

COMPORTAMIENTO Y DISEÑO DE LOSAS DE TRANSICION

Fernando MUZÁS LABAD, Dr. Ingeniero de Caminos Canales y Puertos

Profesor Titular de Mecánica del Suelo ETSAM

RESUMEN Se analiza el comportamiento de las losas de transición que, habitualmente, se disponen en los proyectos de carretera, junto a los estribos de puentes y otras obras de fábrica, para absorber las diferencias de asiento con los rellenos contiguos. El análisis se efectúa utilizando un modelo matemático basado en la teoría de Winkler, viendo el distinto comportamiento de losas articuladas o empotradas y determinando los esfuerzos que aparecen en cada caso en función de su longitud. Las conclusiones que se deducen del análisis pueden servir de orientación para el diseño de las losas en cada caso concreto.

PALABRAS CLAVE: LOSAS DE TRANSICIÓN, WINKLER, ESTRIBOS DE PUENTE

ABSTRACT In the design of roads habitually transitional slabs are disposed close to the abutments of bridges and other works, in order to absorb the differential settlement with the contiguous fillings. The performance of these transitional slabs is analysed using for this purpose a mathematical model based on Winkler theory. For jointed and restrained slabs, the deformations and stresses are determined as function of theirs lengths. The conclusions derived of the analysis may be useful for the design of slabs in each particular case.

KEYWORDS: TRANSITIONAL SLABS, WINKLER, BRIDGE ABUTMENTS

1. INTRODUCCION

Las losas de transición que habitualmente se disponen junto a los estribos de las obras de fábrica en los proyectos de carretera, tienen como misión amortiguar las diferencias de asiento entre dichos estribos y los terraplenes contiguos. Normalmente se da como justificación la dificultad que existe para compactar el terreno en la proximidad de los estribos, pero es evidente que aunque el terraplén esté bien compactado, siempre se va a producir un asiento diferencial entre el relleno y la estructura, aunque sólo sea por la acción del tráfico, ya que los suelos no sólo son más deformables que la estructura de hormigón contigua sino que, además, tienen características resistentes y de deformabilidad muy distintas y no están íntimamente unidos al estribo.

Habitualmente las losas de transición se diseñan de acuerdo con la **"Nota de Servicio sobre losas de transición en Obras de Paso"** publicada por la Dirección General de Carreteras en Julio de 1.992, que parece estar ampliamente inspirada en el documento J.A.D.E.68 **"Dalles de transition"** redactado por el SETRA del Ministerio Francés.

En general las normas contemplan la disposición de losas de transición articuladas en el estribo, situando la cara superior de las mismas lo más alto posible con objeto de que la deformación del paquete de firme respecto a la estructura, como consecuencia del tráfico, no tenga un valor apreciable, pero al mismo tiempo conviene que la profundidad que se adopte reúna ventajas constructivas permitiendo, por ejemplo, que sobre la losa de transición pase la totalidad del firme, incluida la subbase. La Nota de Servicio española incluye unas consideraciones sobre asientos diferenciales para determinar la longitud de la losa de transición, si bien no da criterios orientativos para estimar dichos asientos.

En los apartados siguientes se trata de analizar el comportamiento de las losas de transición, tanto si están articuladas como empotradas en los estribos, dando al final, como consecuencia, algunos criterios que pueden ser útiles para el diseño de las losas en cada caso concreto.

2. CONSIDERACIONES SOBRE EL COMPORTAMIENTO

Partiendo de la finalidad ya señalada que tienen las losas de transición, es claro que en su comportamiento influyen, en primer lugar, las características geotécnicas de los materiales utilizados en los terraplenes contiguos a la obra de fábrica y su grado de compactación. Estos rellenos pueden experimentar asientos después de su construcción, de mayor o menor importancia, debidos al peso propio del cuerpo del terraplén y otros debidos a una carga equivalente al tráfico.

Por muy bien compactado que esté el relleno siempre existirá un asiento diferencial entre el estribo y un punto del terraplén suficientemente alejado que dependerá de las características del material utilizado, la altura del terraplén y las condiciones de cimentación tanto de la estructura como del relleno. Si no se dispone una losa de transición es muy probable que aparezca una discontinuidad en el contacto del relleno con el estribo, de valor inferior al asiento general del terraplén a cierta distancia, debido a la interacción que pueda desarrollarse entre ambos tipos de material. El asiento irá aumentando a al alejarse del estribo hasta alcanzar el valor general que experimente el terraplén.

La misión de la losa de transición es doble, pues por un lado debe evitar la existencia de un escalón al llegar a la obra de fábrica y por otro debe conseguir que el asiento diferencial se absorba con una pendiente adecuada para la velocidad de circulación de los vehículos. En este sentido parece que una pieza empotrada en el estribo puede resolver mejor ambos problemas que una pieza articulada como se dispone generalmente.

Para diseñar las losas de transición debe tenerse en cuenta no sólo la relación entre el asiento diferencial y su longitud, sino algo más ya que el buen funcionamiento de las mismas depende de la interacción entre ellas y el terreno, interacción que depende no sólo de la longitud de la losa, sino también de su espesor y por supuesto de las características de deformabilidad del relleno.

Conviene señalar también que no funciona de la misma manera una losa de poca

longitud que otra más larga en la que tengan influencia las deformaciones por flexión, ni ambas están sometidas a los mismos esfuerzos. El concepto de losa corta o losa larga no está relacionado exclusivamente con la longitud de la pieza, sino que depende de su espesor y además está relacionado con las características de deformabilidad del terreno de apoyo, según puede comprobarse si se estudia el comportamiento en un modelo matemático, por ejemplo mediante la teoría de viga flotante o modelo de Winkler.

El hecho de que las losas se diseñen con una articulación en el lado de la estructura se debe probablemente a la circunstancia de que, si se efectúa el cálculo de la losa como elemento empotrado en la estructura, los momentos flectores y los esfuerzos cortantes que resultan son incompatibles con los espesores habituales.

El cálculo, según se justifica más adelante, indica que si las losas son cortas, es decir se comportan como elementos rígidos, el extremo libre se clava en el terreno y la losa pierde parte de su eficacia. Si el espesor es pequeño, la losa pierde rigidez y se convierte en un elemento de mayor longitud relativa pero puede perder eficacia, al aumentar la pendiente con la que se efectúa la transición de los asientos entre el terraplén y la estructura.

En consecuencia, no es la relación asiento/longitud la que regula el correcto funcionamiento de la losa, sino la pendiente que se puede producir a lo largo de la misma y, sobre todo, en la zona de apoyo sobre la estructura donde se produce la pendiente máxima en el caso de losas articuladas.

3. ANÁLISIS EN MODELO MATEMÁTICO

A continuación se analiza el comportamiento de las losas de transición utilizando para ello, y por facilidad de aplicación, un modelo matemático basado en la teoría de Winkler, a pesar de las diferencias que presenta respecto al comportamiento real de los suelos. Los cálculos efectuados, cuyos resultados se presentan a continuación, se han realizado siguiendo el trabajo de F. Muzás (1972) desarrollado para el estudio de un pilote con

acciones en cabeza y cuya referencia se incluye en la Bibliografía.

El estudio de la losa de transición se ha desarrollado para una rebanada de 1,0 m de anchura, partiendo de las hipótesis siguientes:

1. Se conoce el asiento diferencial máximo "**S**" entre el terraplén y la estructura, provocado por una sobrecarga "**p**".
2. No se considera el asiento diferencial que pueda producirse por el peso propio del terraplén.
3. El comportamiento del terreno se define mediante un coeficiente de balasto o módulo de Winkler de valor constante de acuerdo con la expresión "**K = p / S**".

Se ha considerado también que la losa de transición queda definida por las características siguientes:

1. **L** longitud de la losa
2. **h** espesor de la losa
3. **E** Módulo de elasticidad del material, normalmente hormigón
4. **I** Momento de inercia **I = h³/12**

De acuerdo con la teoría de Winkler la solución se obtiene de manera adimensional en función de lo que se denomina **unidad elástica "U"**, que puede tener diversas expresiones si en la teoría se considera que el coeficiente de balasto puede variar. En el artículo citado anteriormente se consideraron leyes de variación exponencial con la distancia, definiendo la unidad elástica por una expresión que en el caso de coeficiente de balasto constante y para la rebanada de 1,0 m de anchura, adopta la forma siguiente:

$$U = \sqrt[4]{\frac{E \cdot I}{K}}$$

En esta fórmula las variables corresponden a los parámetros indicados anteriormente.

El planteamiento teórico se efectúa de acuerdo con el siguiente razonamiento. Si la losa no estuviera enlazada con la estructura y el contacto entre el terreno y el estribo fuera liso, al actuar la presión "**p**" toda ella experimentaría el asiento "**S**" anteriormente considerado. Para obtener el estado final de deformaciones y de tensiones experimentado realmente por la losa, es preciso introducir en el extremo unido a la estructura, unos esfuerzos, en general Q_0 y M_0 , o unos corrimientos Y_0, θ_0 , capaces de restituir las condiciones de borde. La sobrecarga que en cada punto llegará al terreno será la diferencia entre la presión "**p**" y la reacción que aparece sobre la losa.

Las condiciones de borde dependen del tipo de enlace que exista entre la losa y el estribo de la estructura, siendo en cada caso las siguientes:

Enlace articulado

- | | | |
|-----|----------------|-----------|
| 1.- | Momento nulo | $M_0 = 0$ |
| 2.- | Desplazamiento | $Y_0 = S$ |

Enlace empotrado

- | | | |
|-----|----------------|----------------|
| 1.- | Giro nulo | $\theta_0 = 0$ |
| 2.- | Desplazamiento | $Y_0 = S$ |

En las figuras adjuntas se representan, de manera adimensional, las deformadas correspondientes a losas de transición de distintas longitudes, tanto si están articuladas, Fig. 1, como si están empotradas en el estribo, Fig. 2.

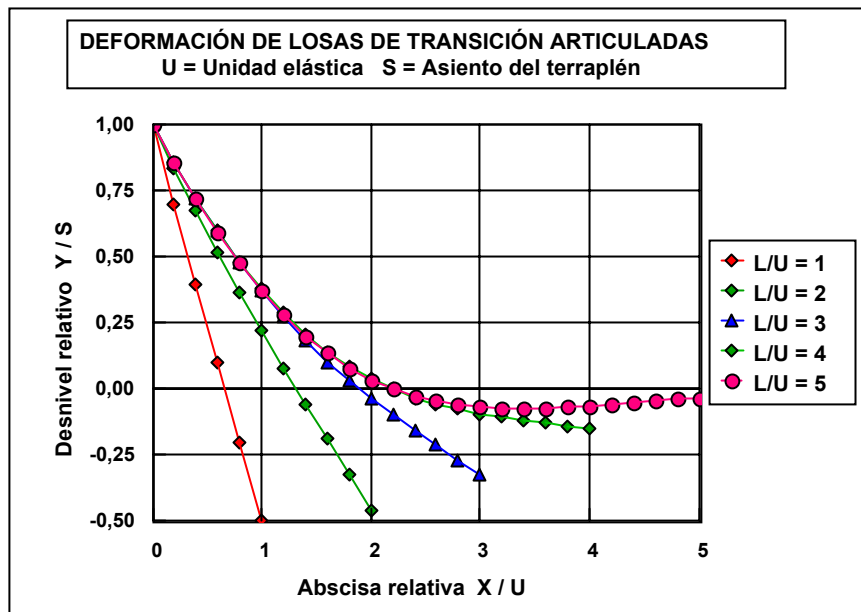


FIG. 1. Deformación relativa de Losas de Transición Articuladas con diversas longitudes

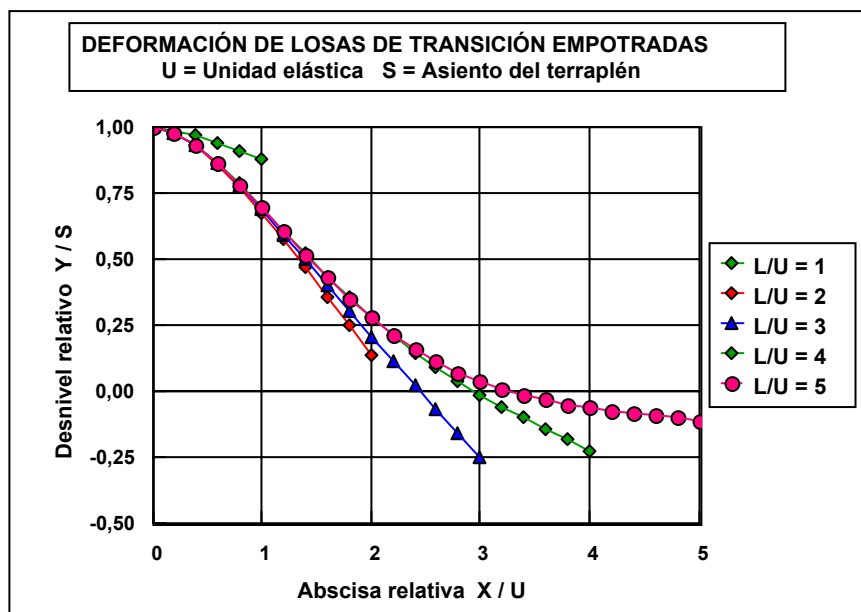


FIG. 2. Deformación relativa de Losas de Transición Empotradas con diversas longitudes

Puede observarse en estas figuras que, en el caso de losa articulada, existe un punto anguloso en el contacto de la misma con el estribo, donde la losa presenta la máxima pendiente. Se observa también, cómo esta pendiente disminuye cuando aumenta la longitud relativa de la losa, "L/U", hasta alcanzar un límite y cómo el extremo libre se incrusta en el terraplén, al experimentar asientos superiores a los que de manera general experimenta el terraplén para la carga equivalente de tráfico "p". Según la teoría de Winkler se produce un escalón cuyo valor decrece conforme aumenta la longitud relativa, debido al efecto de las deformaciones por flexión. En un medio elástico el escalón sería probablemente menos importante.

En el caso de losa empotrada la transición se hace de manera más gradual pero se requiere una longitud mínima del orden de $L = 2,2 U$ para que el extremo libre alcance una flecha igual al asiento general del terraplén, quedando un escalón para losas más cortas. Para longitudes mayores el extremo libre se incrusta también en el terraplén, al igual que ocurría en la losa articulada, aunque con valores más pequeños.

En el cálculo se han determinado, además, para los dos tipos de losa, las principales variables siguientes:

1. Giro máximo experimentado por la losa θ_m valor que corresponde a la pendiente en el origen, en el caso de losa articulada, o a la pendiente en el otro extremo o en un punto intermedio, en el caso de losa empotrada
2. Esfuerzo cortante máximo que se produce siempre en el contacto de la losa con el estribo de la estructura Q_0
3. Momento flector máximo M_m que se produce en un punto intermedio de la losa articulada, o en el origen de la losa empotrada
4. Desnivel Δ que según el modelo de Winkler se produce entre el extremo libre de la losa y el terraplén

Las expresiones que dan el valor de estas variables en función de los distintos parámetros utilizados en el modelo matemático son las siguientes:

1. Giro $\theta_m = G \frac{S}{U}$
2. Esfuerzo cortante $Q_0 = Q \frac{E.I}{U^3} S = Q.U.p$
3. Momento flector máximo $M_m = M \frac{E.I}{U^2} S = M.U^2.p$
4. Desnivel en el extremo libre $\Delta = D.S$

En estas expresiones aparecen los parámetros adimensionales G, Q, M y D, cuyos valores se recogen en los Cuadros C.1 y C.2 para los dos tipos de losa, articulada o empotrada, y para distintas longitudes de las mismas.

CUADRO C.1.- LOSA DE TRANSICIÓN ARTICULADA

L/U	G	Q	M	D
0,0	∞	0,000	0,000	-0,5000
0,5	3,0012	0,1250	0,0093	-0,4998
1,0	1,5095	0,2494	0,0369	-0,4970
1,5	1,0315	0,3706	0,0817	-0,4853
2,0	0,8219	0,4821	0,1394	-0,4555
2,5	0,7301	0,5748	0,2009	-0,4008
3,0	0,6987	0,6411	0,2545	-0,3227
3,5	0,6952	0,6801	0,2916	-0,2330
4,0	0,7003	0,6984	0,3115	-0,1480
4,5	0,7049	0,7049	0,3194	-0,0795
5,0	0,7071	0,7064	0,3216	-0,0314
∞	0,7071	0,7071	0,3224	-0,0000

CUADRO C.2.- LOSA DE TRANSICIÓN EMPOTRADA

L/U	G	Q	M	D
0,0	0,0000	0,0000	-0,0000	1,0000
0,5	0,0207	0,4984	-0,1244	0,9922
1,0	0,1536	0,9537	-0,4666	0,8845
1,5	0,3918	1,2298	-0,8329	0,5534
2,0	0,5486	1,2956	-0,9898	0,1425
2,5	0,5464	1,2988	-0,9916	-0,1293
3,0	0,4911	1,3188	-0,9699	-0,2436
3,5	0,4587	1,3518	-0,9661	-0,2583
4,0	0,4485	1,3813	-0,9752	-0,2214
4,5	0,4465	1,4001	-0,9864	-0,1645
5,0	0,4508	1,4094	-0,9942	-0,1072
∞	0,4559	1,4142	-1,0000	0,0000

Asimismo en las Figuras 3 y 4 se refleja la variación de dichos parámetros.

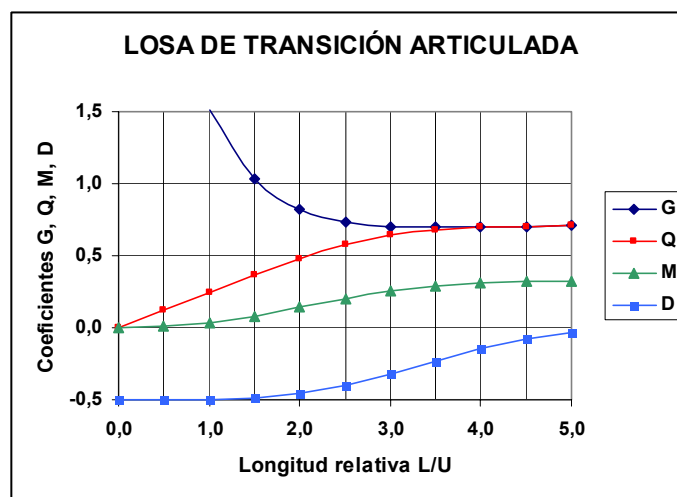


FIG. 3. Coeficientes para determinar esfuerzos y corrimientos en Losas de Transición Articuladas.

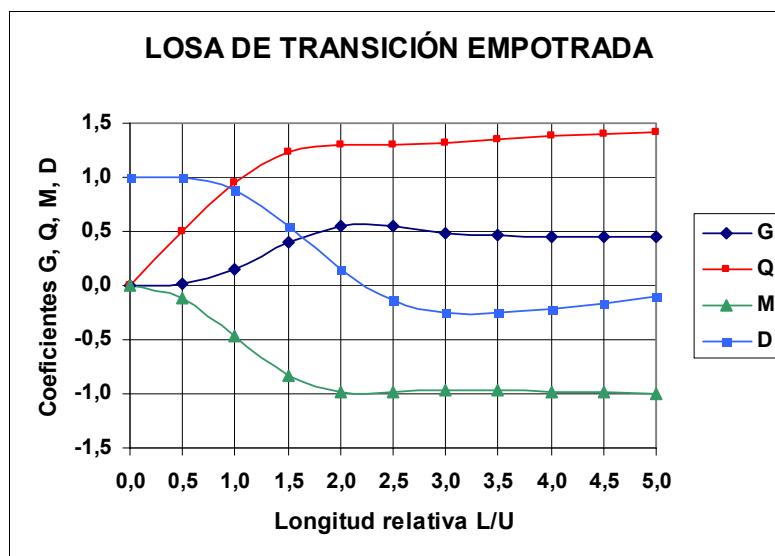


FIG. 4. Coeficientes para determinar esfuerzos y corrimientos en Losas de Transición Empotradas.

La observación de estos resultados permite deducir las siguientes conclusiones:

Losa articulada

1. Se observa cómo la pendiente máxima que se produce en el origen va disminuyendo conforme aumenta la longitud de la losa hasta alcanzar el valor límite de la losa muy larga para valores del orden de tres veces y media la unidad elástica ($L = 3,5 U$).
2. El coeficiente que determina el esfuerzo cortante máximo, que se produce en el origen, varía desde cero hasta un valor límite $Q = 0,7071$, cuando la losa es muy larga, que se alcanza prácticamente para $L = 4,0 U$.
3. El coeficiente que determina el momento flector máximo, que se produce en un punto intermedio, crece también desde cero hasta un límite para losa muy larga de valor $M = 0,3224$, que se alcanza para $L = 4,0 U$, aproximadamente.
4. El coeficiente que determina el desnivel en el extremo libre de la losa, siempre por

debajo del terraplén, va disminuyendo en valor absoluto desde un valor $D = 0,5$ para losas cortas hacia un valor nulo cuando la losa es suficientemente larga.

Losa empotrada

1. Se observa cómo para la losa empotrada la pendiente máxima se obtiene primero en el borde libre de la losa hasta que éste llega a apoyarse en el terraplén, cosa que sucede para $L/U = 2,2$ aproximadamente. Para longitudes mayores la pendiente máxima se produce en un punto intermedio con valor del coeficiente que oscila alrededor del valor $D = 0,5$ aproximadamente
2. El valor del coeficiente que determina el esfuerzo cortante máximo, que se produce en el origen, varía desde un valor nulo hasta un límite $Q = 1,4142$ que es el doble del que se produce en la losa articulada. El valor límite se alcanza a partir de $L/U = 4,0$.
3. El momento flector máximo crece también hacia un límite con valor del coeficiente $M = -1,0$ para losa larga, valor que se alcanza a partir de $L = 2,0 U$
4. El coeficiente que determina el desnivel entre el terreno y el extremo libre de la losa va disminuyendo desde un valor $D = 1,0$, para losas cortas, hacia un valor nulo cuando la losa es de longitud $L = 2,2 U$ y valores negativos con tendencia a cero, para losas más largas.

5. CONCLUSIONES

El análisis efectuado sirve para aclarar el funcionamiento de las losas de transición y permite deducir, en principio, las conclusiones siguientes:

1. El asiento diferencial a considerar, para un determinado tipo de material, es proporcional a la altura H del relleno. Como consecuencia, el coeficiente de balasto K

a utilizar será inversamente proporcional a H lo que equivale a que la unidad elástica U crece con la raíz cuarta de dicha altura y en la misma medida la longitud necesaria de la losa de transición, para conseguir una determinada relación L/U.

2. La pendiente máxima que adopta la deformada de la losa de transición es función del valor de su longitud relativa L/U, que alcanza un límite inferior aproximadamente a partir de $L/U = 3,5$. Alcanzado este límite, sólo se puede reducir la pendiente aumentando el valor de la unidad elástica U, es decir aumentando el espesor de la losa, lo que conduce también a una mayor longitud L si se quiere mantener la relación L/U.
3. En principio funciona mejor la losa empotrada que la losa articulada, ya que la pendiente que adopta la deformada es menor (del orden del 64 %) pero además se consigue una mejor transición, ya que se hace de manera más suave y además desaparece el punto anguloso del contacto que tiene la losa articulada el cual puede provocar la fisuración del firme.
4. El esfuerzo cortante máximo que debe soportar la losa crece con la longitud de la losa (relación L/U) y además con el valor de la unidad elástica, es decir con la altura del relleno H y con el espesor de la losa h, alcanzando un valor límite, para losas largas, que resulta el doble en el caso de la losa empotrada respecto a la losa articulada. Ello supone que para absorber el esfuerzo cortante, la losa empotrada requiere mayor espesor
5. De manera análoga el momento flector a que se ve sometida la losa crece con la longitud relativa de la misma pero además con el cuadrado de la unidad elástica U, es decir con la altura del relleno H y el espesor de la losa h, alcanzando un valor límite que resulta tres veces superior en la losa empotrada respecto a la losa articulada. Al igual que en el punto anterior resulta que la losa empotrada necesita mayor espesor y requiere mayor longitud que la losa articulada.
6. En dos obras de fábrica con alturas de relleno distintas H_1 y H_2 , los espesores deberán ser también distintos h_1 y h_2 para hacer frente a los esfuerzos que deben resistir. Para que se produzca un comportamiento similar, las longitudes deben ser

proporcionales a las respectivas unidades elásticas es decir se debe verificar la relación siguiente:

$$\frac{L_1}{L_2} = \frac{U_1}{U_2} = \sqrt[4]{\frac{h_1^3 \cdot H_1}{h_2^3 \cdot H_2}}$$

Las ideas y conclusiones expuestas anteriormente pueden servir de ayuda para el diseño y armado de las losas de transición convenientes en cada caso particular, en función de las características del terreno y la altura del terraplén contiguo a los estribos de una determinada estructura. La Normativa debería dar alguna orientación en cuanto a la sobrecarga de tráfico a utilizar o los asientos a tener en cuenta y fundamentalmente a la pendiente máxima con la que se debe conseguir la transición, que puede ser diferente en función de la velocidad de proyecto.

BIBLIOGRAFÍA

MUZÁS, F.: **"Contribución al estudio de pilotes sometidos a fuerzas laterales"**.
Comunicación presentada al V Congreso Europeo de Mecánica del Suelo y Cimentaciones, Madrid 1972.