710	4,8734	3,8123	3,5091	4,1411	3,7641
3,75	0,352	0,233	108,022	97,734	5,1368	4,4393	3,9679	3,6647	4,1864	3,8095
4,00	0,135	0,016	108,022	97,734	4,6062	3,9086	4,1582	3,8549	4,2419	3,8650
4,25	- 0,122	- 0,240	108,022	97,734	3,9791	3,2815	4,3830	4,0798	4,3075	3,9305
4,50	- 0,418	- 0,536	108,022	97,734	3,2555	2,5579	4,6424	4,3392	4,3831	4,0062
4,75	- 0,753	- 0,872	108,022	97,734	2,4354	1,7378	4,9364	4,6332	4,4688	4,0919
5,00	-1,128	-1,247	108,022	97,734	1,5188	0,8213	5,2650	4,9618	4,5647	4,1877

Tabla 9: Esfuerzos y tensiones para la combinación de acciones frecuente de la fase constructiva 1

L	ELS (FRECUENTE)									
	Mmax	Mmin	Nmax	Nmin	σ_1 (Mpa)		σ_2 (Mpa)		σ_p (Mpa)	
					Max	Min	Max	Min	Max	Min
-	- 1,128	- 1,247	108,022	97,734	1,5188	0,8213	5,2650	4,9618	4,5647	4,1877
0,25	- 0,753	- 0,872	108,022	97,734	2,4354	1,7378	4,9364	4,6332	4,4688	4,0919
0,50	- 0,418	- 0,536	108,022	97,734	3,2555	2,5579	4,6424	4,3392	4,3831	4,0062
0,75	- 0,122	- 0,240	108,022	97,734	3,9791	3,2815	4,3830	4,0798	4,3075	3,9305
1,00	0,135	0,016	108,022	97,734	4,6062	3,9086	4,1582	3,8549	4,2419	3,8650
1,25	0,352	0,233	108,022	97,734	5,1368	4,4393	3,9679	3,6647	4,1864	3,8095
1,50	0,530	0,411	108,022	97,734	5,5710	4,8734	3,8123	3,5091	4,1411	3,7641
1,75	0,668	0,549	108,022	97,734	5,9087	5,2111	3,6912	3,3880	4,1058	3,7288
2,00	0,766	0,648	108,022	97,734	6,1499	5,4523	3,6047	3,3015	4,0805	3,7036
2,25	0,826	0,707	108,022	97,734	6,2946	5,5970	3,5529	3,2497	4,0654	3,6885
2,50	0,845	0,727	108,022	97,734	6,3428	5,6453	3,5356	3,2324	4,0604	3,6834
2,75	0,826	0,707	108,022	97,734	6,2946	5,5970	3,5529	3,2497	4,0654	3,6885
3,00	0,766	0,648	108,022	97,734	6,1499	5,4523	3,6047	3,3015	4,0805	3,7036
3,25	0,668	0,549	108,022	97,734	5,9087	5,2111	3,6912	3,3880	4,1058	3,7288
3,50	0,530	0,411	108,022	97,734	5,5710	4,8734	3,8123	3,5091	4,1411	3,7641
3,75	0,352	0,233	108,022	97,734	5,1368	4,4393	3,9679	3,6647	4,1864	3,8095
4,00	0,135	0,016	108,022	97,734	4,6062	3,9086	4,1582	3,8549	4,2419	3,8650
4,25	- 0,122	- 0,240	108,022	97,734	3,9791	3,2815	4,3830	4,0798	4,3075	3,9305
4,50	- 0,418	- 0,536	108,022	97,734	3,2555	2,5579	4,6424	4,3392	4,3831	4,0062
4,75	- 0,753	- 0,872	108,022	97,734	2,4354	1,7378	4,9364	4,6332	4,4688	4,0919
5,00	- 1,128	- 1,247	108,022	97,734	1,5188	0,8213	5,2650	4,9618	4,5647	4,1877

1.9.3.4 Tensiones y esfuerzos en la fase constructiva 2:

En la segunda fase constructiva la única acción a considerar son las pérdidas del pretensado que se producen en el parque de vigas de la planta prefabricadora.

Como bien se apunta en la memoria, estas pérdidas tienen un valor de -7,83 kN.

Para tenerlas en cuenta en el cálculo de la viga, se va a introducir una fuerza igual a -7,83 kN en la posición de la armadura activa.

Tabla 10: Acciones de la fase constructiva 2

Acción	Valor	γ		Valor	
		DESFAV	FAV	DESFAV	FAV
ΔP , dif, 1	-7,83 kN	1,05	0,95	-8,22 kN	-7,43 kN

Al ser una carga puntual, los esfuerzos generados se calculan tal y como se indica en el punto método de cálculo de esfuerzos de este anejo con un valor de la excentricidad $e=0,0115$ m

Los esfuerzos y tensiones a lo largo de todo el elemento en la fase constructiva 2 valen:

Tabla 11: Esfuerzos y tensiones para la combinación de acciones poco probable o característica de la fase constructiva 2

L	ELS (POCO PROBABLE O CARACTERÍSTICA)									
	Mmax	Mmin	Nmax	Nmin	σ_1 (Mpa)		σ_2 (Mpa)		σ_p (Mpa)	
					Max	Min	Max	Min	Max	Min
-	- 1,042	- 1,152	99,805	90,300	1,4033	0,7588	4,8645	4,5844	4,2175	3,8692
0,25	- 0,667	- 0,777	99,805	90,300	2,3199	1,6754	4,5359	4,2558	4,1216	3,7734
0,50	- 0,332	- 0,442	99,805	90,300	3,1399	2,4954	4,2419	3,9618	4,0359	3,6877
0,75	- 0,036	- 0,146	99,805	90,300	3,8635	3,2191	3,9825	3,7024	3,9603	3,6120
1,00	0,221	0,111	99,805	90,300	4,4907	3,8462	3,7577	3,4775	3,8947	3,5465
1,25	0,438	0,328	99,805	90,300	5,0213	4,3768	3,5675	3,2873	3,8392	3,4910
1,50	0,615	0,506	99,805	90,300	5,4555	4,8110	3,4118	3,1317	3,7939	3,4456
1,75	0,754	0,644	99,805	90,300	5,7931	5,1487	3,2908	3,0106	3,7586	3,4103
2,00	0,852	0,743	99,805	90,300	6,0343	5,3899	3,2043	2,9241	3,7334	3,3851
2,25	0,911	0,802	99,805	90,300	6,1791	5,5346	3,1524	2,8722	3,7182	3,3700
2,50	0,931	0,821	99,805	90,300	6,2273	5,5828	3,1351	2,8550	3,7132	3,3649
2,75	0,911	0,802	99,805	90,300	6,1791	5,5346	3,1524	2,8722	3,7182	3,3700
3,00	0,852	0,743	99,805	90,300	6,0343	5,3899	3,2043	2,9241	3,7334	3,3851
3,25	0,754	0,644	99,805	90,300	5,7931	5,1487	3,2908	3,0106	3,7586	3,4103
3,50	0,615	0,506	99,805	90,300	5,4555	4,8110	3,4118	3,1317	3,7939	3,4456
3,75	0,438	0,328	99,805	90,300	5,0213	4,3768	3,5675	3,2873	3,8392	3,4910
4,00	0,221	0,111	99,805	90,300	4,4907	3,8462	3,7577	3,4775	3,8947	3,5465
4,25	- 0,036	- 0,146	99,805	90,300	3,8635	3,2191	3,9825	3,7024	3,9603	3,6120
4,50	- 0,332	- 0,442	99,805	90,300	3,1399	2,4954	4,2419	3,9618	4,0359	3,6877
4,75	- 0,667	- 0,777	99,805	90,300	2,3199	1,6754	4,5359	4,2558	4,1216	3,7734
5,00	- 1,042	- 1,152	99,805	90,300	1,4033	0,7588	4,8645	4,5844	4,2175	3,8692

Tabla 12: Esfuerzos y tensiones para la combinación de acciones frecuente de la fase constructiva 2

L	ELS (FRECUENTE)											
	Mmax	Mmin	Nmax	Nmin	$\sigma_1(\text{Mpa})$		$\sigma_2(\text{Mpa})$		$\sigma_p(\text{Mpa})$			
					Max	Min	Max	Min	Max	Min		
-	-	1,042	-	1,152	99,805	90,300	1,4033	0,7588	4,8645	4,5844	4,2175	3,8692
0,25	-	0,667	-	0,777	99,805	90,300	2,3199	1,6754	4,5359	4,2558	4,1216	3,7734
0,50	-	0,332	-	0,442	99,805	90,300	3,1399	2,4954	4,2419	3,9618	4,0359	3,6877
0,75	-	0,036	-	0,146	99,805	90,300	3,8635	3,2191	3,9825	3,7024	3,9603	3,6120
1,00		0,221		0,111	99,805	90,300	4,4907	3,8462	3,7577	3,4775	3,8947	3,5465
1,25		0,438		0,328	99,805	90,300	5,0213	4,3768	3,5675	3,2873	3,8392	3,4910
1,50		0,615		0,506	99,805	90,300	5,4555	4,8110	3,4118	3,1317	3,7939	3,4456
1,75		0,754		0,644	99,805	90,300	5,7931	5,1487	3,2908	3,0106	3,7586	3,4103
2,00		0,852		0,743	99,805	90,300	6,0343	5,3899	3,2043	2,9241	3,7334	3,3851
2,25		0,911		0,802	99,805	90,300	6,1791	5,5346	3,1524	2,8722	3,7182	3,3700
2,50		0,931		0,821	99,805	90,300	6,2273	5,5828	3,1351	2,8550	3,7132	3,3649
2,75		0,911		0,802	99,805	90,300	6,1791	5,5346	3,1524	2,8722	3,7182	3,3700
3,00		0,852		0,743	99,805	90,300	6,0343	5,3899	3,2043	2,9241	3,7334	3,3851
3,25		0,754		0,644	99,805	90,300	5,7931	5,1487	3,2908	3,0106	3,7586	3,4103
3,50		0,615		0,506	99,805	90,300	5,4555	4,8110	3,4118	3,1317	3,7939	3,4456
3,75		0,438		0,328	99,805	90,300	5,0213	4,3768	3,5675	3,2873	3,8392	3,4910
4,00		0,221		0,111	99,805	90,300	4,4907	3,8462	3,7577	3,4775	3,8947	3,5465
4,25	-	0,036	-	0,146	99,805	90,300	3,8635	3,2191	3,9825	3,7024	3,9603	3,6120
4,50	-	0,332	-	0,442	99,805	90,300	3,1399	2,4954	4,2419	3,9618	4,0359	3,6877
4,75	-	0,667	-	0,777	99,805	90,300	2,3199	1,6754	4,5359	4,2558	4,1216	3,7734
5,00	-	1,042	-	1,152	99,805	90,300	1,4033	0,7588	4,8645	4,5844	4,2175	3,8692

1.9.3.5 Tensiones y esfuerzos en la fase constructiva 3.

En esta fase constructiva, se procede al transporte del forjado a la obra y a la construcción de la losa de compresión. La única acción diferente, es el peso propio de la losa de hormigón.

Acción	Valor	γ		Valor	
		DESFAV	FAV	DESFAV	FAV
PP (Losa)	1,05 kN/m	1	1	1,05 kN/m	1,05 kN/m

El PP_{Losa} es una carga repartida y los esfuerzos se han obtenido según el punto 1.1. *Método para obtener los esfuerzos de este anexo.*

Para calcular los esfuerzos, se ha obtenido un incremento del momento y del axil, aplicando el principio de superposición de acciones. Y se le ha sumado las tensiones obtenidas a las tensiones de la fase constructiva anterior.

El incremento de esfuerzos y las tensiones tras la fase constructiva 3 son:

Tabla 13: Esfuerzos y tensiones para la combinación de acciones poco probable de la fase constructiva 3

L	ELS (POCO PROBABLE O CARACTERÍSTICA)									
	Mmax	Mmin	Nmax	Nmin	σ_1 (Mpa)		σ_2 (Mpa)		σ_p (Mpa)	
					Max	Min	Max	Min	Max	Min
-	-	-	-	-	1,403	0,759	4,865	4,584	4,217	3,869
0,25	0,445	0,445	-	-	3,408	2,764	4,146	3,866	4,008	3,660
0,50	0,844	0,844	-	-	5,202	4,558	3,503	3,222	3,820	3,472
0,75	1,195	1,195	-	-	6,785	6,141	2,935	2,655	3,655	3,307
1,00	1,500	1,500	-	-	8,157	7,513	2,443	2,163	3,511	3,163
1,25	1,758	1,758	-	-	9,318	8,674	2,027	1,747	3,390	3,042
1,50	1,969	1,969	-	-	10,268	9,624	1,687	1,406	3,291	2,943
1,75	2,133	2,133	-	-	11,007	10,362	1,422	1,142	3,214	2,865
2,00	2,250	2,250	-	-	11,534	10,890	1,232	0,952	3,158	2,810
2,25	2,320	2,320	-	-	11,851	11,206	1,119	0,839	3,125	2,777
2,50	2,344	2,344	-	-	11,957	11,312	1,081	0,801	3,114	2,766
2,75	2,320	2,320	-	-	11,851	11,206	1,119	0,839	3,125	2,777
3,00	2,250	2,250	-	-	11,534	10,890	1,232	0,952	3,158	2,810
3,25	2,133	2,133	-	-	11,007	10,362	1,422	1,142	3,214	2,865
3,50	1,969	1,969	-	-	10,268	9,624	1,687	1,406	3,291	2,943
3,75	1,758	1,758	-	-	9,318	8,674	2,027	1,747	3,390	3,042
4,00	1,500	1,500	-	-	8,157	7,513	2,443	2,163	3,511	3,163
4,25	1,195	1,195	-	-	6,785	6,141	2,935	2,655	3,655	3,307
4,50	0,844	0,844	-	-	5,202	4,558	3,503	3,222	3,820	3,472
4,75	0,445	0,445	-	-	3,408	2,764	4,146	3,866	4,008	3,660
5,00	-	-	-	-	1,403	0,759	4,865	4,584	4,217	3,869

Tabla 14: Esfuerzos y tensiones para la combinación de acciones frecuente de la fase constructiva 3

L	ELS (FRECUENTE)									
	Mmax	Mmin	Nmax	Nmin	$\sigma_1(\text{Mpa})$		$\sigma_2(\text{Mpa})$		$\sigma_p(\text{Mpa})$	
					Max	Min	Max	Min	Max	Min
-	-	-	-	-	1,4033	0,7588	4,8645	4,5844	4,2175	3,8692
0,25	0,445	0,445	-	-	3,4084	2,7639	4,1457	3,8655	4,0079	3,6596
0,50	0,844	0,844	-	-	5,2025	4,5580	3,5025	3,2224	3,8203	3,4721
0,75	1,195	1,195	-	-	6,7854	6,1410	2,9350	2,6549	3,6548	3,3066
1,00	1,500	1,500	-	-	8,1574	7,5129	2,4432	2,1630	3,5114	3,1632
1,25	1,758	1,758	-	-	9,3182	8,6737	2,0270	1,7469	3,3901	3,0418
1,50	1,969	1,969	-	-	10,2680	9,6235	1,6865	1,4064	3,2908	2,9425
1,75	2,133	2,133	-	-	11,0067	10,3622	1,4217	1,1415	3,2136	2,8653
2,00	2,250	2,250	-	-	11,5344	10,8899	1,2325	0,9523	3,1584	2,8101
2,25	2,320	2,320	-	-	11,8510	11,2065	1,1190	0,8388	3,1253	2,7770
2,50	2,344	2,344	-	-	11,9565	11,3120	1,0812	0,8010	3,1143	2,7660
2,75	2,320	2,320	-	-	11,8510	11,2065	1,1190	0,8388	3,1253	2,7770
3,00	2,250	2,250	-	-	11,5344	10,8899	1,2325	0,9523	3,1584	2,8101
3,25	2,133	2,133	-	-	11,0067	10,3622	1,4217	1,1415	3,2136	2,8653
3,50	1,969	1,969	-	-	10,2680	9,6235	1,6865	1,4064	3,2908	2,9425
3,75	1,758	1,758	-	-	9,3182	8,6737	2,0270	1,7469	3,3901	3,0418
4,00	1,500	1,500	-	-	8,1574	7,5129	2,4432	2,1630	3,5114	3,1632
4,25	1,195	1,195	-	-	6,7854	6,1410	2,9350	2,6549	3,6548	3,3066
4,50	0,844	0,844	-	-	5,2025	4,5580	3,5025	3,2224	3,8203	3,4721
4,75	0,445	0,445	-	-	3,4084	2,7639	4,1457	3,8655	4,0079	3,6596
5,00	-	-	-	-	1,4033	0,7588	4,8645	4,5844	4,2175	3,8692

1.9.3.6 Tensiones y esfuerzos en la fase constructiva 4.

En la fase constructiva 4 una vez la losa de hormigón se ha endurecido, se aplican las cargas muertas y la sobrecarga de uso.

Las CM según el código técnico, se deben considerar como una acción repartida en toda la superficie y solo cuando son elementos muy pesados se debe añadir una carga lineal siguiendo el emplazamiento del objeto que las genera.

La sobrecarga de uso también es una fuerza distribuida en toda la superficie del forjado. Y se le ha aplicado un coeficiente $\psi_1=0,8$ para la combinación de acciones frecuente.

Acción	Valor	γ		Valor	
		DESF	FAV	DESF	FAV
CM	1,26 kN/m	1	1	1,26 kN/m	1,26 kN/m
SU	2,1 kN/m	1,5	0	2,1 kN/m	0 kN/m

Los esfuerzos se han obtenido según el punto 1.1. *Método para obtener los esfuerzos* de este anexo.

Hay que recordar que en esta fase constructiva el hormigón de la losa entra en carga. Por lo que es necesario obtener las tensiones en la losa de compresión.

En este caso, y como se explica en el punto 1.1.2. *Método para la obtención de tensiones* de este anexo, las tensiones se deben calcular con el método general. Por ello se ha obtenido el incremento de la deformación de la fibra de referencia (Centro de la sección) y el incremento de la pendiente debido al incremento de esfuerzos.

Las tensiones y el incremento de esfuerzos tras la fase constructiva 4 son:

Tabla 15: Esfuerzos y tensiones para la combinación de acciones poco probable de la fase constructiva 4

L	ELS (POCO PROBABLE O CARACTERÍSTICA)																	
	ESFUERZOS POR CM				VIGA										LOSA			
	ΔMmax	ΔMmin	ΔNmax	ΔNmin	Max		MIN		σ1(Mpa)		σ2(Mpa)	σp(Mpa)		σ2'(Mpa)		σ1'(Mpa)		
					Δε0	ΔC	Δε0	ΔC	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min
-	-	-	-	-	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,403	0,759	4,865	4,584	4,217	3,869	0,000	0,000	0,000	0,000
0,25	1,425	0,534	-	-	1,69E-06	1,33E-04	6,32E-07	4,98E-05	3,825	2,920	3,928	3,286	3,614	3,266	0,233	0,087	0,419	0,157
0,50	2,700	1,013	-	-	3,20E-06	2,52E-04	1,20E-06	9,44E-05	5,991	4,854	3,091	2,124	3,075	2,727	0,442	0,166	0,794	0,298
0,75	3,825	1,434	-	-	4,53E-06	3,56E-04	1,70E-06	1,34E-04	7,903	6,560	2,352	1,099	2,599	2,250	0,626	0,235	1,125	0,422
1,00	4,800	1,800	-	-	5,68E-06	4,47E-04	2,13E-06	1,68E-04	9,560	8,039	1,711	0,210	2,186	1,838	0,785	0,294	1,412	0,529
1,25	5,625	2,109	-	-	6,66E-06	5,24E-04	2,50E-06	1,97E-04	10,962	9,290	1,169	-0,541	1,837	1,489	0,920	0,345	1,654	0,620
1,50	6,300	2,363	-	-	7,46E-06	5,87E-04	2,80E-06	2,20E-04	12,109	10,314	0,725	-1,156	1,551	1,203	1,031	0,387	1,853	0,695
1,75	6,825	2,559	-	-	8,08E-06	6,36E-04	3,03E-06	2,39E-04	13,001	11,110	0,381	-1,635	1,329	0,981	1,117	0,419	2,007	0,753
2,00	7,200	2,700	-	-	8,52E-06	6,71E-04	3,20E-06	2,52E-04	13,638	11,679	0,134	-1,976	1,170	0,822	1,178	0,442	2,117	0,794
2,25	7,425	2,784	-	-	8,79E-06	6,92E-04	3,30E-06	2,59E-04	14,020	12,020	-0,014	-2,182	1,075	0,727	1,215	0,456	2,184	0,819
2,50	7,500	2,813	-	-	8,88E-06	6,99E-04	3,33E-06	2,62E-04	14,148	12,134	-0,063	-2,250	1,043	0,695	1,227	0,460	2,206	0,827
2,75	7,425	2,784	-	-	8,79E-06	6,92E-04	3,30E-06	2,59E-04	14,020	12,020	-0,014	-2,182	1,075	0,727	1,215	0,456	2,184	0,819
3,00	7,200	2,700	-	-	8,52E-06	6,71E-04	3,20E-06	2,52E-04	13,638	11,679	0,134	-1,976	1,170	0,822	1,178	0,442	2,117	0,794
3,25	6,825	2,559	-	-	8,08E-06	6,36E-04	3,03E-06	2,39E-04	13,001	11,110	0,381	-1,635	1,329	0,981	1,117	0,419	2,007	0,753
3,50	6,300	2,363	-	-	7,46E-06	5,87E-04	2,80E-06	2,20E-04	12,109	10,314	0,725	-1,156	1,551	1,203	1,031	0,387	1,853	0,695
3,75	5,625	2,109	-	-	6,66E-06	5,24E-04	2,50E-06	1,97E-04	10,962	9,290	1,169	-0,541	1,837	1,489	0,920	0,345	1,654	0,620
4,00	4,800	1,800	-	-	5,68E-06	4,47E-04	2,13E-06	1,68E-04	9,560	8,039	1,711	0,210	2,186	1,838	0,785	0,294	1,412	0,529
4,25	3,825	1,434	-	-	4,53E-06	3,56E-04	1,70E-06	1,34E-04	7,903	6,560	2,352	1,099	2,599	2,250	0,626	0,235	1,125	0,422
4,50	2,700	1,013	-	-	3,20E-06	2,52E-04	1,20E-06	9,44E-05	5,991	4,854	3,091	2,124	3,075	2,727	0,442	0,166	0,794	0,298
4,75	1,425	0,534	-	-	1,69E-06	1,33E-04	6,32E-07	4,98E-05	3,825	2,920	3,928	3,286	3,614	3,266	0,233	0,087	0,419	0,157
5,00	-	-	-	-	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,403	0,759	4,865	4,584	4,217	3,869	0,000	0,000	0,000	0,000

Tabla 16: Esfuerzos y tensiones para la combinación de acciones frecuente de la fase constructiva 4

L	ELS (POCO PROBABLE O CARACTERÍSTICA)																	
	ESFUERZOS POR CM				VIGA										LOSA			
	ΔMmax	ΔMmin	ΔNmax	ΔNmin	Max		MIN		σ1(Mpa)		σ2(Mpa)		σp(Mpa)		σ2'(Mpa)		σ1'(Mpa)	
					Δε0	ΔC	Δε0	ΔC	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min
-	-	-	-	-	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,403	0,759	4,865	4,584	4,217	3,869	0,000	0,000	0,000	0,000
0,25	1,247	0,534	-	-	1,48E-06	1,16E-04	6,32E-07	4,98E-05	3,825	2,920	3,928	3,286	3,614	3,266	0,233	0,087	0,419	0,157
0,50	2,363	1,013	-	-	2,80E-06	2,20E-04	1,20E-06	9,44E-05	5,991	4,854	3,091	2,124	3,075	2,727	0,442	0,166	0,794	0,298
0,75	3,347	1,434	-	-	3,96E-06	3,12E-04	1,70E-06	1,34E-04	7,903	6,560	2,352	1,099	2,599	2,250	0,626	0,235	1,125	0,422
1,00	4,200	1,800	-	-	4,97E-06	3,91E-04	2,13E-06	1,68E-04	9,560	8,039	1,711	0,210	2,186	1,838	0,785	0,294	1,412	0,529
1,25	4,922	2,109	-	-	5,83E-06	4,59E-04	2,50E-06	1,97E-04	10,962	9,290	1,169	-0,541	1,837	1,489	0,920	0,345	1,654	0,620
1,50	5,513	2,363	-	-	6,52E-06	5,14E-04	2,80E-06	2,20E-04	12,109	10,314	0,725	-1,156	1,551	1,203	1,031	0,387	1,853	0,695
1,75	5,972	2,559	-	-	7,07E-06	5,57E-04	3,03E-06	2,39E-04	13,001	11,110	0,381	-1,635	1,329	0,981	1,117	0,419	2,007	0,753
2,00	6,300	2,700	-	-	7,46E-06	5,87E-04	3,20E-06	2,52E-04	13,638	11,679	0,134	-1,976	1,170	0,822	1,178	0,442	2,117	0,794
2,25	6,497	2,784	-	-	7,69E-06	6,05E-04	3,30E-06	2,59E-04	14,020	12,020	-0,014	-2,182	1,075	0,727	1,215	0,456	2,184	0,819
2,50	6,563	2,813	-	-	7,77E-06	6,12E-04	3,33E-06	2,62E-04	14,148	12,134	-0,063	-2,250	1,043	0,695	1,227	0,460	2,206	0,827
2,75	6,497	2,784	-	-	7,69E-06	6,05E-04	3,30E-06	2,59E-04	14,020	12,020	-0,014	-2,182	1,075	0,727	1,215	0,456	2,184	0,819
3,00	6,300	2,700	-	-	7,46E-06	5,87E-04	3,20E-06	2,52E-04	13,638	11,679	0,134	-1,976	1,170	0,822	1,178	0,442	2,117	0,794
3,25	5,972	2,559	-	-	7,07E-06	5,57E-04	3,03E-06	2,39E-04	13,001	11,110	0,381	-1,635	1,329	0,981	1,117	0,419	2,007	0,753
3,50	5,513	2,363	-	-	6,52E-06	5,14E-04	2,80E-06	2,20E-04	12,109	10,314	0,725	-1,156	1,551	1,203	1,031	0,387	1,853	0,695
3,75	4,922	2,109	-	-	5,83E-06	4,59E-04	2,50E-06	1,97E-04	10,962	9,290	1,169	-0,541	1,837	1,489	0,920	0,345	1,654	0,620
4,00	4,200	1,800	-	-	4,97E-06	3,91E-04	2,13E-06	1,68E-04	9,560	8,039	1,711	0,210	2,186	1,838	0,785	0,294	1,412	0,529
4,25	3,347	1,434	-	-	3,96E-06	3,12E-04	1,70E-06	1,34E-04	7,903	6,560	2,352	1,099	2,599	2,250	0,626	0,235	1,125	0,422
4,50	2,363	1,013	-	-	2,80E-06	2,20E-04	1,20E-06	9,44E-05	5,991	4,854	3,091	2,124	3,075	2,727	0,442	0,166	0,794	0,298
4,75	1,247	0,534	-	-	1,48E-06	1,16E-04	6,32E-07	4,98E-05	3,825	2,920	3,928	3,286	3,614	3,266	0,233	0,087	0,419	0,157
5,00	-	-	-	-	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,403	0,759	4,865	4,584	4,217	3,869	0,000	0,000	0,000	0,000

1.9.3.7 Tensiones en la fase constructiva 5.

A partir de la puesta en servicio del forjado, la única acción que va a modificar las tensiones son las pérdidas diferidas del pretensado.

Como ya se calculó en el apartado de pérdidas diferidas estas tienen un valor de 7,45kN.

Al igual que con las pérdidas diferidas en el parque de vigas, se van a tener en cuenta introduciendo una fuerza negativa de valor -7,45kN a la altura de la armadura activa.

Acción	Valor	γ		Valor	
		DESFAV	FAV	DESFAV	FAV
ΔP , dif, 2	- 7,45 kN	1,05	0,95	-7,82 kN	-7,1 kN

En esta fase constructiva, la sección resistente sigue siendo la sección mixta de hormigón de muy alto rendimiento y de hormigón convencional. Por ello las tensiones se van a calcular con el método general tal y como se explica en el punto 1.1.2. *Método para obtener las tensiones de este anejo.*

Como se ha indicado en el punto anterior, el punto de referencia para calcular las tensiones de la sección es el centro geométrico de esta. Aparte, como no se permite la fisuración, también se puede aplicar el principio de superposición de acciones.

Las tensiones y el incremento de esfuerzos tras la fase constructiva 4 son:

L	ELS (POCO PROBABLE O CARACTERÍSTICA)																		
	ESFUERZOS POR CM				VIGA								LOSA						
	ΔMmax	ΔMmin	ΔNmax	ΔNmin	Max		MIN		σ1(Mpa)		σ2(Mpa)		σp(Mpa)		σ2'(Mpa)		σ1'(Mpa)		
					Δε0	ΔC	Δε0	ΔC	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	
-	0,557	0,504	- 7,73	- 6,998	-3,36E-06	4,27E-05	-3,04E-06	3,86E-05	1,342	0,759	4,483	4,239	3,90	3,55	- 0,034	- 0,031	0,026	0,023	
0,25	0,557	0,504	- 7,73	- 6,998	-3,36E-06	4,27E-05	-3,04E-06	3,86E-05	3,764	2,920	3,547	2,941	3,29	2,94	0,199	0,056	0,445	0,180	
0,50	0,557	0,504	- 7,73	- 6,998	-3,36E-06	4,27E-05	-3,04E-06	3,86E-05	5,930	4,854	2,709	1,779	2,75	2,40	0,407	0,135	0,820	0,321	
0,75	0,557	0,504	- 7,73	- 6,998	-3,36E-06	4,27E-05	-3,04E-06	3,86E-05	7,842	6,560	1,970	0,754	2,28	1,93	0,592	0,204	1,150	0,445	
1,00	0,557	0,504	- 7,73	- 6,998	-3,36E-06	4,27E-05	-3,04E-06	3,86E-05	9,499	8,039	1,329	- 0,135	1,86	1,52	0,751	0,263	1,437	0,552	
1,25	0,557	0,504	- 7,73	- 6,998	-3,36E-06	4,27E-05	-3,04E-06	3,86E-05	10,900	9,290	0,787	- 0,887	1,52	1,17	0,886	0,314	1,680	0,643	
1,50	0,557	0,504	- 7,73	- 6,998	-3,36E-06	4,27E-05	-3,04E-06	3,86E-05	12,047	10,314	0,344	- 1,502	1,23	0,88	0,996	0,356	1,878	0,718	
1,75	0,557	0,504	- 7,73	- 6,998	-3,36E-06	4,27E-05	-3,04E-06	3,86E-05	12,939	11,110	- 0,001	- 1,980	1,01	0,66	1,082	0,388	2,033	0,776	
2,00	0,557	0,504	- 7,73	- 6,998	-3,36E-06	4,27E-05	-3,04E-06	3,86E-05	13,577	11,679	- 0,247	- 2,322	0,85	0,50	1,144	0,411	2,143	0,817	
2,25	0,557	0,504	- 7,73	- 6,998	-3,36E-06	4,27E-05	-3,04E-06	3,86E-05	13,959	12,020	- 0,395	- 2,527	0,75	0,41	1,181	0,425	2,209	0,842	
2,50	0,557	0,504	- 7,73	- 6,998	-3,36E-06	4,27E-05	-3,04E-06	3,86E-05	14,086	12,134	- 0,444	- 2,595	0,72	0,37	1,193	0,429	2,231	0,850	
2,75	0,557	0,504	- 7,73	- 6,998	-3,36E-06	4,27E-05	-3,04E-06	3,86E-05	13,959	12,020	- 0,395	- 2,527	0,75	0,41	1,181	0,425	2,209	0,842	
3,00	0,557	0,504	- 7,73	- 6,998	-3,36E-06	4,27E-05	-3,04E-06	3,86E-05	13,577	11,679	- 0,247	- 2,322	0,85	0,50	1,144	0,411	2,143	0,817	
3,25	0,557	0,504	- 7,73	- 6,998	-3,36E-06	4,27E-05	-3,04E-06	3,86E-05	12,939	11,110	- 0,001	- 1,980	1,01	0,66	1,082	0,388	2,033	0,776	
3,50	0,557	0,504	- 7,73	- 6,998	-3,36E-06	4,27E-05	-3,04E-06	3,86E-05	12,047	10,314	0,344	- 1,502	1,23	0,88	0,996	0,356	1,878	0,718	
3,75	0,557	0,504	- 7,73	- 6,998	-3,36E-06	4,27E-05	-3,04E-06	3,86E-05	10,900	9,290	0,787	- 0,887	1,52	1,17	0,886	0,314	1,680	0,643	
4,00	0,557	0,504	- 7,73	- 6,998	-3,36E-06	4,27E-05	-3,04E-06	3,86E-05	9,499	8,039	1,329	- 0,135	1,86	1,52	0,751	0,263	1,437	0,552	
4,25	0,557	0,504	- 7,73	- 6,998	-3,36E-06	4,27E-05	-3,04E-06	3,86E-05	7,842	6,560	1,970	0,754	2,28	1,93	0,592	0,204	1,150	0,445	
4,50	0,557	0,504	- 7,73	- 6,998	-3,36E-06	4,27E-05	-3,04E-06	3,86E-05	5,930	4,854	2,709	1,779	2,75	2,40	0,407	0,135	0,820	0,321	
4,75	0,557	0,504	- 7,73	- 6,998	-3,36E-06	4,27E-05	-3,04E-06	3,86E-05	3,764	2,920	3,547	2,941	3,29	2,94	0,199	0,056	0,445	0,180	
5,00	0,557	0,504	- 7,73	- 6,998	-3,36E-06	4,27E-05	-3,04E-06	3,86E-05	1,342	0,759	4,483	4,239	3,90	3,55	- 0,034	- 0,031	0,026	0,023	

L	ELS (FRECUENTE)																	
	ESFUERZOS POR PÉRDIDAS				VIGA										LOSA			
	ΔMmax	ΔMmin	ΔNmax	ΔNmin	Max		MIN		σ1(Mpa)		σ2(Mpa)		σp(Mpa)		σ2'(Mpa)		σ1'(Mpa)	
					Δε0	ΔC	Δε0	ΔC	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min
-	0,557	0,504	- 7,735	- 6,998	-3,36E-06	4,27E-05	-3,04E-06	3,86E-05	1,342	0,703	4,483	4,239	3,90	3,55	- 0,034	- 0,031	0,026	0,023
0,25	0,557	0,504	- 7,735	- 6,998	-3,36E-06	4,27E-05	-3,04E-06	3,86E-05	3,711	2,865	3,547	3,013	3,34	2,99	0,170	0,056	0,392	0,180
0,50	0,557	0,504	- 7,735	- 6,998	-3,36E-06	4,27E-05	-3,04E-06	3,86E-05	5,831	4,798	2,709	1,916	2,85	2,50	0,352	0,135	0,720	0,321
0,75	0,557	0,504	- 7,735	- 6,998	-3,36E-06	4,27E-05	-3,04E-06	3,86E-05	7,702	6,505	1,970	0,948	2,41	2,06	0,513	0,204	1,010	0,445
1,00	0,557	0,504	- 7,735	- 6,998	-3,36E-06	4,27E-05	-3,04E-06	3,86E-05	9,323	7,983	1,329	0,109	2,03	1,68	0,653	0,263	1,261	0,552
1,25	0,557	0,504	- 7,735	- 6,998	-3,36E-06	4,27E-05	-3,04E-06	3,86E-05	10,695	9,235	0,787	- 0,601	1,71	1,36	0,771	0,314	1,473	0,643
1,50	0,557	0,504	- 7,735	- 6,998	-3,36E-06	4,27E-05	-3,04E-06	3,86E-05	11,817	10,258	0,344	- 1,181	1,45	1,10	0,868	0,356	1,647	0,718
1,75	0,557	0,504	- 7,735	- 6,998	-3,36E-06	4,27E-05	-3,04E-06	3,86E-05	12,690	11,055	- 0,001	- 1,633	1,24	0,89	0,943	0,388	1,782	0,776
2,00	0,557	0,504	- 7,735	- 6,998	-3,36E-06	4,27E-05	-3,04E-06	3,86E-05	13,314	11,623	- 0,247	- 1,956	1,10	0,75	0,996	0,411	1,878	0,817
2,25	0,557	0,504	- 7,735	- 6,998	-3,36E-06	4,27E-05	-3,04E-06	3,86E-05	13,688	11,965	- 0,395	- 2,149	1,01	0,66	1,029	0,425	1,936	0,842
2,50	0,557	0,504	- 7,735	- 6,998	-3,36E-06	4,27E-05	-3,04E-06	3,86E-05	13,813	12,078	- 0,444	- 2,214	0,98	0,63	1,039	0,429	1,955	0,850
2,75	0,557	0,504	- 7,735	- 6,998	-3,36E-06	4,27E-05	-3,04E-06	3,86E-05	13,688	11,965	- 0,395	- 2,149	1,01	0,66	1,029	0,425	1,936	0,842
3,00	0,557	0,504	- 7,735	- 6,998	-3,36E-06	4,27E-05	-3,04E-06	3,86E-05	13,314	11,623	- 0,247	- 1,956	1,10	0,75	0,996	0,411	1,878	0,817
3,25	0,557	0,504	- 7,735	- 6,998	-3,36E-06	4,27E-05	-3,04E-06	3,86E-05	12,690	11,055	- 0,001	- 1,633	1,24	0,89	0,943	0,388	1,782	0,776
3,50	0,557	0,504	- 7,735	- 6,998	-3,36E-06	4,27E-05	-3,04E-06	3,86E-05	11,817	10,258	0,344	- 1,181	1,45	1,10	0,868	0,356	1,647	0,718
3,75	0,557	0,504	- 7,735	- 6,998	-3,36E-06	4,27E-05	-3,04E-06	3,86E-05	10,695	9,235	0,787	- 0,601	1,71	1,36	0,771	0,314	1,473	0,643
4,00	0,557	0,504	- 7,735	- 6,998	-3,36E-06	4,27E-05	-3,04E-06	3,86E-05	9,323	7,983	1,329	0,109	2,03	1,68	0,653	0,263	1,261	0,552
4,25	0,557	0,504	- 7,735	- 6,998	-3,36E-06	4,27E-05	-3,04E-06	3,86E-05	7,702	6,505	1,970	0,948	2,41	2,06	0,513	0,204	1,010	0,445
4,50	0,557	0,504	- 7,735	- 6,998	-3,36E-06	4,27E-05	-3,04E-06	3,86E-05	5,831	4,798	2,709	1,916	2,85	2,50	0,352	0,135	0,720	0,321
4,75	0,557	0,504	- 7,735	- 6,998	-3,36E-06	4,27E-05	-3,04E-06	3,86E-05	3,711	2,865	3,547	3,013	3,34	2,99	0,170	0,056	0,392	0,180
5,00	0,557	0,504	- 7,735	- 6,998	-3,36E-06	4,27E-05	-3,04E-06	3,86E-05	1,342	0,703	4,483	4,239	3,90	3,55	- 0,034	- 0,031	0,026	0,023

1.9.4 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.

1.9.4.1 Cálculo de flecha:

A la hora de calcular la flecha se ha tenido en cuenta que hay varios tipos de cargas. Se ha entrado a un prontuario y se han obtenido las flechas para cada tipo de carga.

- Flecha para cargas repartidas:

$$y_q = \frac{5ql^4}{384EI}$$

- Flecha para un momento positivo constante a lo largo de toda la viga:

$$y_m = \frac{Ml^2}{8EI}$$

Este se ha realizado para cada una de las acciones y posteriormente se ha calculado la flecha por fluencia que provocan las cargas permanentes y la flecha por retracción del hormigón.

La flecha por fluencia² se ha calculado teniendo en cuenta un módulo de deformación efectivo e igual a:

$$E_{eff} = \frac{E}{1 + \varphi}$$

Siendo φ el coeficiente de fluencia del hormigón y de valor 0,8.

Para calcular la flecha por retracción se ha obtenido la curvatura que provocan las armaduras al impedir el acortamiento del hormigón con la siguiente fórmula.

$$\frac{1}{r_{cs}} = -\varepsilon_{cs} \frac{E_s}{E_{eff}} \frac{S}{I}$$

Siendo:

ε_{cs} : el valor de la retracción del hormigón.

E_s : Módulo de Young del acero.

E_{eff} : Módulo de Young efectivo del hormigón

S : Momento estático de las armaduras con respecto al centro de gravedad de la sección.

I : Momento de inercia de la sección con respecto a su centro de gravedad.

Una vez obtenida la curvatura, teniendo en cuenta que esta va a ser constante a lo largo de toda su longitud, se multiplica por la longitud del elemento al cuadrado, y por un factor k que

depende del tipo de elemento que se trate. Como es una viga biapoyada, este factor toma como valor la unidad.

Con esto la flecha para cada una de las acciones y la retracción y fluencia queda:

Tabla 17: 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 1/400. 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= 0,016m

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

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

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.

1.10 Estado Límite último

Con los estados límite último, se pretende comprobar que el elemento no va a sufrir ninguna acción dentro de las contempladas 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 un forjado unidireccional y teniendo en cuenta que se va a simplificar el esquema estructural como si fuera un elemento del tipo lineal, no se va a introducir ninguna acción que genere un torsor.

La comprobación de las zonas tipo D, apoyos y zona de anclaje del pretensado, no se van a analizar puesto a que se trata de un estudio previo y no del diseño definitivo.

1.10.1 ELU Tensiones normales.

Al tratarse de un elemento pretensado, y con un hormigón que se pretende no lleve armadura de refuerzo, y que baste con las fibras, estudio de las tensiones normales, es más que nada una comprobación puesto a que no se va a dimensionar armadura. También es necesario comprobar si en la losa de compresión de hormigón convencional es necesaria o no armadura de compresión.

La comprobación se va a realizar en el centro luz puesto a que es la sección más determinante al tratarse de una viga biapoyada.

La mayor singularidad que tiene este forjado a la hora de calcular el ELU de tensiones normales erradica en los hormigones con dos edades y resistencias diferentes. Esto, provoca que cuando el hormigón de la losa, el más “joven”, entra en carga, el HMAR ya ha entrado en carga y tiene una deformación previa. Esta deformación es la que se debe a las acciones que ya han actuado previamente al fraguado de la losa. Por ello, el origen de deformaciones de la losa es diferente al origen de deformaciones del HMAR.

En la siguiente tabla se representan los valores de las deformaciones en la sección centro luz para las acciones previas al hormigonado de la losa de hormigón convencional. En esta tabla la deformación del punto 1' es ficticia. Puesto a que en este instante no ha entrado en carga, todavía la losa de hormigón convencional.

Tabla 18: Deformación de la sección centro luz previa al hormigonado de la losa.

Deformaciones 1/1000	
1	0,30834
2	0,00012
1'	0,411078325

Para calcular la comprobación del ELU por tensiones normales se va a utilizar el diagrama de pivotes. Pero para ello, hay que tener en cuenta los dos orígenes de deformación diferentes. Como se ve en la siguiente imagen. Se ha tomado la deformación de rotura de los hormigones como el 3.5/1000.

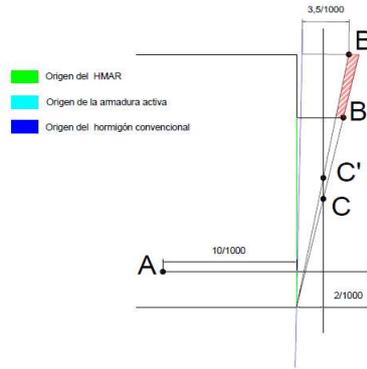


Ilustración 8: Diagrama de pivotes de la sección centro luz.

Como podemos observar en la ilustración, cuando se alcanza $x=h$, punto en el que la sección deja de pivotar en B y empieza a pivotar en C, la única forma posible de que no se supere la deformación de rotura en la losa es siendo la curvatura del cambio, la del pivote la losa (B'C). Con esto, extraemos la conclusión de que es el pivote B', el de la losa de compresión, sobre el que debe pivotar la sección.

A la hora de establecer el equilibrio de fuerzas en la sección de rotura, se han planteado un par de hipótesis que simplifican los cálculos considerablemente. Que será necesario comprobar una vez calculada la resistencia de la sección para dar por buenos los cálculos.

HIPÓTESIS INICIALES:

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

Si el bloque de compresión abandonara la losa, la hipótesis de que el bloque de compresiones parábola rectángulo se puede simplificar a $0,8 \cdot x$ no se cumple con lo que sería necesario plantear el cálculo con la integral del bloque parábola rectángulo.

Teniendo en cuenta que la armadura activa trabaja a más de la deformada de plastificación, se fija la tensión de trabajo a f_{pd} .

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

$$Nd = 0 = f_c \cdot b_{losa} \cdot 0,8 \cdot x_{losa} - A_p \cdot f_{pd}$$

Sustituyendo los valores:

DATOS		
f_{cd}	21,74	MPa
b (losa)	0,5	m
f_{pd}	1395	MPa
A_p	0,0001	m^2

EQUILIBRIO DE AXILES	
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.

$$Mrd = fcd * b_{losa} * 0,8 * x * (d - 0,4 * x)$$

Sustituyendo:

DATOS		
fcd	21,74	MPa
b (losa)	0,500	m
x	0,016	m
d	0,172	m

MOMENTO ÚLTIMO (Mrd)	
22,87	kNm

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

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

1.10.1.1 Armadura de la losa de compresión.

Por el efecto de las fibras, se puede prescindir de la armadura de refuerzo en el HMAR y por cálculo no es necesaria en la losa de compresión de hormigón convencional. Pero existen otros efectos como la retracción y la fluencia que obligan a colocar un armado mínimo para controlar la fisuración del hormigón.

El armado por mínimos se va a realizar según la EHE-08². Teniendo en cuenta que el nervio del forjado se comporta como si fuera una viga la normativa española recomienda en el apartado 42.3 de esta instrucción un 2,8/1000 de la sección de hormigón en la cara de tracción y un 30% de esta cuantía en la cara opuesta.

$$As'_{min, geom} = Ac * \frac{0,3 * 2,8}{1000} = 500 * 0,00084 = 0,42 \text{ cm}^2/m$$

Si el armado se va a realizar con B500S, se necesita una capacidad mecánica igual a:

$$U = As' * f_{sd} = 0,42 * 10^{-4} * 500 * 10^3 = 21 \text{ kN}$$

Mirando en una tabla, vemos que la capacidad mecánica de $3\phi 6$ es de 36,9 kN. Pero estos estarían separados 33,3 cm (más de lo que permite la EHE-08), por ello se va a optar por colocar una malla electrosoldada de $4\phi 6/m$ ($U=49,2$ kN) en las dos direcciones. Cumpliendo sobradamente con las necesidades.

En la dirección perpendicular de la losa de compresión, no se puede tener en cuenta que el elemento es tipo viga puesto a que si que trabaja como una losa. En este caso la normativa obliga a que la cuantía a disponer sea del 1,8/1000 a repartir en las dos caras. Siendo que esta

es la única cara de la losa en esa dirección, no se tienen en cuenta la contribución del HMAR, y que es un elemento muy esbelto se va a colocar toda.

$$As'_{min, geom} = Ac * \frac{1,8}{1000} = 500 * 0,0018 = 0,9 \text{ cm}^2/m$$

La el área correspondiente a los 4φ6 es de 9,84cm² superior a la cuantía necesaria.

1.10.2 ELU Tensiones tangenciales.

Como ya se ha comentado, únicamente se van realizar las comprobaciones de cortante y rasante entre hormigones de distintas edades.

1.10.2.1 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 (V_{rd}).

$$V_{Rd} = V_{Rd,c} + V_{Rd,f} + V_{Rd,s}$$

Siendo:

$V_{Rd,c}$: El término del hormigón.

$V_{Rd,f}$: El término de las fibras.

$V_{Rd,s}$: El término de la armadura de refuerzo por cortante.

Se pretende que no sea necesario añadir armadura de refuerzo por cortante, por ello, el valor de $V_{Rd,s}$ se va a tomar como nulo.

En las recomendaciones proponen la siguiente fórmula para obtener el término del cortante del hormigón para una sección pretesa con o sin armadura de refuerzo.

$$V_{Rd,c} = \frac{0,18}{\gamma_{cf}\gamma_E} k f_{ck}^{1/2} b_w z$$

Siendo:

$\gamma_{cf}\gamma_E$: Coeficiente de seguridad con valor igual a 1,5

$f_{ck, HMAR}$: Valor característico de la resistencia a compresión del HMAR.

b_w : el valor del menor ancho del alma en una sección en T

z : El valor del brazo mecánico.

Para obtener el valor de k las recomendaciones proponen la siguiente fórmula.

$$k = 1 + \begin{cases} 3 * \frac{\sigma_{cp}}{f_{ck}} & \sigma_{cp} \geq 0 \\ 0,7 * \frac{\sigma_{cp}}{f_{ck,0.05}} & \sigma_{cp} < 0 \end{cases}$$

Siendo:

$$\sigma_{cp}: N_{ed}/AC$$

Como el valor de $N_{ed}=P$ y es de compresión se toma la primera de las dos opciones para obtener el valor de k .

Sustituyendo en las dos fórmulas:

DATOS	
σ_{cp}	2,62
$f_{ck,HMAR}$	150
k	1,05
$\gamma_{cf}\gamma_E$	1,5
b_w	0,07
z	0,164

$V_{Rd,c}$	
23,7	kN

Teniendo en cuenta que el valor de cálculo para el cortante es de $V_d=15$ kN. No es necesario calcular el resto de términos de la resistencia a cortante porque con el término del hormigón, $V_{Rd,c}$ cumple la comprobación del alma traccionada.

Para comprobar las bielas comprimidas, las recomendaciones proponen la siguiente fórmula.

$$V_{Rd,max} = 2 \times 1,4 \frac{\alpha_{cc}}{\gamma_c} b_w z f_{ck}^{\frac{2}{3}} (\cot\theta + \tan\theta)$$

Siendo:

α_{cc} : Un coeficiente que tiene en cuenta el estado de las tensiones en las bielas comprimidas. Al ser favorable, se va a tomar un valor de 1.

θ : el ángulo entre la dirección principal de las compresiones y el eje de la viga. Según las recomendaciones se recomienda un valor mínimo de 30° ,

Sustituyendo en la ecuación el valor de la resistencia de las bielas comprimidas es de 278 kN. Valor muy superior al del cortante de cálculo.



2. 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.