

DISEÑO Y CÁLCULO DE TRANSICIONES OBRA DE PASO-TERRAPLÉN

José M. Simón-Talero, Pedro P. Sánchez, Ramón Merino
TORROJA INGENIERÍA, S.L.

1. DISEÑO DE LAS LOSAS DE TRANSICIÓN EN ESPAÑA

Como es bien sabido, la forma tradicional de resolver las transiciones obra de paso-terraplén en las carreteras españolas ha sido mediante la conocidísima “losa de transición”. Su diseño y dimensiones vienen amparados por la “Nota de Servicio sobre losas de transición en obras de paso” de la Dirección General de Carreteras de Julio de 1992.

En este documento:

- Se fijan los requerimientos que deben cumplir.
- Se define su posición y dimensiones.
- Se detallan las armaduras a disponer.

Se presenta a continuación un resumen de lo incluido en la citada Nota de Servicio, ordenado conforme a los tres aspectos relacionados en la lista anterior.

a) Requerimientos básicos

El objeto de la losa de transición es asegurar un paso suave desde el terraplén de acceso, que es flexible, a otra zona más rígida que es la constituida por la propia obra de paso. Por ello la Nota de Servicio fija los requisitos funcionales en términos de variación de pendiente y de asiento máximo del acceso a nivel de rasante.

Así, para Autopistas y Autovías los requisitos a cumplir son:

- Que la máxima diferencia de pendiente no supere el 0,33%.
- Que el asiento no supere el trescientosavo de la longitud de la losa.
- Que el asiento máximo que se produzca no supere 1,5 cm para una losa de 5 m de longitud.

b) Posición y dimensiones

Para pavimentos bituminosos se propugna una losa de transición inclinada con el 10% de pendiente. En alzado *“la profundidad de la cara superior de la losa de transición, en su extremo del lado del tablero, será la menor compatible con que pase sobre ella todo el pavimento, y también la base, pero reducida al espesor mínimo constructivo que permita el material que se emplee”*.

En lo que respecta a sus dimensiones, se aboga por una losa de 5 m de longitud y una anchura igual a la de la plataforma (calzada+arcenes). La losa tendrá 0,30 m de espesor y será de hormigón HA-20 (hoy en día HA-25) sobre un lecho de hormigón de limpieza de hormigón en masa HM-15 de 0,10 m de espesor. La losa se apoyará en el estribo sobre un tacón de 0,30 m de anchura mediante una rótula plástica de hormigón de 0,08 m de anchura cosida con pasadores $\phi 20$ cada 1 m. Se reproduce a continuación la figura 2 de la Nota de Servicio que define la geometría citada.

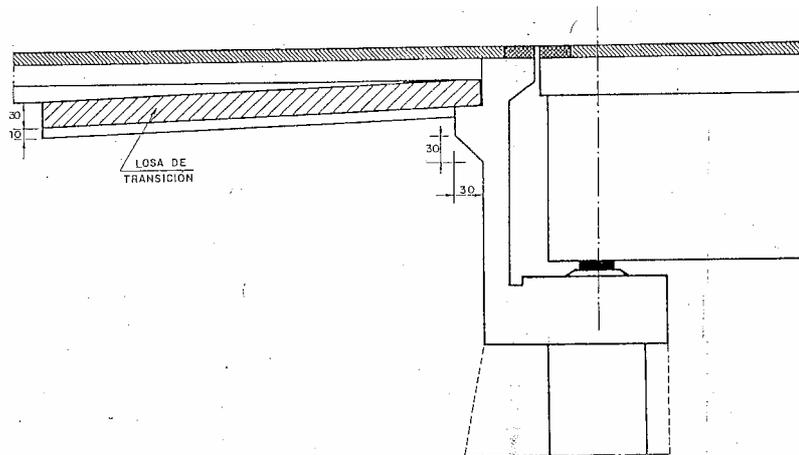
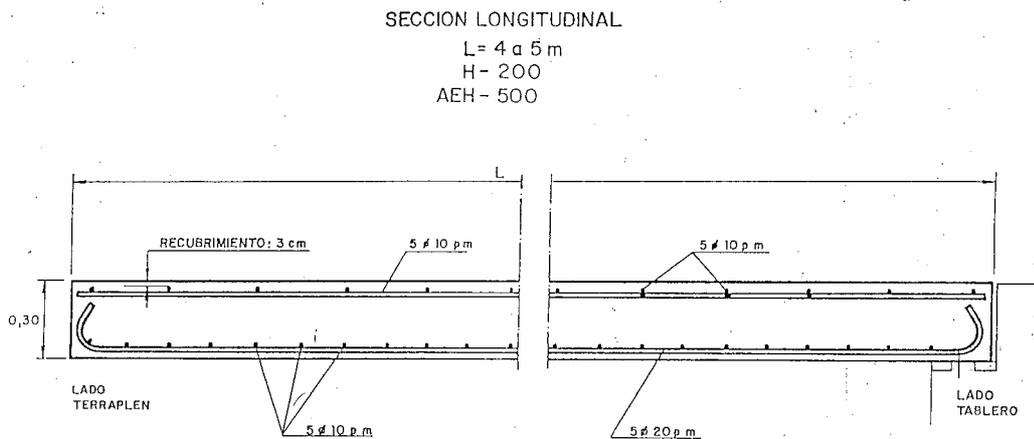


Fig. 1: Nota de Servicio de la DGC (1992). Dimensiones de la losa de transición

c) Armaduras

La Nota de Servicio también define la armadura a disponer en losas de 5 m de longitud y 0,30 m de canto. Se reproduce la figura 6 de la Nota de Servicio que muestra de forma gráfica dicha armadura. En esencia, se trata de una armadura de flexión positiva constituida por $5\phi 20$ pml complementada con unas armaduras de reparto constituidas por $5\phi 10$ pml.



2. EL CÁLCULO DE LAS LOSAS DE TRANSICIÓN

En el Proyecto de una obra de paso de hormigón las dimensiones y armaduras de cada elemento estructural se fijan con un cierto criterio y luego se validan mediante los cálculos correspondientes. También es el caso de las cimentaciones: se comprueba que con las cargas que transmite la estructura al terreno no se alcanzan tensiones excesivas ni se producen asentamientos inadmisibles.

No ocurre lo mismo en otros aspectos del Proyecto como puede ser, por ejemplo, el caso de los firmes en que, en base a la calidad del terreno de asiento y el tipo de tráfico, se elige un determinado firme avalado por la Normativa Vigente que rija sobre el particular. Algo parecido ocurre con las losas de transición; no se calculan sino que, directamente, se reproducen en los Planos de Proyecto las dimensiones y armaduras definidas en la antedicha Nota de Servicio de la DGC. Entonces nos asalta la duda de si, realmente, nuestro diseño cumple, para cada caso particular, los requisitos básicos exigidos en la Nota de Servicio (variación de pendiente menor del 0,33%, asiento máximo de 0,015 m...).

Una aproximación grosera al problema pasa por suponer que el terreno bajo la losa asienta y que ésta se comporta como una viga biapoyada de 5 m de luz. Si se considera un relleno sobre ella de 0,85 m de espesor y la actuación de una sobrecarga uniforme de 10 kN/m^2 actuando a nivel de la rasante, se obtiene una armadura necesaria de $15 \text{ cm}^2/\text{m}$ que coincide con la propugnada por la Nota de Servicio.

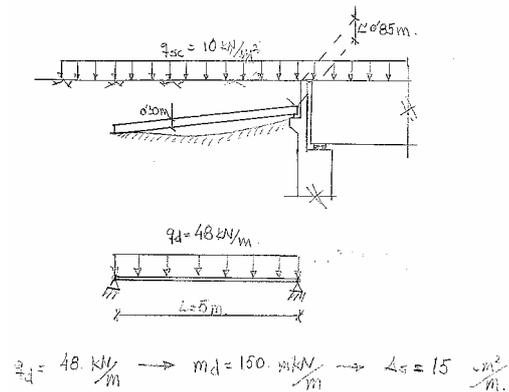


Fig. 3: Losa de transición biapoyada

Para tener una idea más aproximada del comportamiento de diferentes losas de transición se ha modelizado el conjunto trasdós del estribo-losa de transición-terreno mediante el método de los elementos finitos. En el modelo plano, el terreno se ha supuesto con $\varphi = 35^\circ$ y $E = 80.000 \text{ kN/m}^2$ y se han aplicado las cargas de la IAP a nivel de la rasante, sin haber afectado dichas cargas de ningún coeficiente de amplificación dinámica.

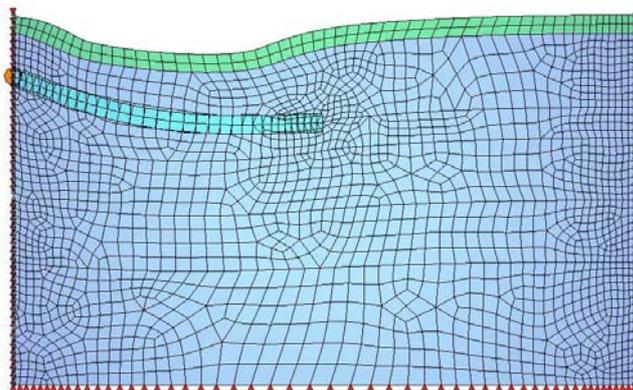


Fig. 4: Modelo de elementos finitos para el estudio de la losa de transición

En los gráficos que siguen se muestran las flechas calculadas a nivel de rasante superior para diversas longitudes de losa (desde 2,5 m hasta 7,5 m). También se muestran las flechas que se producen para una longitud de losa de 5 m y diferentes alturas de terraplén bajo la losa. Del análisis cualitativo de los resultados obtenidos se puede deducir que:

- Si no se dispone losa de transición, la pendiente de la deformada supera el límite admisible del 0,3% para alturas de terraplén mayores de 7,5 m, aproximadamente. Colocando losa de transición dicha pendiente se reduce al 0,22%.

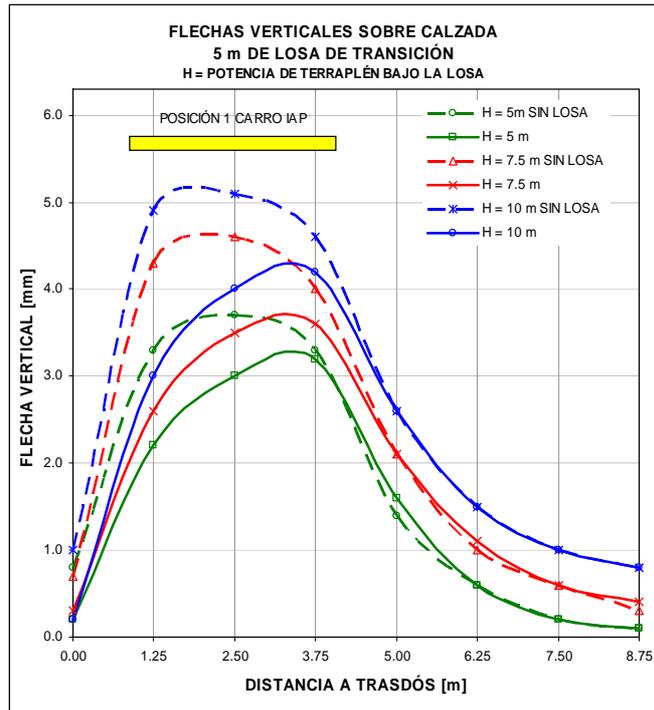


Fig. 5: Asientos en coronación para losa de 5 m de longitud

- Con losas de más de 5 m de longitud el comportamiento de la transición no varía, siempre que las condiciones de los materiales del terraplén y sus condiciones de ejecución sean correctas.

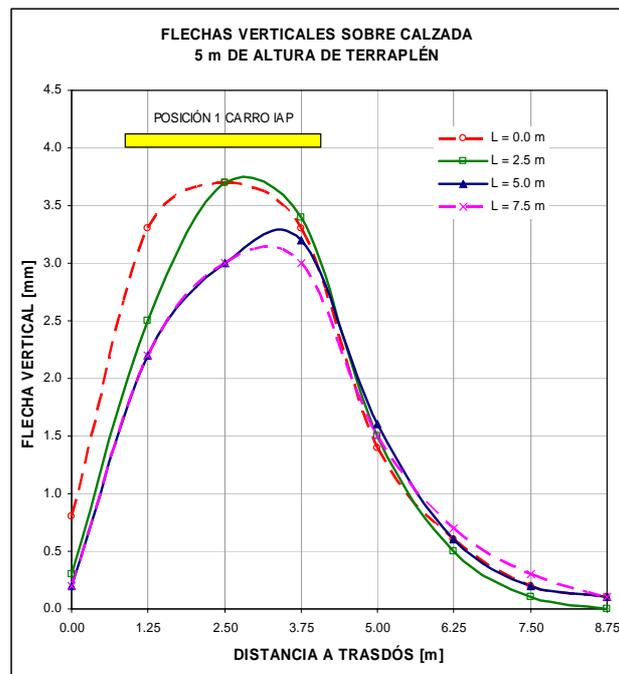


Fig. 6: Asientos en coronación en función de la longitud de la losa

3. LAS CUÑAS DE TRANSICIÓN

La disposición de un relleno especial en la zona del terraplén colindante con la obra de paso en lugar de la losa de transición es una solución habitual en puentes ferroviarios y ya empleada en obras de carretera. Así, ya en 1994 se dispuso un relleno de suelo-cemento en el trasdós del estribo 1 del puente sobre el río Ebro en Riba-Roja en lugar de la solución convencional de losa de transición.

Sin embargo, no es hasta Octubre del 2002 cuando el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carretera y Puentes (PG-3) de la DGC del Ministerio de Fomento incluye una mención expresa a las denominadas “cuñas de transición”. En efecto, en el artículo 332 dedicado a los “rellenos localizados” se indica que la extensión y compactación de suelos en los trasdoses de las obras de fábrica exige cuidados especiales en su construcción debido a su compromiso estructural y a su reducida extensión”. Por ello, en esas zonas se propone que dichos rellenos se coloquen en la dirección longitudinal de la calzada soportada conformando la llamada “cuña de transición” que deberá tener las siguientes características:

- Condiciones geométricas
 - Longitud mínima en coronación de 10 m.
 - Pendiente máxima de la transición del relleno localizado al relleno normal 1V:2H.

- Condiciones de los materiales y de la ejecución
 - Se utilizarán sólo suelos adecuados o seleccionados.
 - El espesor de las tongadas medido después de la compactación será inferior a 0,25 m.
 - Se tendrá un CBR superior a 20.
 - En coronación la densidad después de la compactación no será inferior al 100% de la máxima obtenida en el ensayo Próctor modificado. En el resto de las zonas dicha densidad no bajará del 95% de la citada máxima densidad.

En la figura 4 se muestra la representación gráfica de la cuña de transición propuesta por el PG-3.

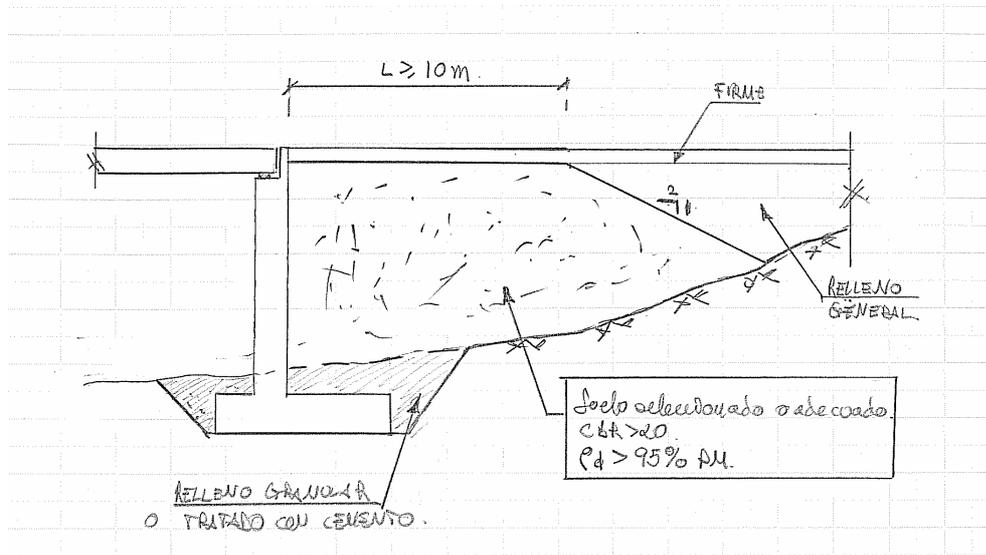


Figura 7: Cuña de transición propuesta por el PG-3 (versión Octubre 2002)

Coetánea con la versión del PG-3 de Octubre de 2002 es la edición definitiva de la “Guía de Cimentaciones en Obras de Carretera” editada por la DGC del Ministerio de Fomento. En esta publicación se define de forma gráfica la cuña de transición propuesta en el ya citado artículo 332 del PG-3. A continuación se reproduce la fig. 6.5 de la Guía de Cimentaciones que presenta la citada definición.

Es evidente que el objetivo de disponer una cuña de transición es conseguir una transición gradual de asientos entre la zona de terraplén alejada de la obra de paso y ella misma. Para ello, lo que se propone es un relleno que tenga una “compresibilidad” similar a la del terraplén en la zona lejana y que sea algo más rígido en la zona adyacente al estribo. Sin embargo, no se ha podido encontrar en la búsqueda bibliográfica realizada ninguna justificación de que la cuña de transición propuesta cumpla los requisitos exigidos para las transiciones, según se exponen en la Nota de Servicio de la DGC fechada en 1992.

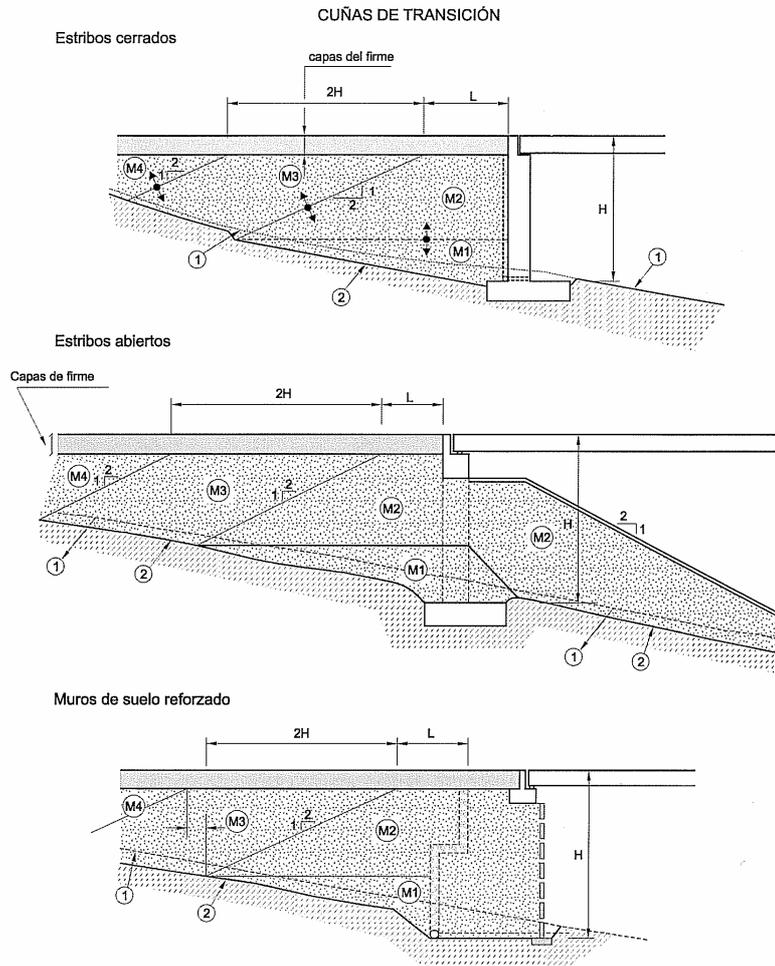


Fig.

8:

- 1.- Línea de terreno natural.
 2.- Línea desbroce y saneo.
 H.- Altura del muro.
 L.- Ancho de la cuña en coronación ($L + 2H \geq 10m$)⁽¹⁾
 M1.- Material granular (tratado con cemento en su caso)⁽²⁾
 M2.- Material granular compactado hasta una densidad relativa aproximada $Dr > 95\%$ ($d_{0,95}$ PM en el núcleo; d_{PM} en coronación)⁽³⁾
 M3.- Suelo adecuado ó seleccionado ($d_{0,95}$ PM en el núcleo; d_{PM} en coronación).
 M4.- Relleno general⁽³⁾.
- (1) Si existe losa de transición de longitud L, según el eje de la calzada soportada, deberá cumplirse la condición que dé lugar a una mayor longitud ($L + 2H$) de coronación de la cuña de transición.
 - $L + 2H > 10m$.
 - $L + 2H > 2L$.
 (2) Ver artículo 332 "Rellenos localizados" del PG-3.
 (3) Ver artículos 330, 331 ó 333 del PG-3, según el caso.

Definición de la cuña de transición de la "Guía de Cimentaciones"

4. OTROS ASPECTOS DEL DISEÑO DE LAS TRANSICIONES

Todo lo que se ha comentado hasta ahora está relacionado con las losas de transición convencionales de estribos de puentes o con las cuñas de suelo granular adecuado o seleccionado. Sin embargo, existen algunas preguntas que puede que despierten cierta curiosidad. Por ejemplo:

- ¿Qué pasa con los puentes esviados?
- ¿Y si se empotra la losa de transición en el estribo?
- ¿Todo funciona igual si el estribo tiene una cimentación pilotada?
- ¿Se debe disponer losa de transición en los marcos o pórticos que constituyen los pasos inferiores?
- ¿Es suficiente un relleno de suelo seleccionado compactado conforme a los requisitos exigidos o, en algunos casos, es necesario/conveniente emplear rellenos de suelo-cemento?.

En lo que sigue se trata de dar respuesta a alguna de las cuestiones planteadas.

4.1. Las transiciones de los “puentes integrales”

En Julio de 2000 la DGC del Ministerio de Fomento publicó la “Guía para la concepción de puentes integrales de carreteras”. En el preámbulo de dicho documento se dice que *“el concepto de puente integral, o puente sin juntas, surge como respuesta a los problemas funcionales que, con cierta frecuencia, se plantean en la zona de encuentro entre tablero, estribo y calzada de acceso”*.

En particular el capítulo 5.2 de dicho documento está dedicado en exclusiva a la losa de transición, planteando dos diferencias fundamentales con respecto a lo recogido en la Nota de Servicio de la DGC del año 1992, a saber:

- La losa se empotrará en el murete de guarda del estribo.
- La losa se mantendrá enrasada con la cara superior del tablero del puente integral y sobre ella se dispondrá el mismo pavimento que sobre el propio tablero.

Se reproduce a continuación la figura 5.16 del documento citado que muestra algunas dimensiones y la armadura de la losa de transición propuesta de 5 m de longitud y 0,30 m de canto.

Es evidente que el efecto conjunto del giro inducido en el empotramiento y los esfuerzos generados pueden provocar fisuraciones en la losa que, pudiera ser, que superaran el límite de lo admisible. Por ello, la “Guía de puentes integrales” indica que *“parece razonable no establecer criterios estrictos de limitación de fisuras, sino tomar medidas para que las que se vayan a producir no afecten a la durabilidad de la obra. Entre estas medidas estarían las de utilizar, en esta zona, armaduras*

galvanizadas o revestidas, así como la de prolongar la impermeabilización del tablero”.

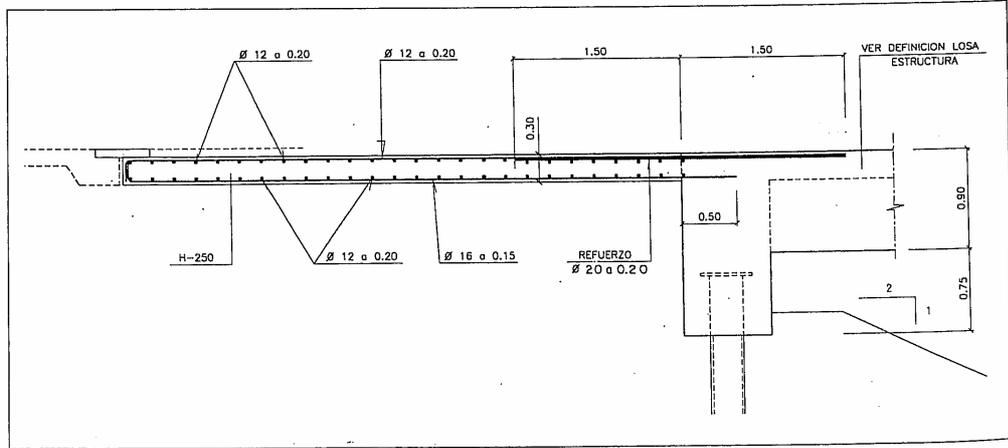


Fig. 9: Losa de transición propuesta en la “Guía para la concepción de puentes integrales” de la DGC

Por último, indicar que el encuentro entre la losa de transición y el firme del terraplén de acceso se resuelve con un durmiente de hormigón armado sobre el que apoya la losa, colocándose una “banda de material elástico” como conexión entre la losa y el terraplén, según se muestra en la figura adjunta que es copia de la figura 5.31 de la “Guía de puentes integrales” de la DGC.

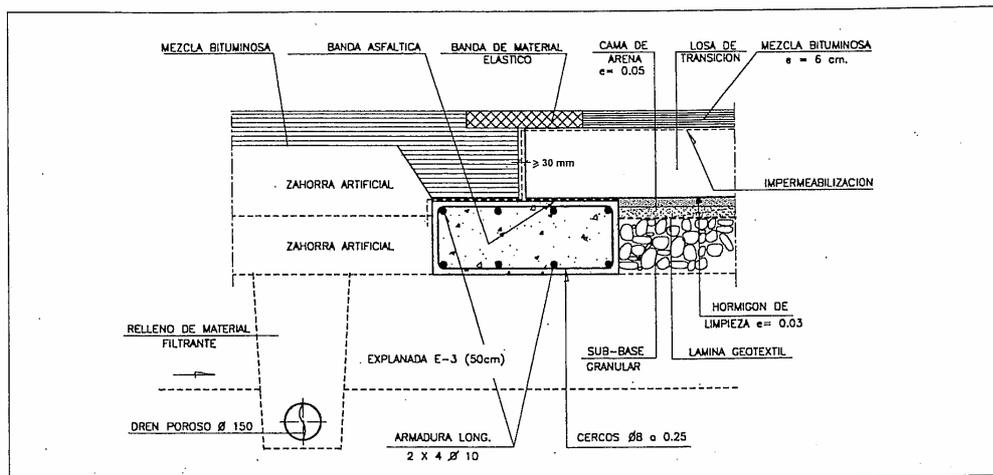


Fig. 10: Conexión losa-calzada propuesta por la “Guía para la concepción de Puentes integrales” de la DGC

4.2. Puentes esviados

Los puentes esviados presentan una doble problemática en lo que se refiere a su transición con el terraplén de acceso: por una parte la ejecución del relleno es más dificultosa; por otra, el ataque de las ruedas del vehículo no se realiza frontalmente a la losa, con lo que parece que pudiera disminuir el efecto pernicioso que supone la carga brusca del tráfico en la losa de transición. Basándose en esto último la “Nota de Servicio” de la DGC llega incluso a sugerir que *“para ángulos mayores de 70° es preciso considerar si es o no necesario poner losa de transición”*.

También la “Guía de puentes integrales” dedica varias páginas al tema del esviaje proponiendo algunas medidas para tratar de minimizar el efecto de la transición oblicua que se produce en estos casos.

Para tratar de evaluar la incidencia del esviaje en el reparto de cargas en la losa de transición oblicua, los autores de esta ponencia han generado un modelo de elementos finitos que representa una losa de transición apoyada en el estribo y sustentada en un “lecho elástico”. Las dimensiones de la losa modelizada son 5,0 x 12,0 x 0,30 m (largo x ancho x canto). Las cargas consideradas han sido las de peso propio, peso del relleno de tierras sobre la losa (0,85 m de espesor) y la acción del tráfico, sin considerar ningún coeficiente de amplificación dinámica.

Se han realizado varios cálculos variando el esviaje de la losa desde 0 hasta 45°. El módulo de balasto considerado ha sido de 100.000 kN/m³ que es el que corresponde a un relleno de terraplén tipo T3, conforme a lo indicado en la “Colección de Pequeñas Obras de Paso, 4.2-IC” editada por la DGC. El citado terreno tiene 18 kN/m³ de peso específico, un ángulo de rozamiento interno de 24° y un módulo de deformabilidad, E, de 30.000 kN/m².

Los resultados que se han obtenido muestran que el comportamiento de la losa es independiente del esviaje resultando prácticamente la misma armadura principal de flexión y unos asientos similares en todos los casos. Sólo cuando se ha reducido sustancialmente la resistencia del terreno, entonces ha variado la distribución tensional y se han incrementado sensiblemente los asientos.

4.3. Transiciones en terrenos deformables

En ocasiones los puentes están ubicados en zonas donde el terreno de cimentación es de poca capacidad portante y, además, susceptible de tener asientos diferidos de magnitud apreciable. En estas circunstancias se dispone una

cimentación mediante pilotes en las pilas y, habitualmente, también se disponen pilotes en los estribos, con lo que los asientos en el inicio de la transición resultan prácticamente nulos. Por contra, en estos casos, el terraplén de acceso tiene asientos apreciables, generándose problemas de discontinuidad en la rasante al pasar de un relleno flexible al tablero del puente que constituye un “punto duro”. En estos casos hay que ser muy cauto en la solución que se proponga, siendo importante considerar los siguientes aspectos:

- Suele ser muy eficaz proceder, si es posible, a un saneo del terreno de apoyo del terraplén. Este saneo puede alcanzar fácilmente los 4 ó 5 m de profundidad, si no se alcanza el nivel freático con la excavación.
- Conviene disponer drenes en el terreno o adoptar otras medidas tendentes a acelerar el asiento producido por el peso del terraplén.
- En el mismo orden de cosas, conviene demorar la ejecución del tablero para minimizar la cuantía del asiento diferencial tablero-terraplén.
- En estos casos, aunque se disponga cuña de transición, conviene también colocar una losa de transición que, si los asientos diferenciales esperables son importantes, debe tener una longitud mayor que la habitual.

De todas formas, existen ocasiones en que el asiento del terraplén es tan importante que invalida casi cualquier solución. Así, el puente de Joao Landim en Guinea Bissau presentaba asientos en el terraplén de acceso del orden del metro, lo cual generaba una incompatibilidad manifiesta con la cimentación que era necesario disponer en las pilas y que estaba constituida por pilotes de 70-75 m de profundidad,. Por ello, se decidió aminorar y acelerar los asientos del terraplén mediante la ejecución de unas columnas de grava a la vez que se disponía un estribo flotante sobre el terraplén que transmitía una carga al terreno similar al peso del terraplén. La losa de transición, en este caso, estaba constituida por el vano lateral del puente de 27 m de luz que giraba alrededor de la pila pilotada, acomodando la variación de rasante debida al asiento del terraplén sin que se produjeran grandes cambios de pendiente.

Otro caso a considerar, y ciertamente más habitual, es el de las pilas-estribo cimentadas en terreno competente, complementadas con un muro de suelo reforzado que contiene las tierras del terraplén. Una solución corrientemente adoptada por los autores de la ponencia para resolver estas situaciones es la que se define en la figura que sigue.

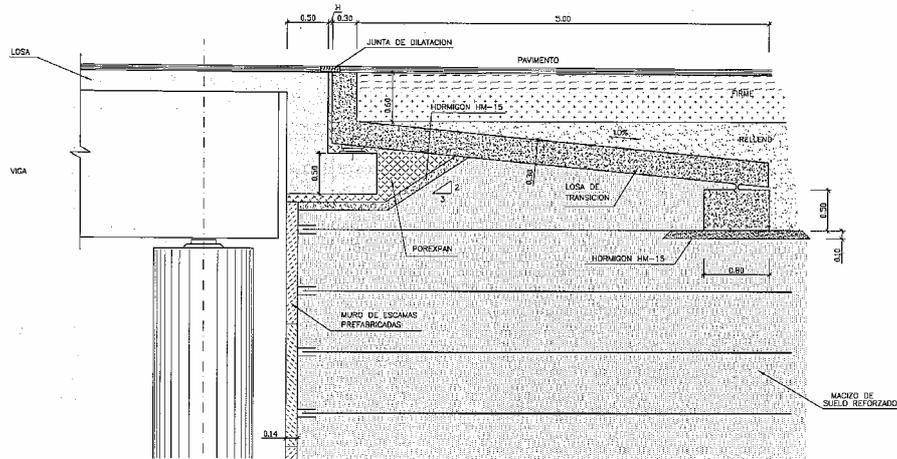


Fig. 11: Solución de transición propuesta para pila-estribo con muro de suelo reforzado

4.4. Los pasos inferiores

Muy habitualmente los pasos inferiores están constituidos por marcos o pórticos de hormigón armado que se sitúan por debajo de la traza de la vía que cruza dejando una cierta montera de tierras por encima de su cubierta o dintel. La potencia de la montera suele ser variable entre algunos decímetros (suficientes para que pase sobre la obra el paquete de firmes de la vía superior) y varios metros. Se plantea en estos casos la duda de si es necesario disponer losa de transición y hasta qué altura de relleno de tierras es conveniente disponerla.

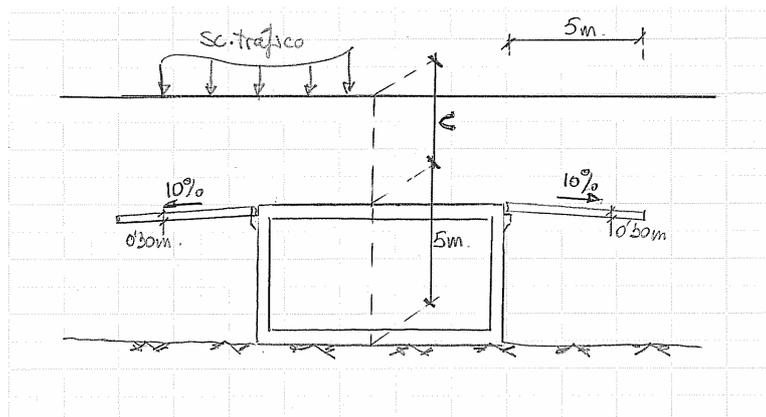


Fig. 12: Losa de transición en paso inferior tipo

En el gráfico adjunto se muestra el resumen de unos cálculos realizados con un modelo de elementos finitos definido por los siguientes criterios básicos:

- El terreno se supone granular con $\varphi = 35^\circ$ y $E = 80.000 \text{ kN/m}^3$ con un comportamiento Mohr-Coulomb.
- Se supone que la obra de paso tiene una altura de 5 m y sobre ella se dispone, o no, una losa de transición de 5 m de longitud, 0,30 m de espesor y 10% de pendiente.
- La carga del tráfico es la de la IAP y se supone actuando sobre la rasante de la vía superior.

En el gráfico que sigue se presentan los asientos obtenidos a nivel de calzada de la vía superior en función de su distancia al trasdós de la obra de paso para monteras de 1 m, 3 m y 5 m en el caso de disponer, o no, losa de transición. Se observa que el efecto de la losa cuando existe un relleno de tierras de cierta importancia (5 m) es prácticamente inapreciable. También se observa que para monteras de 3 m de potencia la losa de transición reduce algo el asiento pero no varía prácticamente la pendiente de la deformada. Quizás esto indique que a partir de unos 3 m de relleno de tierras la losa de transición pierde bastante eficacia y, por tanto, sería cuestionable la necesidad de disponerla.

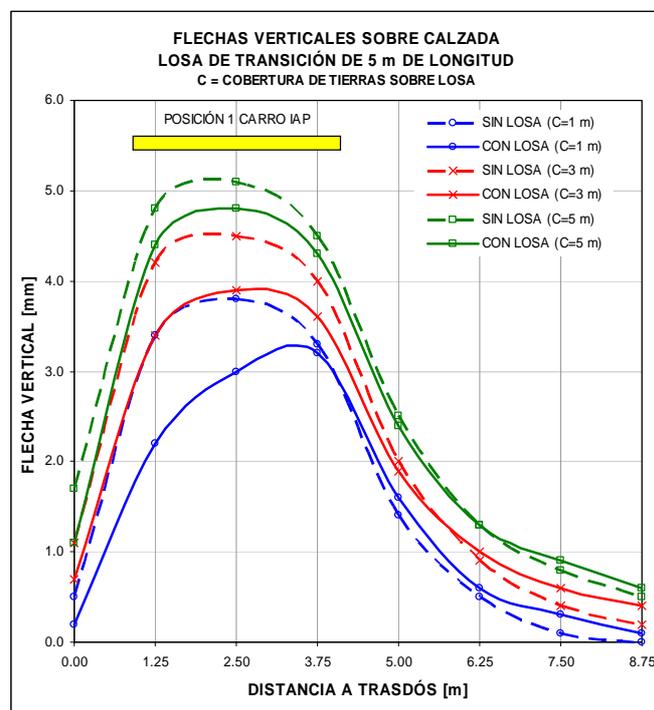


Fig. 13: Asientos obtenidos en el cálculo de la transición paso inferior-terraplén

Por último, indicar que también se pueden disponer cuñas de transición semejantes a las definidas en el apartado correspondiente de este artículo. En estos casos, la longitud mínima en coronación debe ser de 10 m, medida a nivel de

rasante de la vía superior y no a nivel de la cubierta del paso inferior. Esto hace que, en casos en que el recubrimiento de tierras es importante, el coste de la cuña de transición sea elevado y llegue a alcanzar, a veces, magnitudes similares al coste de construcción de la propia obra de hormigón armado.