

### 3 ACCIÓN SÍSMICA

#### 3.1 Introducción

Los principales efectos de los terremotos en los puentes provienen del movimiento vibratorio que el terreno de apoyo transmite a la estructura a través de su cimentación. Este movimiento es el único que se considera en este capítulo.

Los terremotos pueden dar lugar también a otros efectos, como desplazamientos permanentes entre los diferentes apoyos causados por licuación, movimientos de ladera, subsidencia, rupturas del terreno por fallas activas, colapso en cavidades, densificación, etc, que podrían suponer importantes daños en la estructura. El emplazamiento de los puentes debe, en general, estar libre de este tipo de riesgos. Cuando se considere posible la aparición de estos fenómenos, deberán ser objeto de estudios específicos que los cuantifiquen, de forma que en el proyecto se analice a su vez, la posibilidad de adoptar medidas adecuadas para eliminar o minimizar los daños asociados.

#### 3.2 Caracterización del terreno

Los movimientos del suelo provocados por un terremoto están influidos por el tipo de terreno. Por ello, es necesario llevar a cabo las investigaciones necesarias para identificar el tipo de terreno de acuerdo con las indicaciones recogidas a continuación.

En esta Norma, los terrenos se clasifican en los siguientes tipos:

- Terreno tipo I: Roca compacta, suelo cementado o granular muy denso. Velocidad de propagación de las ondas elásticas transversales o de cizalla,  $v_s > 750$  m/s
- Terreno tipo II: Roca muy fracturada, suelo granular denso o cohesivo duro. Velocidad de propagación de las ondas elásticas transversales o de cizalla,  $750 \text{ m/s} \geq v_s > 400$  m/s
- Terreno tipo III: Suelo granular de compacidad media, o suelo cohesivo de consistencia firme a muy firme. Velocidad de propagación de las ondas elásticas transversales o de cizalla,  $400 \text{ m/s} \geq v_s > 200$  m/s
- Terreno tipo IV: Suelo granular suelto, o suelo cohesivo blando. Velocidad de propagación de las ondas elásticas transversales o de cizalla,  $v_s \leq 200$  m/s

A cada uno de estos tipos de terreno se le asigna un valor del coeficiente C, coeficiente del terreno, que aparece en la tabla 3.1.

Tipo de terreno	Coficiente C
I	1,0
II	1,3
III	1,6
IV	2,0

Tabla 3.1 Coeficientes del terreno

Este coeficiente participa en la definición del espectro elástico de respuesta tal como se indica en los apartados 3.4 y 3.5.

El coeficiente  $C$  correspondiente a un emplazamiento concreto, dependerá de las características de los primeros 30 metros bajo la superficie. Para obtener su valor, se determinarán los espesores  $e_1$ ,  $e_2$ ,  $e_3$ , y  $e_4$  de los tipos terreno I, II, III y IV, respectivamente, existentes en esos primeros 30 m. Se adoptará como valor de  $C$ , el valor medio obtenido al ponderar los coeficientes  $C_i$  de cada estrato con su espesor  $e_i$ , en metros (m), mediante la expresión:

$$C = \frac{\sum C_i \cdot e_i}{30} \quad (3.1)$$

El coeficiente  $C$  depende de los espesores y rigideces de las capas de suelo superficial existentes en cada punto, por lo que podrá ser diferente en cada uno de los apoyos del puente. Cuando esto ocurra, se tendrá en cuenta su repercusión en el espectro de respuesta, según las indicaciones recogidas en el apartado 3.5.1.2.

### 3.3 Caracterización del movimiento sísmico

Para aplicar los procedimientos de cálculo del capítulo 4, los sismos de proyecto se caracterizarán, en general, mediante su espectro de respuesta elástica. La máxima aceleración sísmica del terreno, se utilizará como un valor de referencia para formar el espectro.

En el apartado 3.4 se define la aceleración sísmica horizontal de cálculo, con la cual se establece el espectro de respuesta, en la forma indicada en el apartado 3.5, tanto para el sismo último de cálculo como para el sismo frecuente de cálculo y el de construcción.

Para definir el movimiento sísmico, es necesario cuantificar las componentes del movimiento en dirección horizontal y en dirección vertical. La acción sísmica horizontal se describe mediante dos componentes, en dirección longitudinal y transversal al puente, consideradas como independientes y representadas mediante el mismo espectro de respuesta. El espectro correspondiente a la componente vertical podrá obtenerse simplifícadamente a partir del horizontal de acuerdo con las indicaciones recogidas en el apartado 3.5.1.1.

Se deberá considerar la actuación conjunta de las componentes en las diferentes direcciones, siguiendo los criterios recogidos en el capítulo 4.

En los puentes cuyos estribos y pilas se apoyen sobre terrenos con diferencias significativas en sus características, se podrá definir la acción sísmica mediante un espectro de respuesta representativo del conjunto, según las indicaciones del apartado 3.5.1.3. En algunos casos, cuando concurra alguna de las circunstancias indicadas en el apartado 3.8, no será suficiente con esto y será necesario considerar un modelo de la acción sísmica que tenga en cuenta la variabilidad espacial.

Adicionalmente, el movimiento sísmico puede caracterizarse mediante conjuntos de acelerogramas horizontales y verticales compatibles con los espectros de respuesta citados, de acuerdo con las indicaciones del apartado 3.7.

### 3.4 Aceleración sísmica horizontal de cálculo

La aceleración sísmica horizontal de cálculo se define como el producto:

$$a_c = S \rho a_b \quad (3.2)$$

$a_b$  Aceleración sísmica básica, según la Norma de Construcción Sismorresistente NCSE-02, cuyo mapa sísmico se reproduce en la figura 3.1 y cuyo listado por términos municipales se recoge en el Anejo 1.

Es el valor característico de la aceleración horizontal de la superficie del terreno, correspondiente a un período de retorno de 500 años.

- $\rho$  Coeficiente adimensional de riesgo, obtenido como producto de dos factores:  $\rho = \gamma_I \cdot \gamma_{II}$
- $\gamma_I$  Factor de importancia, función de la importancia del puente, cuyo valor figura en el apartado 2.3.
- $\gamma_{II}$  Factor modificador para considerar un periodo de retorno diferente de 500 años. El producto  $\rho a_b$  representa la aceleración sísmica horizontal correspondiente a un periodo de retorno  $P_R$ . El valor de esa aceleración puede deducirse de un estudio probabilista de la peligrosidad sísmica en el emplazamiento del puente. A falta de este estudio, de forma aproximada puede suponerse:

$$\gamma_{II} = (P_R / 500)^{0,4} \quad (3.3)$$

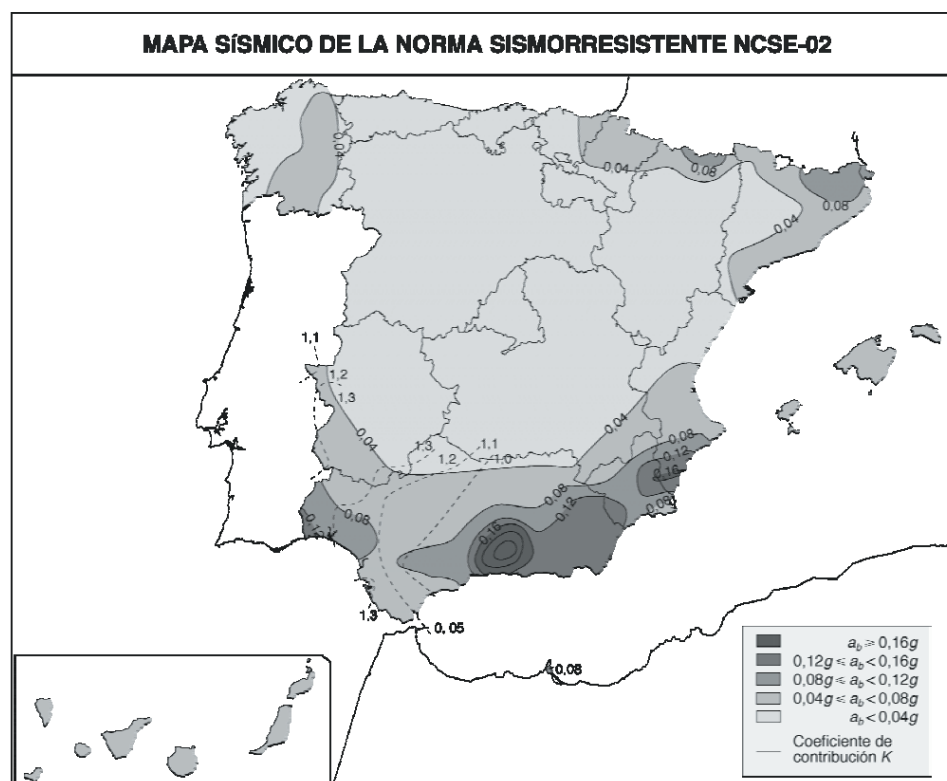
- S Coeficiente de amplificación del terreno. Toma el valor:

$$\text{Para } \rho a_b \leq 0,1 \text{ g} \quad S = \frac{C}{1,25} \quad (3.4a)$$

$$\text{Para } 0,1 \text{ g} < \rho a_b < 0,4 \text{ g} \quad S = \frac{C}{1,25} + 3,33 \left( \rho \frac{a_b}{g} - 0,1 \right) \left( 1 - \frac{C}{1,25} \right) \quad (3.4b)$$

$$\text{Para } 0,4 \text{ g} \leq \rho a_b \quad S = 1,0 \quad (3.4c)$$

- C Coeficiente del terreno definido en el apartado 3.2



### 3.5 Espectros de respuesta elástica

#### 3.5.1 Espectros de aceleraciones

##### 3.5.1.1 Componentes horizontales

Para las componentes horizontales de la acción sísmica, se considerará el siguiente espectro de respuesta elástica de aceleraciones  $S_a(T)$ , correspondiente a un oscilador lineal simple.

$$0 \leq T \leq T_A: \quad S_a(T) = \left[ 1 + \frac{T}{T_A} (2,5 \nu - 1) \right] a_c \quad (3.5a)$$

$$T_A \leq T \leq T_B: \quad S_a(T) = 2,5 \nu a_c \quad (3.5b)$$

$$T_B \leq T \leq T_C: \quad S_a(T) = 2,5 \nu \frac{T_B}{T} a_c \quad (3.5c)$$

$$T_C \leq T: \quad S_a(T) = 2,5 \nu \frac{T_B T_C}{T^2} a_c \quad (3.5d)$$

siendo:

$a_c$  aceleración sísmica de cálculo definida en el apartado 3.4

$\nu$  factor corrector dependiente del amortiguamiento equivalente de la estructura, que puede obtenerse mediante la expresión:

$$\nu = (5/\zeta)^{0,4} \geq 0,55 \quad \text{válida para } \zeta > 1\% \quad (3.6)$$

$\zeta$  es el índice de amortiguamiento, en porcentaje, cuyo valor figura en el apartado 4.2.3.3 para cada tipo de sismo y de estructura.

$T_A, T_B, T_C$  valores del periodo que delimitan el espectro. Estos valores, que dependen del tipo de sismo de cálculo y del tipo de terreno de cimentación del puente, se obtienen de las expresiones indicadas en la tabla 3.2.

Sismo último de cálculo	Sismo frecuente de cálculo Sismo de construcción
$T_A = K C / 10$	$T_A = K C / 20$
$T_B = K C / 2,5$	$T_B = K C / 5$
$T_C = K (2 + C)$	$T_C = K (1 + 0,5 C)$

Tabla 3.2 Valores del periodo que delimitan el espectro (en segundos)

$K$  coeficiente de contribución, que se indica en la figura 3.1 y en el Anejo 1

$C$  coeficiente de terreno que se define en el apartado 3.2.

En la figura 3.2 se muestra la forma del espectro de aceleraciones.

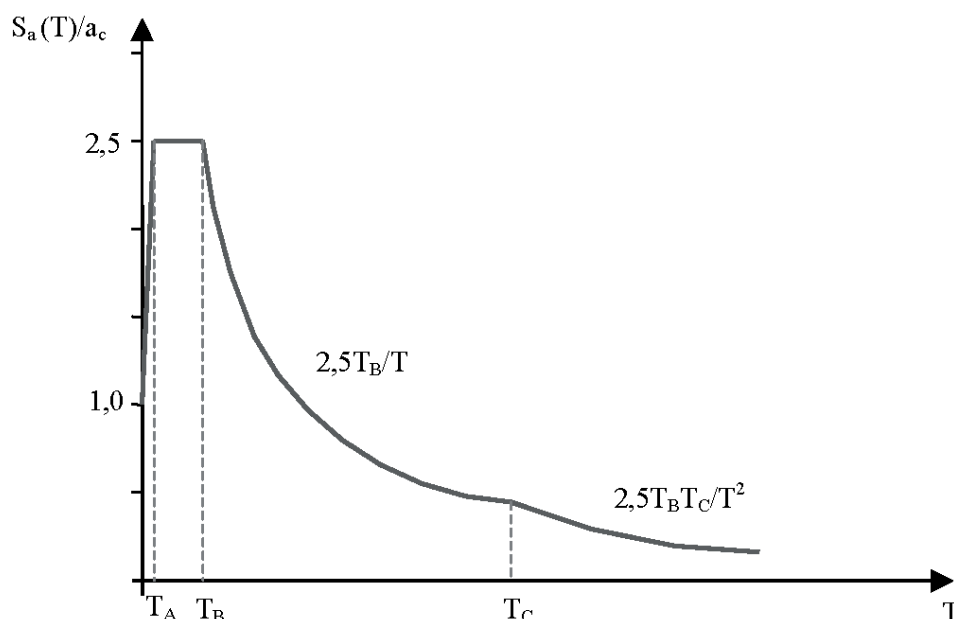


Figura 3.2 Forma del espectro de respuesta de aceleraciones para un índice de amortiguamiento  $\zeta = 5\%$

En aquellos casos especiales en que el valor de  $C$  sea mayor que 1,8, el espectro de respuesta definido con las reglas anteriores puede no ser aplicable a las construcciones con período fundamental mayor de  $T_B$ . En este caso, para  $T > T_B$  se tomará  $S_a(T) = 2,5 v a_c$ , a menos que se determine un espectro de respuesta específico del emplazamiento, cuyas ordenadas en ningún caso serán menores que las que se obtendrían con las expresiones (3.5) (ver apartado 8.2.3).

### 3.5.1.2 Componente vertical

A falta de estudios más detallados, el espectro correspondiente a la componente vertical podrá obtenerse simplíficadamente a partir del horizontal multiplicado por un factor igual a 0,7.

### 3.5.1.3 Espectro promedio del emplazamiento

En el caso de que las cimentaciones de una misma estructura se encuentren sobre terrenos con características diferentes, siempre que la diferencia entre los valores máximo y mínimo del coeficiente  $C$  sea menor de 0,4, se podrá considerar como espectro representativo del emplazamiento el que resulta de considerar un coeficiente  $C$  igual a la media ponderada de los valores correspondientes a cada apoyo, según la siguiente expresión:

$$C = \frac{\sum_k R_k}{\sum_j R_j} C_k \quad (3.7)$$

donde:

$R_k$  reacción en la base de la pila  $k$  cuando el tablero, considerado rígido, se somete a un desplazamiento unidad

$\sum_j R_j$  suma de las reacciones en todos los apoyos, obtenidas como se indica en el párrafo anterior

$C_k$  coeficiente C correspondiente a las condiciones de la cimentación del apoyo k

De forma simplificada, y a falta de una estimación de los valores de  $R_k$  contenidos en la expresión anterior, se podrá adoptar como espectro representativo del emplazamiento, la envolvente de los espectros correspondientes a cada cimentación.

Cuando la diferencia entre el valor máximo y el mínimo del coeficiente C sea mayor de 0,4, se adoptará como espectro representativo del emplazamiento, la envolvente de los correspondientes a cada cimentación.

### 3.5.2 Espectro de desplazamientos

El espectro de respuesta elástica de desplazamientos,  $S_d$ , puede obtenerse del de aceleraciones,  $S_a$ , mediante la expresión:

$$S_d(T) = S_a(T) \left( \frac{T}{2\pi} \right)^2 \quad (3.8)$$

Para periodos suficientemente mayores que  $T_C$  podrán considerarse, previa justificación, valores menores que los que se deducen a partir de la expresión (3.5d), pero nunca menores que el desplazamiento sísmico de la superficie del terreno  $d_c$  definido en el apartado 3.6.

### 3.6 Velocidad y desplazamiento máximos del terreno

La velocidad y el desplazamiento horizontales máximos de la superficie del terreno pueden estimarse por medio de las siguientes expresiones:

$$v_c = 0,2 T_B a_c \quad (3.9a)$$

$$d_c = 0,025 T_B T_C a_c \quad (3.9b)$$

donde  $a_c$  es la aceleración sísmica horizontal de cálculo, definida en el apartado 3.4, y  $T_B$  y  $T_C$  son los periodos del espectro de respuesta que se definen en el apartado 3.5.1.

### 3.7 Acelerogramas

Los acelerogramas deberán ser elegidos entre los registrados, o generados artificialmente, de forma que se ajusten al espectro de respuesta elástica para un amortiguamiento del 5%, definido en el apartado 3.5.1. Deberán, además, tener una duración representativa del movimiento esperable en cada caso.

Cuando el cálculo sísmico se realice utilizando acelerogramas, debido a su variabilidad, será necesario calcular la estructura con diferentes conjuntos de acelerogramas. En general, serán necesarios pares coherentes de acelerogramas horizontales y, cuando sea preciso considerar la componente vertical del sismo, tríos coherentes formados por dos acelerogramas horizontales y uno vertical.

Los acelerogramas generados pertenecientes al mismo conjunto (par de dos acelerogramas horizontales o trío de dos horizontales y uno vertical) deberán ser estadísticamente independientes.

### **3.8 Variabilidad espacial**

En determinadas circunstancias, los movimientos sísmicos en los distintos apoyos del puente pueden ser lo suficientemente diferentes como para que este hecho requiera una consideración especial.

Será necesario considerar la variabilidad espacial en la caracterización de la acción sísmica cuando se presente alguna de las circunstancias siguientes:

- Rasgos topográficos muy acusados
- Puentes de gran longitud

El tratamiento de la variabilidad espacial de la acción sísmica será objeto de un estudio especial.