

ANEJO Nº 07. ESTRUCTURAS.

AUTORES:
BONO MATA, Inés
SERRANO CHACÓN, Álvaro Rubén

ÍNDICE

	Pág.
1. INTRODUCCIÓN.....	3
2. ESTUDIO DE SOLUCIONES ESTRUCTURALES.....	3
3. DESCRIPCIÓN DE LA SOLUCIÓN ADOPTADA.....	3
4. NORMATIVA DE APLICACIÓN Y BIBLIOGRAFÍA	3
5. DURABILIDAD	4
6. BASES DE PROYECTO.....	4
6.1 Materiales	
6.2 Criterios de seguridad	
6.3 Acciones consideradas en el dimensionamiento	
7. JUSTIFICACIÓN DE LOS CÁLCULOS	5
7.1 Muros pantalla	
7.2 Losa inferior	
8. SISTEMA RHEDA 2000	19

1. INTRODUCCIÓN

El presente anejo tiene por objeto la definición y justificación de las soluciones técnicas proyectadas para los elementos estructurales que componen el Proyecto de Construcción en curso. Además se desarrollan los cálculos de las estructuras que lo integran, mostrando los procesos seguidos.

2. ESTUDIO DE SOLUCIONES ESTRUCTURALES

Para el diseño de los muros pantalla se han barajado diferentes posibilidades, las cuales se han analizado y comprobado su viabilidad hasta llegar a la solución adoptada.

Inicialmente se pensó en pantallas en voladizo, sin ningún tipo de arriostramiento. Esta solución se descartó porque desde el punto de vista estructural no era viable ya que para unas dimensiones de la pantalla racionales no cumplía con la abertura máxima de fisura en el estado límite de servicio.

Posteriormente se estudió la posibilidad de colocar anclajes pretensados. Esta solución también se descartó ya que en un predimensionamiento se obtuvo que dichos anclajes tendrían una longitud total de unos 10-12 m, superior a la separación entre los muros pantalla y las edificaciones. En ciertos puntos del trazado dicha separación es solo de 5 m.

Finalmente se ha optado por disponer puntales metálicos entre las cabezas de las pantallas que sirven como arriostramiento. Esta solución se explica detalladamente en el apartado siguiente.

3. DESCRIPCIÓN DE LA SOLUCIÓN ADOPTADA

La actuación proyectada consiste en un soterramiento del trazado ferroviario a su paso por el municipio de Sant Feliu de Llobregat, el cual, llega a este punto en superficie y debe volver a ella una vez acabado el tramo que nos ocupa. Desde el punto de vista estructural se puede decir que para realizar dicho soterramiento ha primado como objetivo la menor afección a la población.

Como suele ser habitual en zonas urbanas, se han empleado pantallas continuas de hormigón, lo que disminuye enormemente la afección en planta. Las pantallas se ejecutarán desde el P.K. 88+350 hasta el P.K. 89+560.

Este proyecto recoge únicamente el cerramiento superior de los muros pantallas en ciertos puntos del trazado, en los que se da continuidad a los viales existentes. Dicho cerramiento se lleva a cabo mediante losas de hormigón armado empotradas en las pantallas que además sirven como apuntalamiento. Donde no se ejecuta la losa de cobertura, se colocan puntales metálicos HEB280 arriostrando las pantallas en cabeza cada 5 u 8.5 m en función de la zona. El vaciado entre pantallas

tendrá lugar una vez que se hayan dispuesto los puntales y la losa de cobertura en los puntos correspondientes.

Cabe destacar, que el actual proyecto se ha diseñado teniendo en cuenta que en un futuro se ejecutará la losa de cobertura en todo el tramo de muros pantalla, quedando el ferrocarril soterrado mediante túnel artificial. En esta segunda fase, se retirarán los puntales metálicos conforme se vaya ejecutando la losa de cobertura que también servirá de arriostramiento.

Para el dimensionamiento de las pantallas y la losa inferior, se han analizado solamente dos secciones tipo ubicadas en la zona de la Riera de la Salut (P.K. 88+655 – P.K. 88+700) y en la intersección de las calles Terrisser y Germans Lladó (P.K. 89+464 – P.K. 89+507). Se han elegido estas dos zonas porque el terreno presenta diferentes características. No obstante, para una mayor optimización del diseño se deberían analizar mas secciones a lo largo del tramo en cuestión.

Respecto a las dimensiones, la distancia horizontal entre pantallas va a ser de 11 m y la distancia vertical entre el fondo de la excavación y la cabeza de las pantallas de 8.50 m. La geometría de la pantalla obtenida en la zona de la Riera de la Salut es de 0.95 m de espesor y 12.5 m de longitud total, mientras que en la zona de la intersección de las calles Terrisser y Germans Lladó las pantallas tienen un espesor de 0.75 m y una longitud total de 12 m.

La superestructura ferroviaria se ha proyectado con vía en placa mediante sistema Rheda 2000 sobre una losa inferior de hormigón armado situada a la cota -8.50 m. Dicha losa se empotra en los muros pantalla y se ejecuta sobre una capa de hormigón de limpieza colocada sobre el fondo de la excavación. La losa tiene un espesor de 0.40 m y su armado variará en función de la zona.

4. NORMATIVA DE APLICACIÓN Y BIBLIOGRAFÍA

La solución proyectada y su dimensionamiento cumplen las disposiciones establecidas en las Normas y Recomendaciones siguientes:

- UNE-EN 1990:2002 Eurocódigo 0
- UNE-EN 1992-1-1:2013 Eurocódigo 2
- CTE-DB-SE-C Código Técnico de la Edificación. Documento Básico de Seguridad Estructural – Cimientos
- EAE -11 Instrucción de Acero Estructural
- NTE-CC Normas Tecnológicas de la Edificación. Acondicionamiento del terreno. Cimentaciones

La bibliografía de base utilizada es:

- CALAVERA RUIZ, José. *Manual de detalles constructivos en obras de hormigón armado: edificación, obras públicas*. Madrid: INTEMAC, 1993.
- CALAVERA RUIZ, José. *Cálculo de estructuras de cimentación*. Madrid: INTEMAC, 2000.

5. DURABILIDAD

Las estructuras se deben proyectar teniendo en cuenta las condiciones físicas y químicas a las que estarán sometidas a lo largo de su vida útil de tal forma que mantengan sus condiciones de seguridad, funcionalidad y aspecto, ajustándose a los costes previstos de conservación y explotación.

Todas estructuras de hormigón calculadas en este anejo presentan una clase de exposición ambiental XC2 de acuerdo con la tabla 4.1 de la norma UNE-EN 1992-1-1.

6. BASES DE PROYECTO

A continuación se fijan las condiciones que permiten proyectar y construir las estructuras para soportar, con un margen de seguridad aceptable, todas las acciones que las puedan solicitar durante el periodo de vida útil previsto en el proyecto, así como para cumplir la función para la que fueron diseñadas.

6.1 Materiales

La resistencia mínima del hormigón exigida para la clase de exposición XC2 es de 25 MPa según la Tabla AN/13 (Tabla E.1N) UNE-EN 1992-1-1:2013. No obstante, por motivos de diseño estructural se va a usar los siguientes hormigones:

- Muros pantalla: HA-30
- Muretes guía: HA-25
- Losa inferior: HA-30

La consistencia del hormigón será fluida.

En todas las estructuras consideradas el armado se realizará mediante redondos de acero B500S.

6.2 Criterios de seguridad

Los coeficientes de seguridad que se han utilizado para el cálculo estructural se recogen en las siguientes tablas.

COEFICIENTES DE SEGURIDAD PARA LAS ACCIONES EN ESTADOS LÍMITES ÚLTIMOS		
Tipo de acción	Situación persistente o transitoria	
	Efecto favorable	Efecto desfavorable
Permanente	$\gamma_G = 1$	$\gamma_G = 1.35$
Variable	$\gamma_Q = 0$	$\gamma_Q = 1.5$

COEFICIENTES DE SEGURIDAD PARA LAS ACCIONES EN ESTADOS LÍMITES DE SERVICIO		
Tipo de acción	Situación persistente o transitoria	
	Efecto favorable	Efecto desfavorable
Permanente	$\gamma_G = 1$	$\gamma_G = 1$
Variable	$\gamma_Q = 0$	$\gamma_Q = 1$

COEFICIENTES DE SEGURIDAD PARA LOS MATERIALES EN ESTADOS LÍMITES ÚLTIMOS		
Situación de proyecto	Hormigón	Acero pasivo
Persistente o transitoria	1.5	1.15

6.3 Acciones consideradas en el dimensionamiento

Para el cálculo de la losa inferior se han considerado las siguientes acciones:

- Acciones permanentes:
 - Peso propio de la losa inferior
 - Peso propio de sistema Rheda 2000
 - Peso propio de carriles UIC-54
 - Peso propio de traviesas bloque B355 M
 - Postes de electrificación XB
 - Peso propio del hormigón de relleno
- Acciones variables
 - Sobrecarga de uso del ferrocarril

Para el cálculo de los muros pantalla se han considerado las siguientes acciones:

- Acciones permanentes:
 - Peso propio de la pantalla
 - Empuje del terreno
- Acciones variables
 - Sobrecarga de uso de viales y edificaciones próximas

- Acciones transmitidas por la losa

En el apartado de justificación de los cálculos se explica detalladamente cómo se ha obtenido el valor de cada una de estas acciones.

Respecto a la combinación de las acciones se ha utilizado lo especificado en el Eurocódigo 0, Art. 6.5.3 y Art. 6.4. Para los estados límites últimos se ha considerado la situación de proyecto persistente o transitoria y para los estados límites de servicio la combinación casi-permanente y característica según corresponda.

7. JUSTIFICACIÓN DE LOS CÁLCULOS

En este apartado se recogen los cálculos que se han llevado a cabo para el dimensionamiento de los diferentes elementos estructurales.

7.1 Muros pantalla

Los muros pantalla diseñados en el presente proyecto poseen arriostramientos en la cabeza mediante perfiles metálicos, además del empotramiento en el terreno por debajo del fondo de excavación con una longitud determinada en el anejo geotécnico. De esta forma se asegura la estabilidad de la estructura y se limitan las deformaciones del terreno.

El método de cálculo utilizado es el de “pie libre” o “método americano”. En este caso se asume que la pantalla es desplazada de una manera rígida bajo el efecto del empuje activo del terreno, movilizandando el empuje pasivo y creando una tensión en el puntal. Se considera que no existe ninguna reacción en la base.

Los muros pantalla se construyen siguiendo el proceso descrito a continuación:

- Se ejecuta un murete guía para el encauzamiento de la máquina de excavación. A continuación se construye el muro pantalla en toda su profundidad y se emplea un sostenimiento de lodos bentoníticos. La pantalla se realiza mediante bataches de 2.5 m de longitud.
- Una vez construida la pantalla, se lleva a cabo una primera fase de excavación hasta la cota -1.00 m. Seguidamente se colocan los puntales y cuando éstos están ya en su posición, se aborda una segunda fase de excavación hasta la cota -8.5 m.
- Finalmente se descabezan las pantallas y se ejecuta la viga de atado.

Murete guía

Para su diseño se sigue la Norma Tecnológica de la Edificación relativa a Cimentaciones con Pantalla, de la que se obtiene una estructura de 25 cm de ancho y 70 cm de profundidad.

La sección se ejecuta en hormigón armado HA-25 y acero en barras B 500 S, disponiendo un armado de:

- Armado longitudinal: 8Ø12
- Armado transversal: $c \text{ } \varnothing 6/25$

Acciones a considerar

A continuación se detallan las acciones que se han considerado para el cálculo de los muros pantalla.

- Acciones permanentes:
 - Peso propio de la pantalla
En la pantalla del perfil 1: $G1 = 0.95 \cdot 1 \cdot 25 = 23.75 \text{ kN/m}$
En la pantalla del perfil 2: $G1 = 0.75 \cdot 1 \cdot 25 = 18.75 \text{ kN/m}$
 - Empuje del terreno
Los empujes del terreno, tanto activos como pasivos, para ambas pantallas están desarrollados en el anejo geotécnico.
- Acciones variables
 - Sobrecarga de uso de viales y edificaciones próximas
Estas sobrecargas están detalladas en el anejo geotécnico.
- Acciones transmitidas por la losa
Estas acciones se recogen en el siguiente apartado de este documento, en el que se justifica el dimensionamiento de ambas losas.

MURO PANTALLA - PERFIL TRANSVERSAL 1

Datos generales

- Materiales
 - Para las armaduras pasivas se utiliza acero en barras corrugadas B500S con un módulo de elasticidad $E_s = 200.000 \text{ MPa}$. Se ha considerado un diámetro de las armaduras verticales de 16 mm y de 12 mm para las armaduras horizontales.
 - Para el hormigón armado se emplea cemento tipo CEM I. La resistencia característica es de 30 ^(*) MPa, la clase de exposición es XC2 y el tamaño máximo de árido 20 mm.

(*) NOTA: De acuerdo con el CTE-DB-SE-C, en pantallas continuas se utiliza a efectos de cálculo una resistencia característica del hormigón de 18 MPa para tomar en consideración las condiciones de puesta en obra.

b) Geometría

- La pantalla tiene un espesor de 0.95 m.

c) Otras consideraciones

- La vida útil considerada es de 100 años.
- El nivel de control es normal.
- El tipo de elemento es in situ.

DIMENSIONAMIENTO A FLEXIÓN

Esfuerzos en la sección más desfavorable

La sección más desfavorable para el dimensionamiento de la pantalla se localiza a 6.09 m medidos desde la cabeza de las pantallas. En dicha sección los esfuerzos son los siguientes:

ELU

$$M_d = 553.20 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$N_d = 195.26 \text{ kN}$$

$$V_d = 0 \text{ kN}$$

ELS

$$M_d = 409.78 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$N_d = 144.64 \text{ kN}$$

$$V_d = 0 \text{ kN}$$

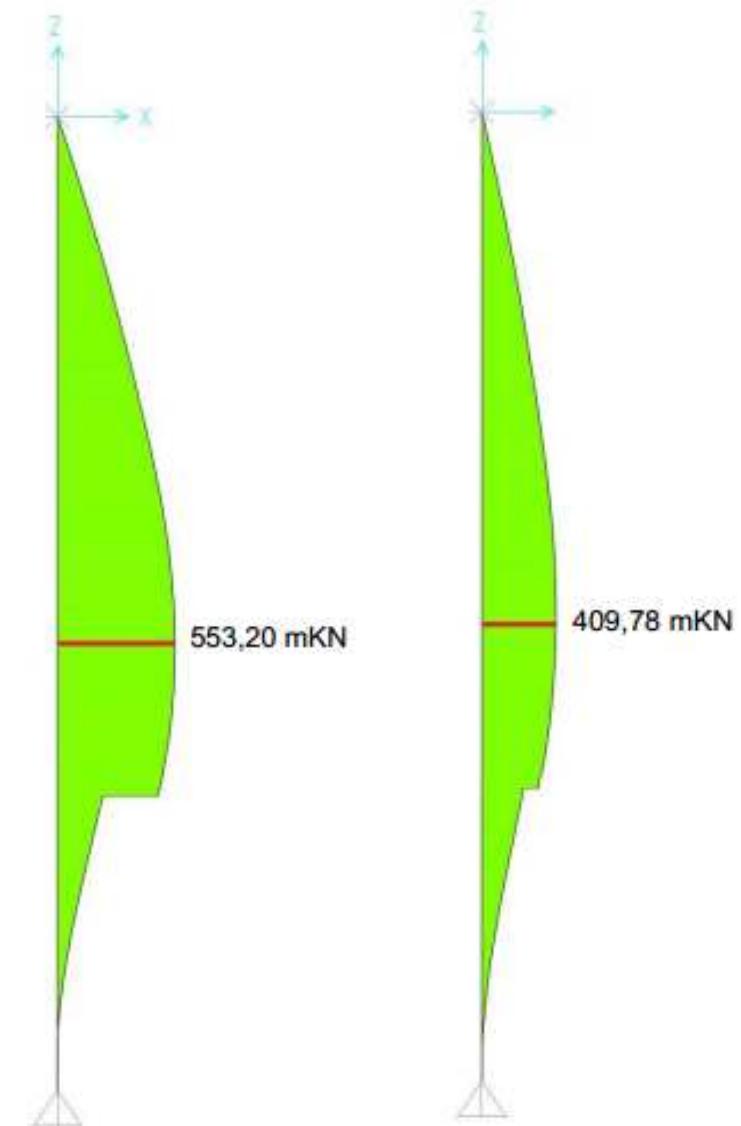


Fig. 1. Ley de momentos flectores en ELU a la izquierda y en ELS a la derecha

Recubrimiento nominal

El recubrimiento nominal se calcula según el Eurocódigo 2, Art. 4.4.1.

$$c_{nom} = c_{min} + \Delta c_{dev}$$

$$c_{min} = \max \left\{ \begin{array}{l} c_{min,b} = \phi_{barra} = 16 \text{ mm} \\ c_{min,dur} + c_{dur,\gamma} - \Delta c_{dur,st} - \Delta c_{dur,add} = 25 \text{ mm} \\ 10 \text{ mm} \end{array} \right\} = 25 \text{ mm}$$

$$\Delta c_{dev} = 10 \text{ mm (in situ con control normal)}$$

$$c_{nom} = 25 + 10 = 35 \text{ mm}$$

$$\text{Elemento hormigonado contra el terreno} \rightarrow c_{nom} = 35 \text{ mm} \geq 75 \text{ mm}$$

Cálculo de la armadura vertical

Con los esfuerzos anteriores, los resultados obtenidos en el cálculo de la armadura vertical son:

$$\text{Canto útil} \rightarrow d = 0.95 - 0.075 - 0.012 - \frac{0.016}{2} = 0.855 \text{ m}$$

$$x_{lim} = 0.527 \text{ m}$$

$$M_{1c}(x_{lim}) = 3260.86 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{1d} = M_d + N_d \cdot (d - v_1) = 611.78 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Como $M_{1d} < M_{1c}(x_{lim}) \rightarrow \text{ZONA C}$

Ahora se determina la profundidad de la fibra neutra:

$$x_{fn} = 0.0773 \text{ m}$$

La armadura de cálculo es la siguiente:

$$A_s = 13.53 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$A'_s = 0 \text{ m}^2$$

Armadura vertical mínima

Según el Eurocódigo 2, Art. 9.6.2 (1) y Art. 7.3.2, la armadura longitudinal mínima que se debe disponer es:

$$\text{-Mínimo mecánico} \rightarrow A_{s,min} = 10.48 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$\text{-Mínimo para el control de la fisuración} \rightarrow A_{s,min} = 9.63 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$\text{-Mínimo geométrico} \rightarrow A_{s,min} = 8.55 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

Disposición de la armadura vertical

La armadura vertical más restrictiva es la de cálculo, siendo la armadura a disponer de 7Ø16. Se adopta como criterio de diseño el armado de las dos caras del muro pantalla con la misma armadura vertical. Cabe destacar que en muros la separación máxima entre armaduras es de 400 mm.

Comprobación de ELS

Para cumplir la abertura de fisura máxima se ha tenido que aumentar la armadura vertical a 10Ø16. A continuación se comprueba que con dicha armadura se cumplen todos los requisitos de fisuración.

$$M_{ed,caract} = 409.78 \text{ kN} \cdot \text{m} > M_{fis} = 337.12 \text{ kN} \cdot \text{m} \rightarrow \text{Sí fisura}$$

$$\sigma_{c,max} = 5.50 \text{ MPa} < 0.6 \cdot 18 = 10.8 \text{ MPa} \rightarrow \text{Cumple}$$

$$\sigma_{s,max} = 196.91 \text{ MPa} < 0.8 \cdot 500 = 400 \text{ MPa} \rightarrow \text{Cumple}$$

La abertura máxima de fisura seleccionada es de 0.3 mm para clase de exposición XC2 y hormigón armado según Eurocódigo 2. Tabla AN/9 del Anejo Nacional.

$$w_k = 0.28 \text{ mm} < w_{max} = 0.3 \text{ mm} \rightarrow \text{Cumple}$$

En resumen:

- **Armadura vertical a disponer en la cara traccionada: 10Ø16**
- **Armadura vertical a disponer en la cara comprimida: 10Ø16**

ARMADURA HORIZONTAL

En el caso de muros el Eurocódigo 2 establece en el artículo 9.6.3. (1) que se debe disponer una armadura horizontal para $f_{yk} = 500 \text{ MPa}$ y para juntas verticales de contracción con una separación inferior a 7.5 m de:

$$A_{s,h min} = 0.002 \cdot A_c = 0.002 \cdot 0.5 \cdot 1 = 10 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{m}$$

Esta armadura calculada es para las dos caras del muro. Se adopta como criterio de diseño el reparto de dicha armadura al 50% en cada cara. Por lo tanto la armadura horizontal en cada cara será de:

$$A_{s,h min} = 5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{m}$$

La disposición de armadura horizontal en cada cara será de Ø12/20.

COMPROBACIÓN DEL CORTANTE

Uno de los criterios de diseño es no colocar armadura de cortante. No obstante, a continuación se va a comprobar este aspecto.

El cortante con el que se realiza esta comprobación es el máximo, que en este caso se sitúa a cota -9.14 m.

$$V_{ed} = 147.27 \text{ kN}$$

$$V_{Rd,c} = 328.08 \text{ kN}$$

Como $V_{ed} < V_{Rd,c}$ no necesita armadura de cortante.

Aunque no es necesaria armadura por cortante, la armadura horizontal calculada se va a cerrar en cercos que rodeen la armadura vertical. Esto se hace únicamente para facilitar el montaje y colocación de la jaula de armadura. Por lo tanto se colocarán cercos horizontales Ø12 cada 20 cm.

DIMENSIONAMIENTO DEL ARRIOSTRAMIENTO EN CABEZA

Para el arriostramiento de las pantallas se van a utilizar perfiles metálicos laminados en caliente tipo HEB280 de acero S235. Estos perfiles se unen a los muros pantalla de la siguiente manera: los perfiles están soldados a dos angulares por el alma y estos a su vez se encuentran fijados a la pantalla con pernos de anclaje.

A continuación se desarrollan los cálculos que justifican la elección de este perfil. El modelo de cálculo utilizado es el de perfiles biarticulados.

La fuerza a compresión que le transmite la pantalla al arriostramiento es de 138.73 kN/m . Se prevé colocar perfiles cada 5 m, por lo tanto la fuerza que tendrán que soportar es:

$$N_d = 138.73 \cdot 5 = 693.65 \text{ kN}$$

De acuerdo con la EAE, para elementos sometidos a compresión, el valor de cálculo del esfuerzo axial de compresión N_d deberá verificar:

$$N_d \leq N_{b,Rd}$$

siendo:

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0.2696 \cdot 131.4 \cdot 10^{-4} \cdot 235 \cdot 10^3}{1.05} = 792.99 \text{ kN}$$

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda^2}} = \frac{1}{2.22 + \sqrt{2.22^2 - 1.65^2}} = 0.2696$$

$$\phi = 0.5 \cdot (1 + \alpha \cdot (\lambda - 0.2) + \lambda^2) = 0.5 \cdot (1 + 0.49 \cdot (1.65 - 0.2) + 1.65^2) = 2.22$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}} = \sqrt{\frac{131.4 \cdot 10^{-4} \cdot 235 \cdot 10^3}{1129.66}} = 1.65$$

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{L_{cr}^2} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{(\beta \cdot L)^2} = \frac{\pi^2 \cdot 210000 \cdot 10^3 \cdot 6595 \cdot 10^{-8}}{(1 \cdot 11)^2} = 1129.66 \text{ kN}$$

Como $N_d = 693.65 \text{ kN} \leq 792.99 \text{ kN} = N_{b,Rd}$, el perfil metálico cumple la comprobación de pandeo por axil.

VIGA DE ATADO

Su diseño se ha basado en la Norma Tecnológica de la Edificación relativa a Cimentaciones con Pantalla. En este caso el espesor de la pantalla es de 0.95 m y se obtiene una estructura de 95 cm de ancho y 135 cm de canto.

La sección se ejecuta en hormigón armado HA-30 y acero en barras B 500 S, disponiendo un armado de:

- Armado longitudinal lateral: 12Ø20
- Armado longitudinal superior e inferior: 6Ø20
- Armado transversal: c Ø10/20

MURO PANTALLA - PERFIL TRANSVERSAL 2

Datos generales

a) Materiales

- Para las armaduras pasivas se utiliza acero en barras corrugadas B500S con un módulo de elasticidad $E_s = 200.000 \text{ MPa}$. Se ha considerado un diámetro de las armaduras verticales de 16 mm y de 12 mm para las armaduras horizontales.
- Para el hormigón armado se emplea cemento tipo CEM I. La resistencia característica es de $30^{(*)} \text{ MPa}$, la clase de exposición es XC2 y el tamaño máximo de árido 20 mm.

(*) NOTA: De acuerdo con el CTE-DB-SE-C, en pantallas continuas se utiliza a efectos de cálculo una resistencia característica del hormigón de 18 MPa para tomar en consideración las condiciones de puesta en obra.

b) Geometría

- La pantalla tiene un espesor de 0.75 m.

c) Otras consideraciones

- La vida útil considerada es de 100 años.
- El nivel de control es normal.
- El tipo de elemento es in situ.

DIMENSIONAMIENTO A FLEXIÓN

Esfuerzos en la sección más desfavorable

La sección más desfavorable para el dimensionamiento de la pantalla se localiza a 6.27 m medidos desde la cabeza de las pantallas. En dicha sección los esfuerzos son los siguientes:

ELU

$$M_d = 429.38 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$N_d = 158.71 \text{ kN}$$

$$V_d = 0 \text{ kN}$$

ELS

$$M_d = 318.06 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$N_d = 117.56 \text{ kN}$$

$$V_d = 0 \text{ kN}$$

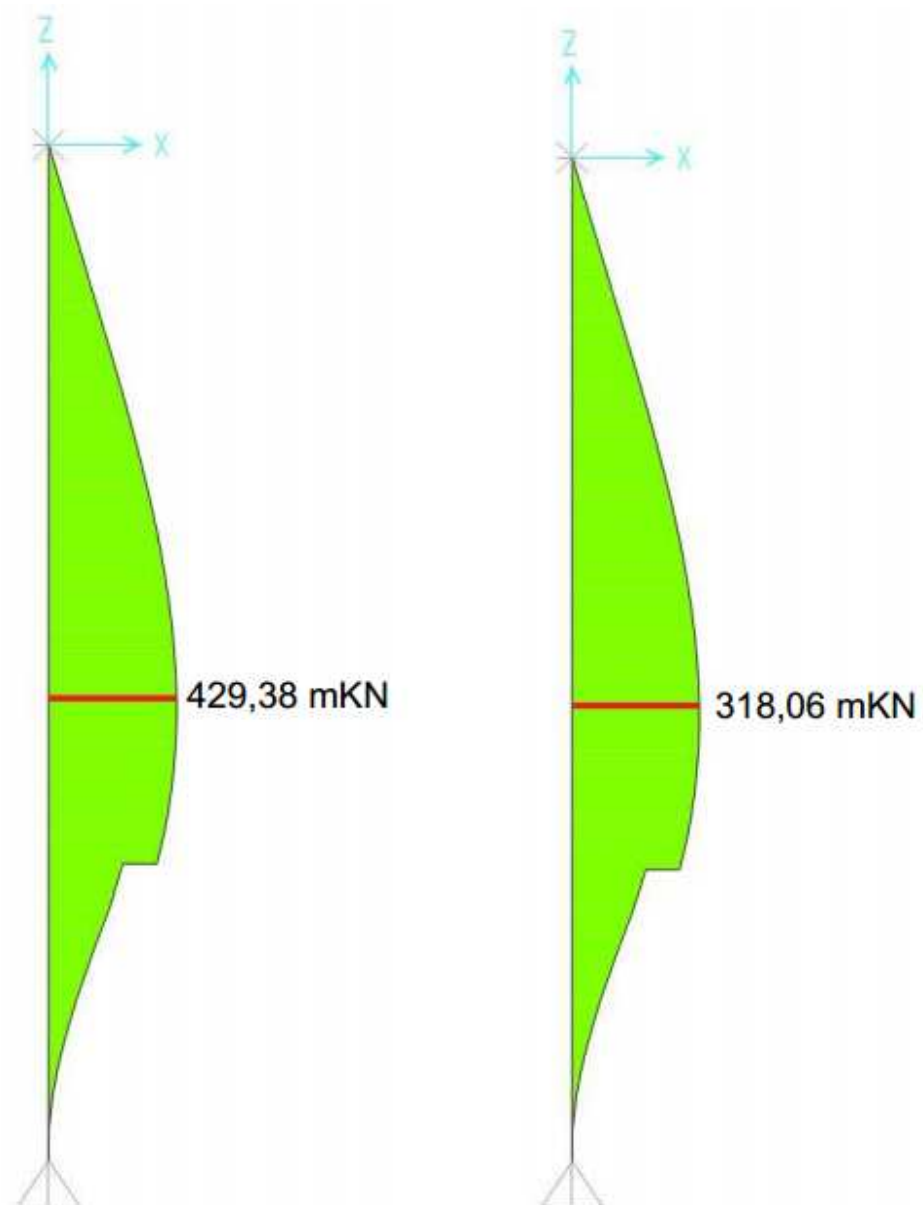


Fig. 2. Ley de momentos flectores en ELU a la izquierda y en ELS a la derecha

Recubrimiento nominal

El recubrimiento nominal se calcula según el Eurocódigo 2, Art. 4.4.1.

$$c_{\text{nom}} = c_{\text{min}} + \Delta c_{\text{dev}}$$

$$c_{\text{min}} = \max \left\{ \begin{array}{l} c_{\text{min,b}} = \phi_{\text{barra}} = 16 \text{ mm} \\ c_{\text{min,dur}} + c_{\text{dur,\gamma}} - \Delta c_{\text{dur,st}} - \Delta c_{\text{dur,add}} = 25 \text{ mm} \\ 10 \text{ mm} \end{array} \right\} = 25 \text{ mm}$$

$$\Delta c_{\text{dev}} = 10 \text{ mm (in situ con control normal)}$$

$$c_{\text{nom}} = 25 + 10 = 35 \text{ mm}$$

$$\text{Elemento hormigonado contra el terreno} \rightarrow c_{\text{nom}} = 35 \text{ mm} \geq 75 \text{ mm}$$

Cálculo de la armadura vertical

Con los esfuerzos anteriores, los resultados obtenidos en el cálculo de la armadura vertical son:

$$\text{Canto útil} \rightarrow d = 0.75 - 0.075 - 0.012 - \frac{0.016}{2} = 0.655 \text{ m}$$

$$x_{\text{lim}} = 0.404 \text{ m}$$

$$M_{1c}(x_{\text{lim}}) = 1913.74 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{1d} = M_d + N_d \cdot (d - v_1) = 473.82 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\text{Como } M_{1d} < M_{1c}(x_{\text{lim}}) \rightarrow \text{ZONA C}$$

Ahora se determina la profundidad de la fibra neutra:

$$x_{fn} = 0.079 \text{ m}$$

La armadura de cálculo es la siguiente:

$$A_s = 13.83 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$A'_s = 0 \text{ m}^2$$

Armadura vertical mínima

Según el Eurocódigo 2, Art. 9.6.2 (1) y Art. 7.3.2, la armadura longitudinal mínima que se debe disponer es:

$$\text{-Mínimo mecánico} \rightarrow A_{s,\text{min}} = 8.28 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$\text{-Mínimo para el control de la fisuración} \rightarrow A_{s,\text{min}} = 7.78 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$\text{-Mínimo geométrico} \rightarrow A_{s,\text{min}} = 6.75 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

Disposición de la armadura vertical

La armadura vertical más restrictiva es la de cálculo, siendo la armadura a disponer de 7Ø16. Se adopta como criterio de diseño el armado de las dos caras del muro pantalla con la misma armadura vertical. Cabe destacar que en muros la separación máxima entre armaduras es de 400 mm.

Comprobación de ELS

Para cumplir la abertura de fisura máxima se ha tenido que aumentar la armadura vertical a 10Ø16. A continuación se comprueba que con dicha armadura se cumplen todos los requisitos de fisuración.

$$M_{ed,caract} = 318.059 \text{ kN} \cdot \text{m} > M_{fis} = 207.87 \text{ kN} \cdot \text{m} \rightarrow \text{Sí fisura}$$

$$\sigma_{c,max} = 6.22 \text{ MPa} < 0.6 \cdot 18 = 10.8 \text{ MPa} \rightarrow \text{Cumple}$$

$$\sigma_{s,max} = 191.30 \text{ MPa} < 0.8 \cdot 500 = 400 \text{ MPa} \rightarrow \text{Cumple}$$

La abertura máxima de fisura seleccionada es de 0.3 mm para clase de exposición XC2 y hormigón armado según Eurocódigo 2. Tabla AN/9 del Anejo Nacional.

$$w_k = 0.28 \text{ mm} < w_{max} = 0.3 \text{ mm} \rightarrow \text{Cumple}$$

En resumen:

- **Armadura vertical a disponer en la cara traccionada: 10Ø16**
- **Armadura vertical a disponer en la cara comprimida: 10Ø16**

ARMADURA HORIZONTAL

En el caso de muros el Eurocódigo 2 establece en el artículo 9.6.3. (1) que se debe disponer una armadura horizontal para $f_{yk} = 500 \text{ MPa}$ y para juntas verticales de contracción con una separación inferior a 7.5 m de:

$$A_{s,h \min} = 0.002 \cdot A_c = 0.002 \cdot 0.5 \cdot 1 = 10 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{m}$$

Esta armadura calculada es para las dos caras del muro. Se adopta como criterio de diseño el reparto de dicha armadura al 50% en cada cara. Por lo tanto la armadura horizontal en cada cara será de:

$$A_{s,h \min} = 5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{m}$$

La disposición de armadura horizontal en cada cara será de Ø12/20.

COMPROBACIÓN DEL CORTANTE

Uno de los criterios de diseño es no colocar armadura de cortante. No obstante, a continuación se va a comprobar este aspecto.

El cortante con el que se realiza esta comprobación es el máximo, que en este caso se sitúa a cota -9.27 m.

$$V_{ed} = 136.31 \text{ kN}$$

$$V_{Rd,c} = 269.03 \text{ kN}$$

Como $V_{ed} < V_{Rd,c}$ no necesita armadura de cortante.

Aunque no es necesaria armadura por cortante, la armadura horizontal calculada se va a cerrar en cercos que rodeen la armadura vertical. Esto se hace únicamente para facilitar el montaje y colocación de la jaula de armadura. Por lo tanto se colocarán cercos horizontales Ø12 cada 20 cm.

DIMENSIONAMIENTO DEL ARRIOSTRAMIENTO EN CABEZA

Para el arriostramiento de las pantallas se van a utilizar perfiles metálicos laminados en caliente tipo HEB280 de acero S235. Estos perfiles se unen a los muros pantalla de la siguiente manera: los perfiles están soldados a dos angulares por el alma y estos a su vez se encuentran fijados a la pantalla con pernos de anclaje.

A continuación se desarrollan los cálculos que justifican la elección de este perfil. El modelo de cálculo utilizado es el de perfiles biarticulados.

La fuerza a compresión que le transmite la pantalla al arriostramiento es de 88.04 kN/m . Se prevé colocar perfiles cada 8.5 m, por lo tanto la fuerza que tendrán que soportar es:

$$N_d = 88.04 \cdot 8.5 = 748.34 \text{ kN}$$

De acuerdo con la EAE, para elementos sometidos a compresión, el valor de cálculo del esfuerzo axial de compresión N_d deberá verificar:

$$N_d \leq N_{b,Rd}$$

siendo:

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0.2696 \cdot 131.4 \cdot 10^{-4} \cdot 235 \cdot 10^3}{1.05} = 792.99 \text{ kN}$$

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda^2}} = \frac{1}{2.22 + \sqrt{2.22^2 - 1.65^2}} = 0.2696$$

$$\phi = 0.5 \cdot (1 + \alpha \cdot (\lambda - 0.2) + \lambda^2) = 0.5 \cdot (1 + 0.49 \cdot (1.65 - 0.2) + 1.650^2) = 2.22$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}} = \sqrt{\frac{131.4 \cdot 10^{-4} \cdot 235 \cdot 10^3}{1129.66}} = 1.65$$

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{L_{cr}^2} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{(\beta \cdot L)^2} = \frac{\pi^2 \cdot 210000 \cdot 10^3 \cdot 6595 \cdot 10^{-8}}{(1 \cdot 11)^2} = 1129.66 \text{ kN}$$

Como $N_d = 748.34 \text{ kN} \leq 792.99 \text{ kN} = N_{b,Rd}$, el perfil metálico cumple la comprobación de pandeo por axil.

VIGA DE ATADO

Para su diseño se sigue la Norma Tecnológica de la Edificación relativa a Cimentaciones con Pantalla, introduciendo, en la Tabla 9 de la citada norma, el valor del ancho de pantalla que en este caso es de 0.75 m. Se obtiene una estructura de 75 cm de ancho y 115 cm de canto.

La sección se ejecuta en hormigón armado HA-30 y acero en barras B 500 S, disponiendo un armado de:

- Armado longitudinal lateral: 8Ø20
- Armado longitudinal superior e inferior: 4Ø20
- Armado transversal: c Ø10/20

7.2 Losa inferior

La vía en placa requiere de una estructura de cimentación constituida por una losa de hormigón armado que proporcione un apoyo continuo a toda la sección transversal. Sobre esta losa descansa el conjunto de la superestructura ferroviaria, y se produce la transmisión hasta ella de los efectos de tráfico ferroviario.

La losa inferior entre pantallas puede considerarse como un elemento estructural tipo viga empotrada en los extremos y apoyada elásticamente sobre el terreno, siendo el modelo de cálculo empleado el de *viga flotante biempotrada*.

El empotramiento de la losa en las pantallas se ejecutará haciendo una roza en los muros pantalla y desdoblado las armaduras de espera que se habían preparado en ellos.

El cálculo se realizará para un metro de losa medido en dirección del trazado, luego el armado obtenido se extenderá en toda la longitud correspondiente.

Acciones a considerar

A continuación se detallan las acciones que se han considerado para el cálculo de ambas losas inferiores.

- Acciones permanentes:
 - Peso propio de la losa inferior
 $G1 = 0.4 \cdot 1 \cdot 25 = 10 \text{ kN/m}$
 - Peso propio de sistema Rheda 2000
 $G2 = 0.32 \cdot 1 \cdot 25 = 8 \text{ kN/m}$
 - Peso propio de carriles UIC-54
 $G3 = 0.54 \text{ kN}$
 - Peso propio de traviesas bloque B355 M
Las traviesas se colocan cada 0.60 m, por lo tanto en un metro de losa hay 1.67 traviesas.
 $G4 = 1.67 \cdot 183 \cdot 10^{-2} = 3.06 \text{ kN}$
 - Postes de electrificación XB
 $G5 = 2.2 \text{ kN}$
 - Peso propio del hormigón de relleno
 $G6 = 0.30 \cdot 1 \cdot 22 = 6.6 \text{ kN/m}$
- Acciones variables
 - Sobrecarga de uso del ferrocarril
Se considera un vehículo ferroviario de 22t/eje. Este valor se ve incrementado por un coeficiente α que tiene en cuenta la dinámica vertical.

El coeficiente α se halla mediante el criterio de Eisenmann:

$$\alpha = 1 + t \cdot s \cdot \varphi = 1 + 3 \cdot 0.1 \cdot \left(1 + \frac{140 - 60}{140}\right) = 1.4714$$

Por lo tanto la sobrecarga de uso de ferrocarril considerada por eje es:

$$Q1 = 1.4714 \cdot 220 = 323.71 \text{ kN}$$

LOSA - PERFIL TRANSVERSAL 1

Datos generales

- a) Materiales
 - Para las armaduras pasivas se utiliza acero en barras corrugadas B500S con un módulo de elasticidad $E_s = 200.000 \text{ MPa}$. Se ha considerado un diámetro de las armaduras longitudinales en cara superior e inferior de 20 mm y de 16 mm para las armaduras transversales.
 - Para el hormigón armado se emplea cemento tipo CEM I. La resistencia característica es de 30 MPa, la clase de exposición es XC2 y el tamaño máximo de árido 20 mm.
- b) Geometría
 - La losa inferior tiene un espesor de 0.40 m.
- c) Otras consideraciones
 - La vida útil considerada es de 100 años.
 - El nivel de control es normal.
 - El tipo de elemento es in situ.

Cálculo del coeficiente de balasto

Como se ha comentado anteriormente, la losa inferior se calcula como un elemento estructural tipo viga empotrada en los extremos y apoyada elásticamente sobre el terreno.

Para obtener los esfuerzos de cálculo se ha modelizado la losa con el programa informático SAP 2000. Para simular el comportamiento de la losa apoyada elásticamente sobre el terreno, se han introducido en dicho programa un conjunto de muelles con una rigidez obtenida a partir del coeficiente de balasto como a continuación se detalla.

En esta sección la losa inferior apoya sobre un terreno cohesivo tipo CL. Para este tipo de terreno y de acuerdo con el libro *Cálculo de estructuras de cimentación*. CALAVERA RUIZ, José, el módulo de balasto es el siguiente:

$$K_{\phi 750} = 0.05 \text{ N/mm}^3$$

$$K_c = 2.2 \cdot K_{\phi 750} \cdot \frac{n + 0.50}{1.5 \cdot n} \cdot \frac{300}{b} = 2.2 \cdot 0.05 \cdot \frac{11 + 0.50}{1.5 \cdot 11} \cdot \frac{300}{1000} = 0.023 \frac{\text{N}}{\text{mm}^3}; \quad n = \frac{a}{b} = \frac{11}{1} = 11$$

La rigidez que se ha introducido a los muelles en el programa SAP 2000 es:

$$k = 0.023 \cdot 10^6 \cdot 0.20 \cdot 1 = 4600 \text{ kN/m}$$

DIMENSIONAMIENTO A FLEXIÓN POSITIVA

Esfuerzos en la sección más desfavorable

Los esfuerzos en la losa se han obtenido con en el programa SAP 2000 mediante la modelización descrita. Cabe destacar que se han considerado dos hipótesis de cálculo, una en la que solo circula un tren y otra en la que simultáneamente circulan dos trenes en una sección.

A continuación se muestran los esfuerzos en la sección más desfavorable, que es aquella en la que el momento es máximo. Son estos esfuerzos los que se utilizan para dimensionar la losa a flexión positiva.

ELU

$$M_d = 190.75 \text{ kN} \cdot \text{m} \text{ (para la hipótesis de un solo tren)}$$

$$M_d = 150.46 \text{ kN} \cdot \text{m} \text{ (para la hipótesis de dos trenes)}$$

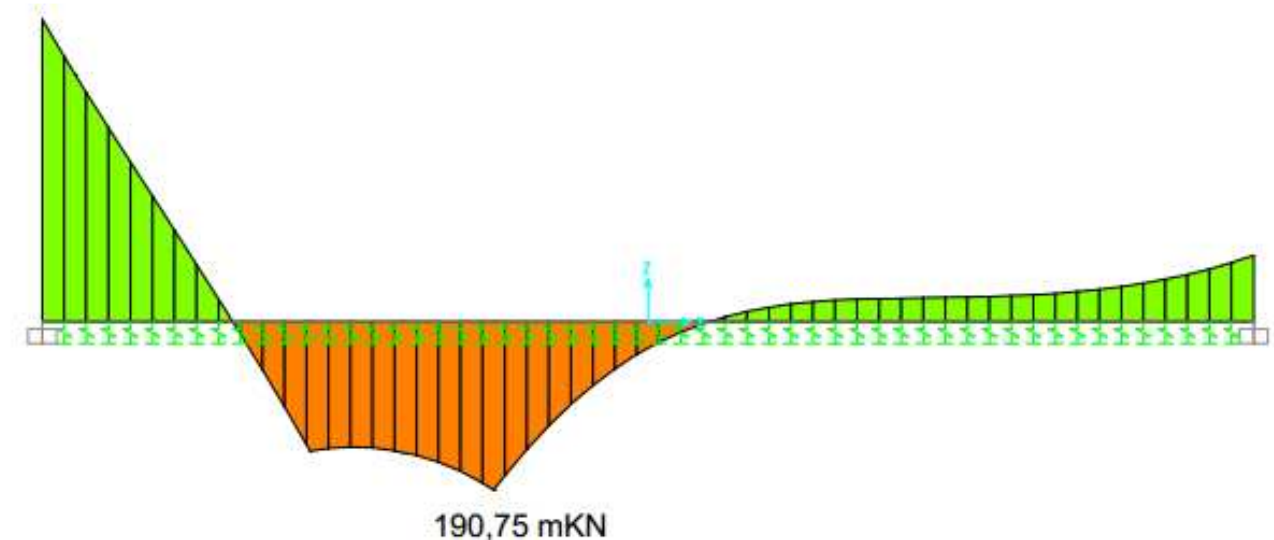


Fig. 3. Ley de momentos flectores para ELU e hipótesis de 1 tren

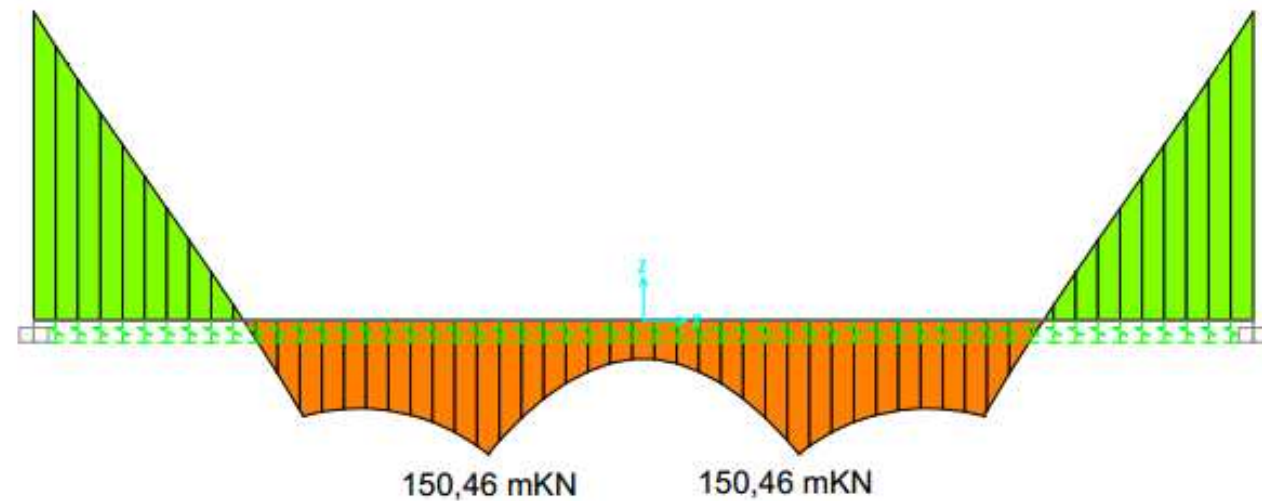


Fig. 4. Ley de momentos flectores para ELU e hipótesis de dos trenes

ELS

$M_d = 36.83 \text{ kN} \cdot \text{m}$ (para la hipótesis de un solo tren)

$M_d = 31.46 \text{ kN} \cdot \text{m}$ (para la hipótesis de dos trenes)

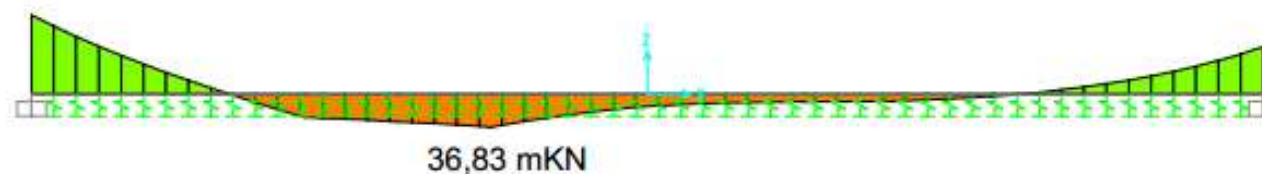


Fig. 5. Ley de momentos flectores para ELS e hipótesis de 1 tren

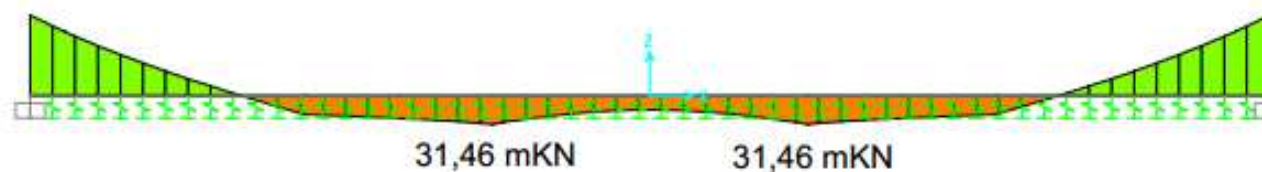


Fig. 6. Ley de momentos flectores para ELS e hipótesis de 2 trenes

Recubrimiento nominal

El recubrimiento nominal se calcula según el Eurocódigo 2, Art. 4.4.1.

$$c_{\text{nom}} = c_{\text{min}} + \Delta c_{\text{dev}}$$

$$c_{\text{min}} = \max \left\{ \begin{array}{l} c_{\text{min},b} = \phi_{\text{barra}} = 20 \text{ mm} \\ c_{\text{min},dur} + c_{dur,\gamma} - \Delta c_{dur,st} - \Delta c_{dur,add} = 25 \text{ mm} \\ 10 \text{ mm} \end{array} \right\} = 25 \text{ mm}$$

$$\Delta c_{\text{dev}} = 10 \text{ mm (in situ con control normal)}$$

$$c_{\text{nom}} = 25 + 10 = 35 \text{ mm}$$

Elemento hormigonado contra el terreno $\rightarrow c_{\text{nom}} = 35 \text{ mm} \geq 75 \text{ mm}$

Cálculo de la armadura longitudinal

Con los esfuerzos anteriores, los resultados obtenidos en el cálculo de la armadura longitudinal son:

$$\text{Canto útil} \rightarrow d = 0.40 - 0.075 - \frac{0.020}{2} = 0.315 \text{ m}$$

$$x_{\text{lim}} = 0.194 \text{ m}$$

$$M_{1c}(x_{\text{lim}}) = 737.68 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{1d} = M_d + N_d \cdot (d - v_1) = 190.75 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Como $M_{1d} < M_{1c}(x_{\text{lim}}) \rightarrow \text{ZONA C}$

Ahora se determina la profundidad de la fibra neutra:

$$x_{fn} = 0.040 \text{ m}$$

La armadura de cálculo es la siguiente:

$$A_s = 14.67 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$A'_s = 0 \text{ m}^2$$

Armadura longitudinal mínima

Según el Eurocódigo 2, Art. 7.3.2 y Art. 9.2.1.1, la armadura longitudinal mínima que se debe disponer es:

Cara inferior

$$\text{-Mínimo mecánico} \rightarrow A_{s,min} = 7.13 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$\text{-Mínimo para el control de la fisuración} \rightarrow A_{s,min} = 9.70 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

Disposición de la armadura longitudinal

La armadura longitudinal más restrictiva en la cara inferior es la de cálculo, siendo la armadura a disponer de 5 ϕ 20. Cabe destacar que en losas la separación máxima entre armaduras es de 300 mm.

Comprobación de ELS

A continuación se comprueba que con la armadura elegida se cumplen todos los requisitos de fisuración.

$$M_{ed,caract} = 36.83 \text{ kN} \cdot \text{m} < M_{fis} = 77.24 \text{ kN} \cdot \text{m} \rightarrow \text{No fisura}$$

$$\sigma_{c,max} = 1.35 \text{ MPa} < 0.6 \cdot 25 = 15 \text{ MPa} \rightarrow \text{Cumple}$$

$$\sigma_{s,max} = 4.84 \text{ MPa} < 0.8 \cdot 500 = 400 \text{ MPa} \rightarrow \text{Cumple}$$

DIMENSIONAMIENTO A FLEXIÓN NEGATIVA

Esfuerzos en la sección más desfavorable (empotramiento)

El armado de la cara superior se tiene que dimensionar con el máximo momento negativo que se produce en la unión empotrada losa-pantalla.

ELU

$$M_d = -343.19 \text{ kN} \cdot \text{m} \text{ (para la hipótesis de un solo tren)}$$

$$M_d = -347.85 \text{ kN} \cdot \text{m} \text{ (para la hipótesis de dos trenes)}$$

-343,19 mKN

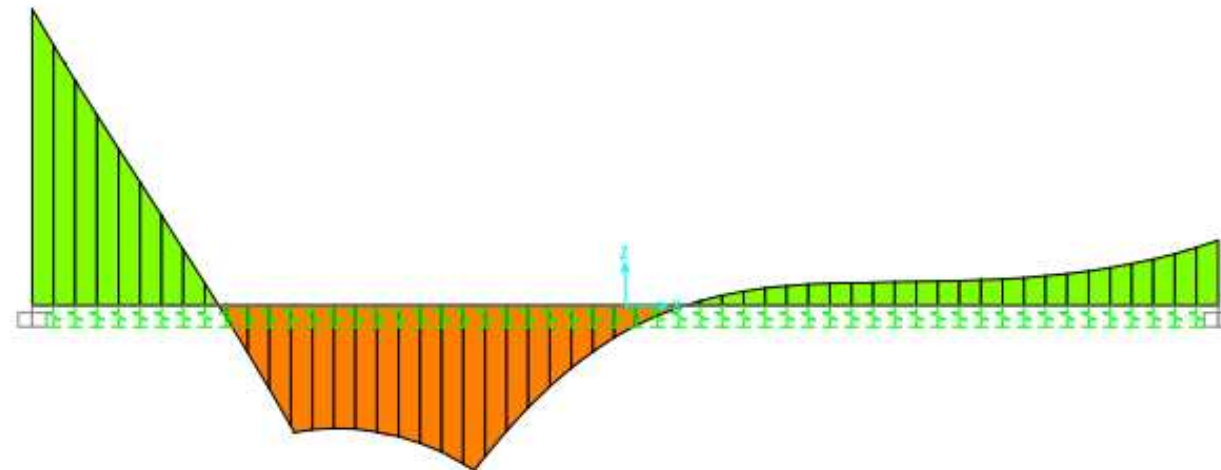


Fig. 7. Ley de momentos flectores para ELU e hipótesis de 1 tren

-347,85 mKN

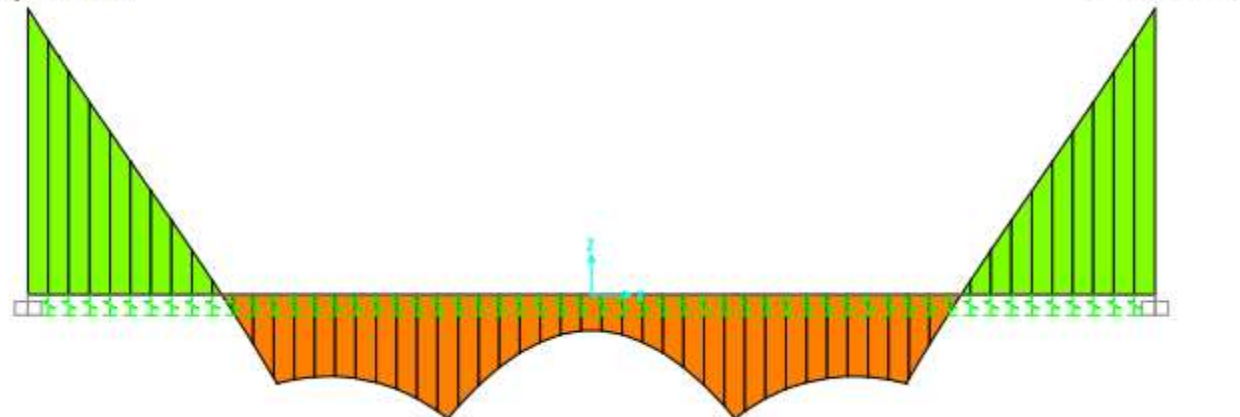


Fig. 8. Ley de momentos flectores para ELU e hipótesis de 2 trenes

ELS

$$M_d = -88.91 \text{ kN} \cdot \text{m} \text{ (para la hipótesis de un solo tren)}$$

$$M_d = -89.53 \text{ kN} \cdot \text{m} \text{ (para la hipótesis de dos trenes)}$$

-88,91 mKN

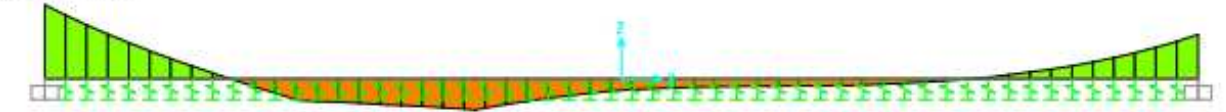


Fig. 9. Ley de momentos flectores para ELS e hipótesis de 1 tren

-89,53 mKN

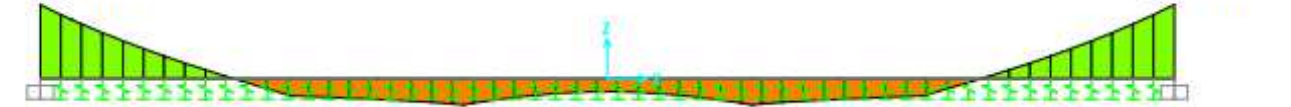


Fig. 10. Ley de momentos flectores para ELS e hipótesis de 2 trenes

Recubrimiento nominal

El recubrimiento nominal se calcula según el Eurocódigo 2, Art. 4.4.1.

$$c_{nom} = c_{min} + \Delta c_{dev}$$

$$c_{min} = \max \left\{ \begin{array}{l} c_{min,b} = \phi_{barra} = 20 \text{ mm} \\ c_{min,dur} + c_{dur,\gamma} - \Delta c_{dur,st} - \Delta c_{dur,add} = 25 \text{ mm} \\ 10 \text{ mm} \end{array} \right\} = 25 \text{ mm}$$

$$\Delta c_{dev} = 10 \text{ mm (in situ con control normal)}$$

$$c_{nom} = 25 + 10 = 35 \text{ mm}$$

$$\text{Elemento hormigonado contra el terreno} \rightarrow c_{nom} = 35 \text{ mm} \geq 75 \text{ mm}$$

Cálculo de la armadura longitudinal

Con los esfuerzos anteriores, los resultados obtenidos en el cálculo de la armadura longitudinal son:

$$\text{Canto útil} \rightarrow d = 0.40 - 0.075 - \frac{0.020}{2} = 0.315 \text{ m}$$

$$x_{lim} = 0.194 \text{ m}$$

$$M_{1c}(x_{lim}) = 737.68 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{1d} = M_d + N_d \cdot (d - v_1) = 347.85 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Como $M_{1d} < M_{1c}(x_{lim}) \rightarrow$ ZONA C

Ahora se determina la profundidad de la fibra neutra:

$$x_{fn} = 0.0764 \text{ m}$$

La armadura de cálculo es la siguiente:

$$A_s = 28.12 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$A'_s = 0 \text{ m}^2$$

Armadura longitudinal mínima

Según el Eurocódigo 2, Art. 7.3.2 y Art. 9.2.1.1, la armadura longitudinal mínima que se debe disponer es:

Cara superior

$$\text{-Mínimo mecánico} \rightarrow A_{s,min} = 7.50 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$\text{-Mínimo para el control de la fisuración} \rightarrow A_{s,min} = 9.70 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

Disposición de la armadura longitudinal

La armadura longitudinal más restrictiva en la cara superior es la de cálculo, siendo la armadura a disponer de 10Ø20. Cabe destacar que en losas la separación máxima entre armaduras es de 300 mm.

Comprobación de ELS

A continuación se comprueba que con la armadura elegida se cumplen todos los requisitos de fisuración.

$$M_{ed,caract} = 89.53 \text{ kN} \cdot \text{m} < M_{fis} = 77.24 \text{ kN} \cdot \text{m} \rightarrow \text{Sí fisura}$$

$$\sigma_{c,max} = 6.57 \text{ MPa} < 0.6 \cdot 25 = 15 \text{ MPa} \rightarrow \text{Cumple}$$

$$\sigma_{s,max} = 91.64 \text{ MPa} < 0.8 \cdot 500 = 400 \text{ MPa} \rightarrow \text{Cumple}$$

La abertura máxima de fisura seleccionada es de 0.3 mm para clase de exposición XC2 y hormigón armado según Eurocódigo 2. Tabla AN/9 del Anejo Nacional.

$$w_k = 0.10 \text{ mm} < w_{max} = 0.3 \text{ mm} \rightarrow \text{Cumple}$$

En resumen:

- **Armadura longitudinal a disponer en la cara inferior: Ø20/20**
- **Armadura longitudinal a disponer en la cara superior: Ø20/10**

ARMADURA TRANSVERSAL

En el caso de losas, el Eurocódigo 2 establece en el artículo 9.3.1.1 (2) que se debe disponer una armadura transversal secundaria inferior no menor que el 20% de la armadura principal.

Cara superior

$$A_s/s = \frac{0.00314}{1} = 31.4 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{m}$$

$$A_{s,t} = 0.2 \cdot 31.4 \cdot 10^{-4} = 6.28 \cdot 10^{-4} \rightarrow \text{Se colocarán } \mathbf{\varnothing 16/25}$$

Cara inferior

En la cara inferior se colocará la misma armadura transversal que en la cara superior, es decir, **Ø16/25**.

COMPROBACIÓN DEL CORTANTE

Uno de los criterios de diseño es no colocar armadura de cortante. No obstante, a continuación se va a comprobar este aspecto.

El cortante con el que se realiza esta comprobación es el máximo, que en este caso se sitúa en los extremos de la losa, es decir, en la unión con la pantalla.

$$V_{ed} = 212.40 \text{ kN} \text{ (para la hipótesis de un solo tren)}$$

$$V_{ed} = 197.40 \text{ kN} \text{ (para la hipótesis de dos trenes)}$$

$$V_{Rd,c} = 215.81 \text{ kN}$$

Como $V_{ed} < V_{Rd,c}$ no necesita armadura de cortante.

COMPROBACIÓN GEOTÉCNICA DEL TERRENO

Se tiene que comprobar que los esfuerzos que la losa transmite al terreno no superan la carga de hundimiento de este. Para realizar dicha comprobación, se ha utilizado el valor máximo de la reacción en los muelles con los que se ha modelizado el terreno en SAP2000. En este caso dicho valor es de 26.09 kN. Por lo tanto, la tensión máxima que la losa transmite al terreno es de:

$$\sigma_{max} = 26.09 \cdot 0.2 \cdot 1 = 5.22 \text{ kN/m}^2$$

La tensión a la que estaba sometida el terreno a -8.5 m antes de ejecutarse la excavación era de:

$$q_0 = 150.78 \text{ kN/m}^2$$

Como $q_0 > \sigma_{max}$, se cumple esta comprobación.

LOSA - PERFIL TRANSVERSAL 2

Datos generales

- a) Materiales
 - Para las armaduras pasivas se utiliza acero en barras corrugadas B500S con un módulo de elasticidad $E_s = 200.000 \text{ MPa}$. Se ha considerado un diámetro de las armaduras longitudinales en cara superior e inferior de 20 mm y de 12 mm para las armaduras transversales.
 - Para el hormigón armado se emplea cemento tipo CEM I. La resistencia característica es de 30 MPa, la clase de exposición es XC2 y el tamaño máximo de árido 20 mm.
- b) Geometría
 - La losa inferior tiene un espesor de 0.40 m.
- c) Otras consideraciones
 - La vida útil considerada es de 100 años.
 - El nivel de control es normal.
 - El tipo de elemento es in situ.

Cálculo del coeficiente de balasto

Como se ha comentado anteriormente, la losa inferior se calcula como un elemento estructural tipo viga empotrada en los extremos y apoyada elásticamente sobre el terreno.

Para obtener los esfuerzos de cálculo se ha modelizado la losa con el programa informático SAP 2000. Para simular el comportamiento de la losa apoyada elásticamente sobre el terreno, se han introducido en dicho programa un conjunto de muelles con una rigidez obtenida a partir del coeficiente de balasto como a continuación se detalla.

En esta sección la losa inferior apoya sobre un terreno granular tipo SC. Para este tipo de terreno y de acuerdo con el libro *Cálculo de estructuras de cimentación*. CALAVERA RUIZ, José, el módulo de balasto es el siguiente:

$$K_{300} = 0.25 \text{ N/mm}^3$$

$$K_c = K_{300} \cdot \left(\frac{b + 300}{2 \cdot b} \right)^2 = 0.25 \cdot \left(\frac{1000 + 300}{2 \cdot 1000} \right)^2 = 0.106 \text{ N/mm}^3$$

La rigidez que se ha introducido a los muelles en el programa SAP 2000 es:

$$k = 0.106 \cdot 10^6 \cdot 0.20 \cdot 1 = 21200 \text{ kN/m}$$

DIMENSIONAMIENTO A FLEXIÓN POSITIVA

Esfuerzos en la sección más desfavorable

Los esfuerzos en la losa se han obtenido con en el programa SAP 2000 mediante la modelización descrita. Cabe destacar que se han considerado dos hipótesis de cálculo, una en la que solo circula un tren y otra en la que simultáneamente circulan dos trenes en una sección.

A continuación se muestran los esfuerzos en la sección más desfavorable, que es aquella en la que el momento es máximo. Son estos esfuerzos los que se utilizan para dimensionar la losa a flexión positiva.

ELU

$$M_d = 95.72 \text{ kN} \cdot \text{m} \text{ (para la hipótesis de un solo tren)}$$

$$M_d = 87.12 \text{ kN} \cdot \text{m} \text{ (para la hipótesis de dos trenes)}$$

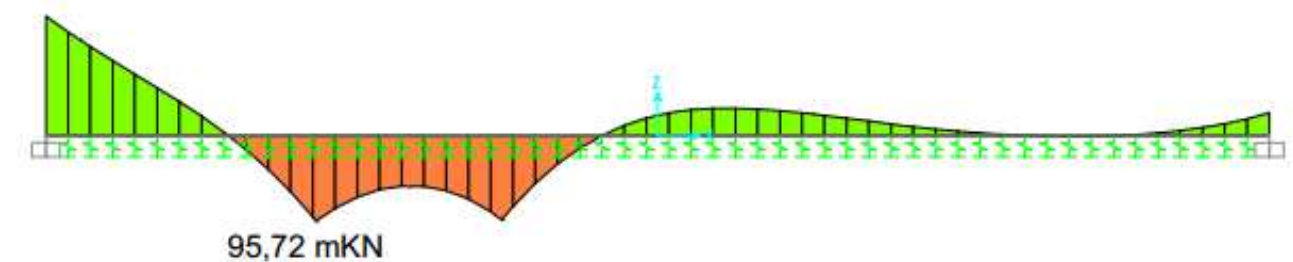


Fig. 11. Ley de momentos flectores para ELU e hipótesis de 1 tren

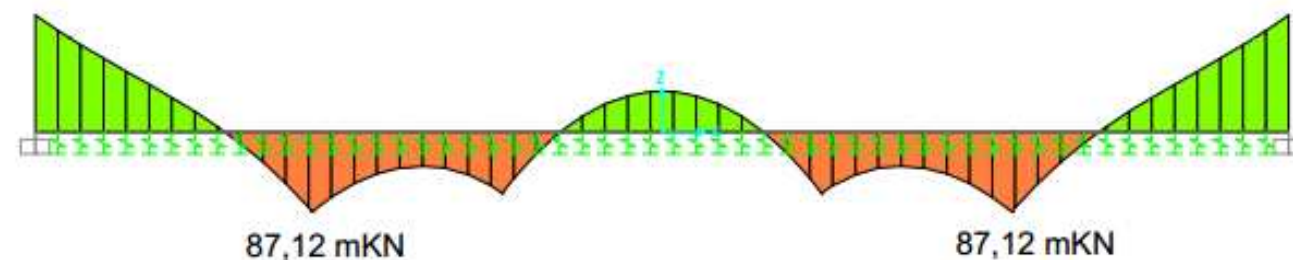


Fig. 12. Ley de momentos flectores para ELU e hipótesis de 2 trenes

ELS

$$M_d = 17.08 \text{ kN} \cdot \text{m} \text{ (para la hipótesis de un solo tren)}$$

$$M_d = 15.93 \text{ kN} \cdot \text{m} \text{ (para la hipótesis de dos trenes)}$$

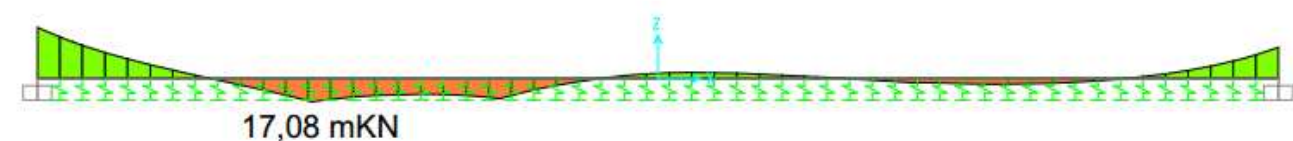


Fig. 13. Ley de momentos flectores para ELS e hipótesis de 1 tren

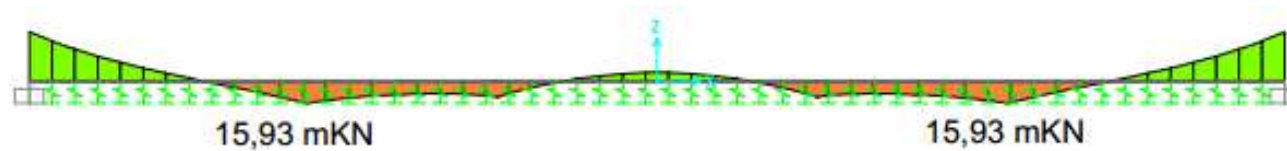


Fig. 14. Ley de momentos flectores para ELS e hipótesis de 2 trenes

Recubrimiento nominal

El recubrimiento nominal se calcula según el Eurocódigo 2, Art. 4.4.1.

$$c_{nom} = c_{min} + \Delta c_{dev}$$

$$c_{min} = \max \left\{ \begin{array}{l} c_{min,b} = \phi_{barra} = 20 \text{ mm} \\ c_{min,dur} + c_{dur,\gamma} - \frac{\Delta c_{dur,st} - \Delta c_{dur,add}}{10 \text{ mm}} = 25 \text{ mm} \end{array} \right\} = 25 \text{ mm}$$

$$\Delta c_{dev} = 10 \text{ mm (in situ con control normal)}$$

$$c_{nom} = 25 + 10 = 35 \text{ mm}$$

$$\text{Elemento hormigonado contra el terreno} \rightarrow c_{nom} = 35 \text{ mm} \geq 75 \text{ mm}$$

Cálculo de la armadura longitudinal

Con los esfuerzos anteriores, los resultados obtenidos en el cálculo de la armadura longitudinal son:

$$\text{Canto útil} \rightarrow d = 0.40 - 0.075 - \frac{0.020}{2} = 0.315 \text{ m}$$

$$x_{lim} = 0.194 \text{ m}$$

$$M_{1c}(x_{lim}) = 737.68 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{1d} = M_d + N_d \cdot (d - v_1) = 95.72 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\text{Como } M_{1d} < M_{1c}(x_{lim}) \rightarrow \text{ZONA C}$$

Ahora se determina la profundidad de la fibra neutra:

$$x_{fn} = 0.0195 \text{ m}$$

La armadura de cálculo es la siguiente:

$$A_s = 7.17 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$A'_s = 0 \text{ m}^2$$

Armadura longitudinal mínima

Según el Eurocódigo 2, Art. 7.3.2 y Art. 9.2.1.1, la armadura longitudinal mínima que se debe disponer es:

Cara inferior

$$\text{-Mínimo mecánico} \rightarrow A_{s,min} = 6.94 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$\text{-Mínimo para el control de la fisuración} \rightarrow A_{s,min} = 9.70 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

Disposición de la armadura longitudinal

La armadura longitudinal más restrictiva en la cara inferior es el mínimo por fisuración, siendo la armadura a disponer de $4\phi 20$. Cabe destacar que en losas la separación máxima entre armaduras es de 300 mm.

Comprobación de ELS

A continuación se comprueba que con la armadura elegida se cumplen todos los requisitos de fisuración.

$$M_{ed,caract} = 17.08 \text{ kN} \cdot \text{m} < M_{fis} = 77.24 \text{ kN} \cdot \text{m} \rightarrow \text{No fisura}$$

$$\sigma_{c,max} = 0.64 \text{ MPa} < 0.6 \cdot 25 = 15 \text{ MPa} \rightarrow \text{Cumple}$$

$$\sigma_{s,max} = 2.24 \text{ MPa} < 0.8 \cdot 500 = 400 \text{ MPa} \rightarrow \text{Cumple}$$

DIMENSIONAMIENTO A FLEXIÓN NEGATIVA

Esfuerzos en la sección más desfavorable (empotramiento)

El armado de la cara superior se tiene que calcular con el máximo momento negativo que se produce en la unión empotrada losa-pantalla.

ELU

$$M_d = -133.79 \text{ kN} \cdot \text{m} \text{ (para la hipótesis de un solo tren)}$$

$$M_d = -127.45 \text{ kN} \cdot \text{m} \text{ (para la hipótesis de dos trenes)}$$

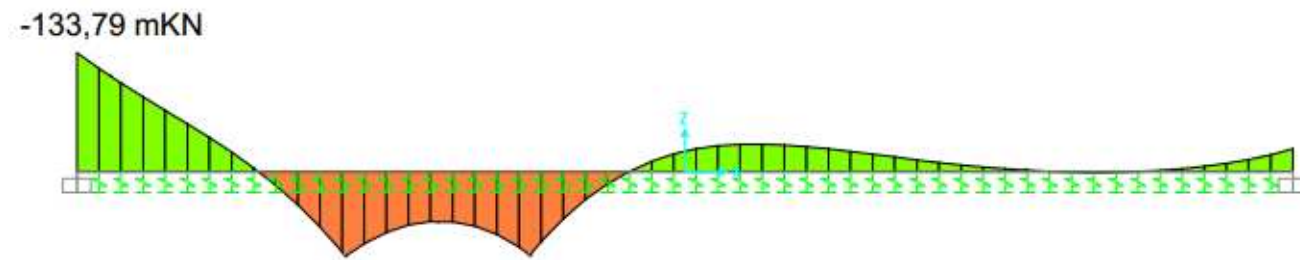


Fig. 15. Ley de momentos flectores para ELU e hipótesis de 1 tren

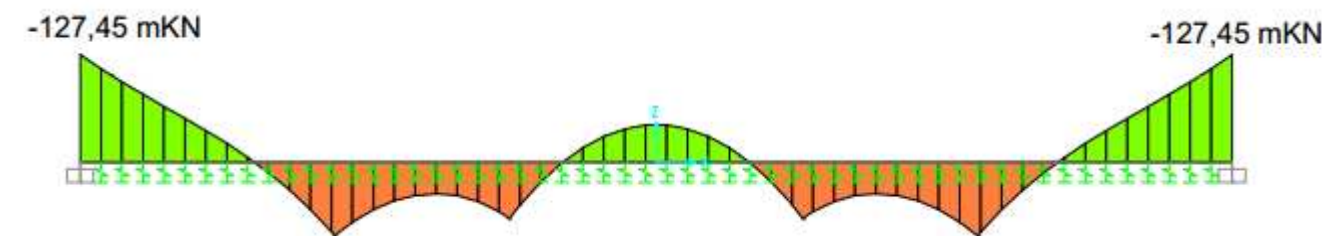


Fig. 16. Ley de momentos flectores para ELU e hipótesis de 2 trenes

ELS

$M_d = -37.09 \text{ kN} \cdot \text{m}$ (para la hipótesis de un solo tren)

$M_d = -36.25 \text{ kN} \cdot \text{m}$ (para la hipótesis de dos trenes)

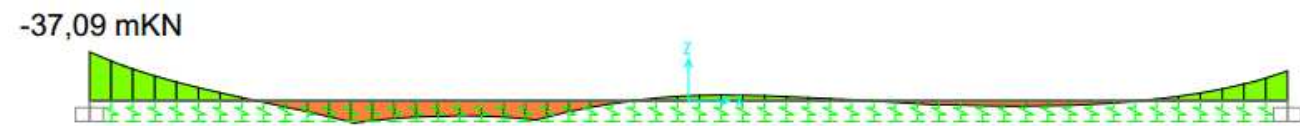


Fig. 17. Ley de momentos flectores para ELS e hipótesis de 1 tren

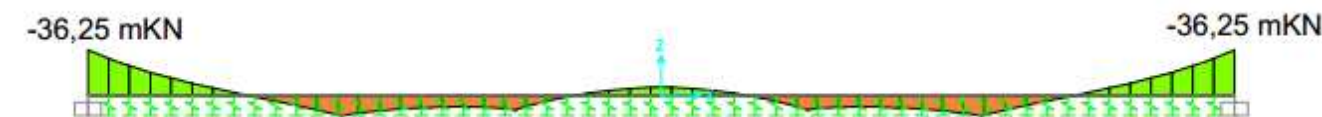


Fig. 18. Ley de momentos flectores para ELS e hipótesis de 2 trenes

Recubrimiento nominal

El recubrimiento nominal se calcula según el Eurocódigo 2, Art. 4.4.1.

$$c_{nom} = c_{min} + \Delta c_{dev}$$

$$c_{min} = \max \left\{ \begin{array}{l} c_{min,b} = \phi_{barra} = 20 \text{ mm} \\ c_{min,dur} + c_{dur,\gamma} - \Delta c_{dur,st} - \Delta c_{dur,add} = 25 \text{ mm} \\ 10 \text{ mm} \end{array} \right\} = 25 \text{ mm}$$

$$\Delta c_{dev} = 10 \text{ mm (in situ con control normal)}$$

$$c_{nom} = 25 + 10 = 35 \text{ mm}$$

Elemento hormigonado contra el terreno $\rightarrow c_{nom} = 35 \text{ mm} \geq 75 \text{ mm}$

Cálculo de la armadura longitudinal

Con los esfuerzos anteriores, los resultados obtenidos en el cálculo de la armadura longitudinal son:

$$\text{Canto útil} \rightarrow d = 0.40 - 0.075 - \frac{0.020}{2} = 0.315 \text{ m}$$

$$x_{lim} = 0.194 \text{ m}$$

$$M_{1c}(x_{lim}) = 737.68 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{1d} = M_d + N_d \cdot (d - v_1) = 133.79 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Como $M_{1d} < M_{1c}(x_{lim}) \rightarrow \text{ZONA C}$

Ahora se determina la profundidad de la fibra neutra:

$$x_{fn} = 0.0275 \text{ m}$$

La armadura de cálculo es la siguiente:

$$A_s = 10.12 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$A'_s = 0 \text{ m}^2$$

Armadura longitudinal mínima

Según el Eurocódigo 2, Art. 7.3.2 y Art. 9.2.1.1, la armadura longitudinal mínima que se debe disponer es:

Cara superior

$$\text{-Mínimo mecánico} \rightarrow A_{s,min} = 7.01 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$\text{-Mínimo para el control de la fisuración} \rightarrow A_{s,min} = 9.70 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

Disposición de la armadura longitudinal

La armadura longitudinal más restrictiva en la cara superior es la de cálculo, siendo la armadura a disponer de $4\phi 20$. Cabe destacar que en losas la separación máxima entre armaduras es de 300 mm.

Comprobación de ELS

A continuación se comprueba que con la armadura elegida se cumplen todos los requisitos de fisuración.

$$M_{ed,caract} = 37.09 \text{ kN} \cdot \text{m} < M_{fis} = 77.24 \text{ kN} \cdot \text{m} \rightarrow \text{No fisura}$$

$$\sigma_{c,max} = 1.40 \text{ MPa} < 0.6 \cdot 25 = 15 \text{ MPa} \rightarrow \text{Cumple}$$

$$\sigma_{s,max} = 4.87 \text{ MPa} < 0.8 \cdot 500 = 400 \text{ MPa} \rightarrow \text{Cumple}$$

En resumen:

- Armadura longitudinal a disponer en la cara inferior: $\varnothing 20/25$
- Armadura longitudinal a disponer en la cara superior: $\varnothing 20/25$

ARMADURA TRANSVERSAL

En el caso de losas, el Eurocódigo 2 establece en el artículo 9.3.1.1 (2) que se debe disponer una armadura transversal secundaria inferior no menor que el 20% de la armadura principal.

Cara superior

$$A_s/s = \frac{0.001257}{1} = 12.57 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{m}$$

$$A_{s,t} = 0.2 \cdot 12.57 \cdot 10^{-4} = 2.51 \cdot 10^{-4} \rightarrow \text{Se colocarán } \varnothing 12/25$$

Cara inferior

En la cara inferior se colocará la misma armadura transversal que en la cara superior, es decir, $\varnothing 12/25$.

COMPROBACIÓN DEL CORTANTE

Uno de los criterios de diseño es no colocar armadura de cortante. No obstante, a continuación se va a comprobar este aspecto.

El cortante con el que se realiza esta comprobación es el máximo, que en este caso se sitúa en los extremos de la losa, es decir, en la unión con la pantalla.

$$V_{ed} = 90.70 \text{ kN} \text{ (para la hipótesis de un solo tren)}$$

$$V_{ed} = 85.99 \text{ kN} \text{ (para la hipótesis de dos trenes)}$$

$$V_{Rd,c} = 207.77 \text{ kN}$$

Como $V_{ed} < V_{Rd,c}$ no necesita armadura de cortante.

COMPROBACIÓN GEOTÉCNICA DEL TERRENO

Se tiene que comprobar que los esfuerzos que la losa transmite al terreno no superan la carga de hundimiento de este. Para realizar dicha comprobación, se ha utilizado el valor máximo de la

reacción en los muelles con los que se ha modelizado el terreno en SAP2000. En este caso dicho valor es de 29.14 kN. Por lo tanto, la tensión máxima que la losa transmite al terreno es de:

$$\sigma_{max} = 29.14 \cdot 0.2 \cdot 1 = 5.83 \text{ kN/m}^2$$

La tensión a la que estaba sometida el terreno a -8.5 m antes de ejecutarse la excavación era de:

$$q_0 = 151.80 \text{ kN/m}^2$$

Como $q_0 > \sigma_{max}$, se cumple esta comprobación.

8. SISTEMA RHEDA 2000

La superestructura ferroviaria se proyecta con vía en placa mediante el sistema Rheda 2000. Este sistema se compone de traviesas bloque que se integran en una estructura monolítica de hormigón armado. Para garantizar la durabilidad necesaria, la resistencia del hormigón debe ser de 30 MPa.

El armado de la vía en placa no se calcula en este anejo puesto que el sistema Rheda 2000 utilizado ya tiene definido un armado conveniente para soportar el tráfico ferroviario.

En la siguiente figura se recoge una sección tipo del sistema Rheda 2000 en recta.

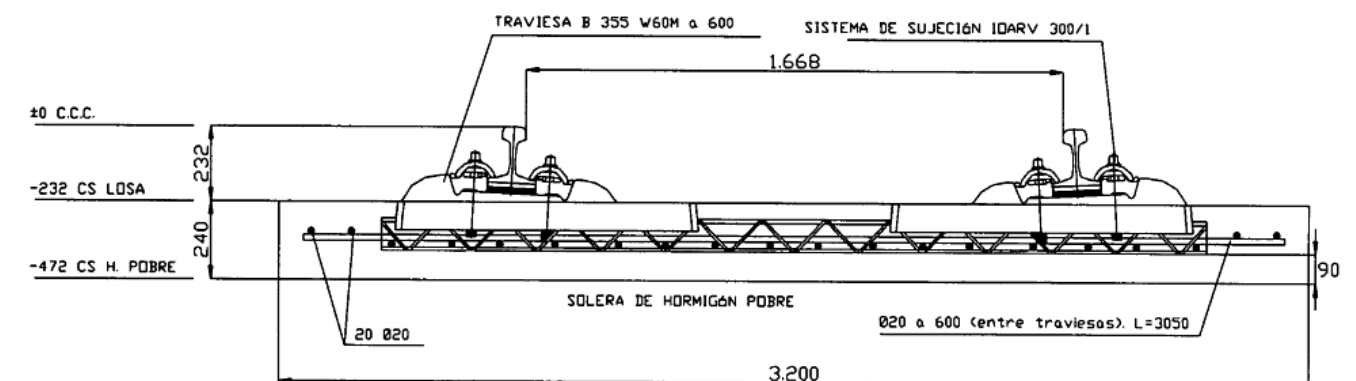


Fig. 19. Sistema Rheda 2000

Como se puede apreciar en la figura anterior la distribución de armadura es la siguiente:

- Armadura longitudinal: 20 \varnothing 20
- Armadura transversal: \varnothing 20/60