

CAPÍTULO III

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.

TABLA 3.1.
Coeficientes del terreno

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

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 simplificada-mente 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 concorra 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:

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

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.

ρ Coeficiente adimensional de riesgo, obtenido como producto de dos factores:
 $\rho = \gamma_I \cdot \gamma_{II}$

γ_I Factor de importancia, función de la importancia del puente, cuyo valor figura en el apartado 2.3.

γ_{II} Factor modificador para considerar un periodo de retorno diferente de 500 años. El producto $\rho \cdot a_b$ 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:

— Para $\rho \cdot a_b \leq 0,1 g$

$$S = \frac{C}{1,25} \quad (3.4a)$$

— Para $0,1 g < \rho \cdot a_b < 0,4 g$

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

— Para $0,4 g \leq \rho \cdot a_b$

$$S = 1,0 \quad (3.4c)$$

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.

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

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

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

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

MAPA SÍSMICO DE LA NORMA SISMORRESISTENTE NCSE-02

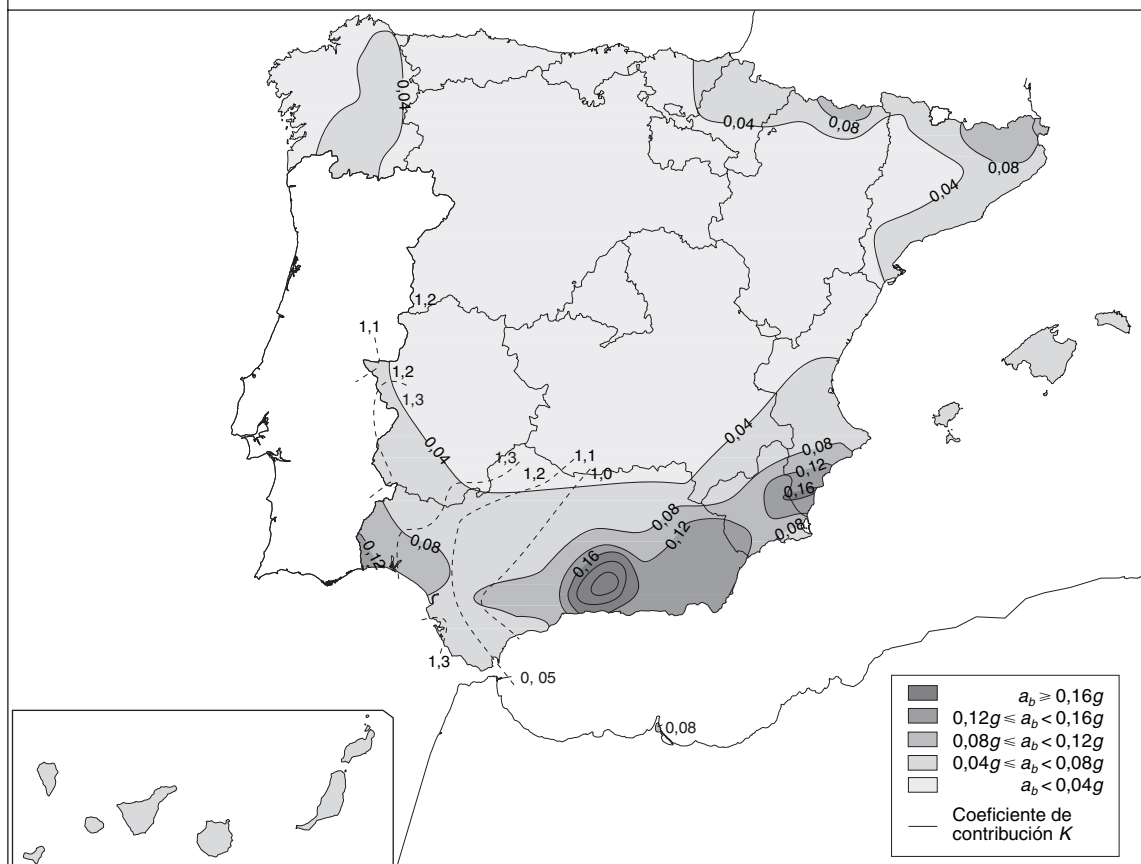


Figura 3.1 Mapa de peligrosidad sísmica (según NCSE-02)

siendo:

a_c aceleración sísmica de cálculo definida en el apartado 3.4.

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

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

ζ 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.

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.

TABLA 3.2.

Valores del periodo que delimitan el espectro (en segundos)

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

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

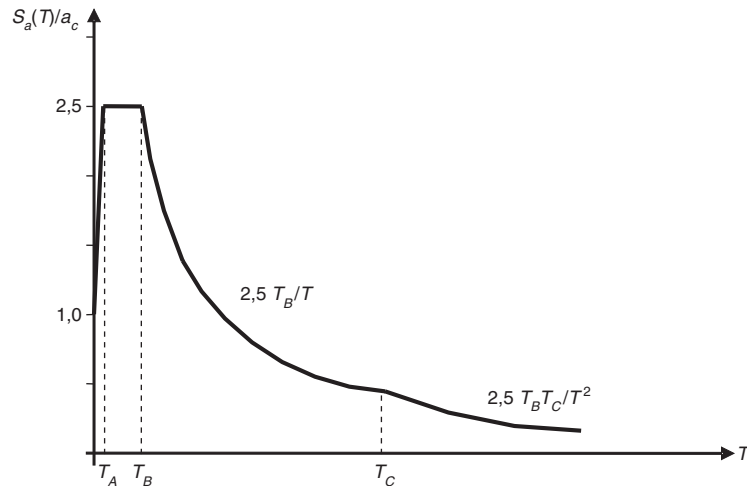


Figura 3.2 Forma del espectro de respuesta de aceleraciones para un índice de amortiguamiento $\zeta = 5\%$

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 $S_a(T) = 2,5 v \cdot a_c$, 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 simplificada a partir del horizontal multiplicado por un factor igual a 0,7.

3.1.5.3. 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:

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

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

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.

Comentarios

C.3.1. Introducción

C.3.2. Caracterización del terreno

Para clasificar el terreno, se utilizará como parámetro la velocidad de propagación de las ondas elásticas transversales v_s (ver apartado 8.2.2). Cuando no se disponga del valor de la velocidad de propagación de las ondas elásticas transversales v_s (ver apartado 8.2.2), podrán utilizarse las propiedades geotécnicas indicadas en la tabla C.3.1.

Donde:

v_p Velocidad de propagación de las ondas de compresión.

$N_{1,60}$ Número de golpes en el ensayo SPT normalizado al 60% de la energía de caída libre y a una tensión efectiva vertical de 100 kPa.

q_c Resistencia en punta del penetrómetro estático.

q_u Resistencia a compresión simple.

En muchos casos, no será necesario que los reconocimientos del terreno alcancen los 30 m de profundidad, siendo suficiente determinar los espesores de las capas superficiales y la profundidad del techo del terreno de tipo I. En general, se podrá suponer que el terreno no alcanzado en el reconocimiento no será peor que el más profundo del que se tenga información. Usualmente, una vez alcanzado el terreno tipo I, no es esperable la aparición a mayor profundidad de capas de terreno de los otros tipos. El conocimiento de la geología de la zona o los resultados de otros reconocimientos próximos serán particularmente aclaratorios en este sentido. En caso de duda, y sobre todo con datos insuficientes, deben adoptarse los valores que correspondan del lado de la seguridad.

TABLA C.3.1.

Características usuales de los diferentes tipos de terreno

Tipo de terreno	Descripción	v_s [m/s]	v_p [m/s]	Terrenos granulares		Terrenos cohesivos q_u [kPa]
				$N_{1,60}$	q_c [MPa]	
I	Roca compacta, suelo cementado o granular muy denso	> 750	> 2.000	> 50	> 20	
II	Roca muy fracturada, suelo granular denso o cohesivo muy duro	> 400	> 1.000	> 40	> 15	> 500
III	Suelo granular de compacidad media o suelo cohesivo de consistencia firme a dura	> 200	> 350	> 15	> 6	> 200
IV	Suelo granular suelto o suelo cohesivo blando	No se alcanzan los valores del terreno tipo III				

En los apoyos con cimentaciones superficiales mediante zapatas o losas, puede prescindirse de la influencia de las capas de terreno existentes por encima del plano de apoyo para la determinación del coeficiente C .

Cuando se cimente mediante durmientes sobre terraplén, debe tenerse en cuenta la posible amplificación del movimiento sísmico por causa de éste (geometría y flexibilidad del material). En los casos más simples, será suficiente incluir el terraplén como un terreno más para el cálculo de C .

En los apoyos pilotados, el movimiento que llega a la estructura está condicionado por complejos fenómenos de interacción suelo-pilotes-estructura. El estado actual del conocimiento no permite establecer criterios sencillos de aplicación general. La aplicación de procedimientos basados en la utilización de un coeficiente C que caracteriza la influencia del terreno no es independiente del modelo que se adopte para la estructura y su cimentación. Si el modelo de estructura comienza en un encepado de pilotes situado aproximadamente en la superficie del terreno, se puede calcular el coeficiente C con los mismos criterios que se utilizan en las cimentaciones superficia-

les, lo que supone implícitamente que los pilotes acompañan completamente al terreno en su movimiento durante el terremoto. Si en el modelo de estructura se incluyen unas pilas exentas del terreno equivalentes a los pilotes, en cuya punta se produce el apoyo en el terreno y cuya longitud se calcula de forma que los movimientos horizontales en cabeza sean iguales a los del sistema pilotes-terreno, puede calcularse el coeficiente C con los datos del terreno existente bajo las puntas de las pilas equivalentes a los pilotes.

El coeficiente C , determinado según se indica en el articulado, no contempla que el terreno sufra otros efectos además del vibratorio (como podrían ser licuación, movimientos de ladera, subsidencia, rupturas del terreno por fallas activas, colapso en cavidades, densificación, etc).

C.3.3. Caracterización del movimiento sísmico

Las bruscas variaciones de amplitud que se observan en los acelerogramas impiden un promediado en el dominio del tiempo que ponga de manifiesto las

características esenciales de los terremotos. Por el contrario, el estudio en el dominio de la frecuencia permite un alisado de las curvas resultantes y facilita el posterior tratamiento estadístico, para lo que se suelen normalizar mediante un factor que, por convenio, suele ser la aceleración máxima del suelo. La representación de la acción sísmica en el dominio de la frecuencia se ha efectuado tradicionalmente mediante el espectro de respuesta de desplazamientos, que representa para cada periodo T el desplazamiento máximo S_d de un sistema elástico con un grado de libertad que tuviese ese periodo propio de vibración y un índice de amortiguamiento ζ cuando se somete a un acelerograma. Asimismo, se definen los espectros de pseudovelocidad PS_v y de pseudo-aceleración PS_a obtenidos del espectro de desplazamientos mediante las relaciones:

$$PS_v = \omega S_d = \frac{2\pi}{T} S_d$$

$$PS_a = \omega PS_v = \omega^2 S_d = \frac{4\pi^2}{T^2} S_d$$

$$\omega^2 = k/m$$

$$\zeta = c/\sqrt{4 km}$$

donde:

- ω pulsación natural de vibración.
- k rigidez elástica.
- m masa.
- c amortiguamiento.

Si la elongación del sistema respecto a su base se denomina $u(t)$, se representa por $\dot{u}(t)$ y $\ddot{u}(t)$ la velocidad y la aceleración relativas a la base, respectivamente. Si $\ddot{u}^T(t)$ es la aceleración absoluta de la masa y $\ddot{u}_s(t)$ es la aceleración del suelo, se cumple:

$$\ddot{u}^T(t) = \ddot{u}(t) + \ddot{u}_s(t)$$

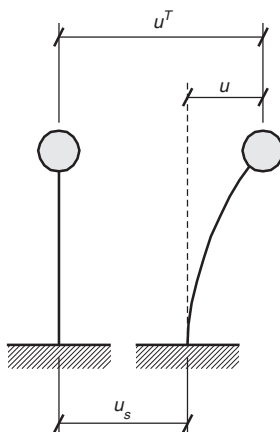


Figura C.3.1

La ecuación de equilibrio dinámico es:

$$m \ddot{u}^T + c \dot{u} + k u = 0$$

o bien, usando la notación anterior:

$$\ddot{u}^T + 2\zeta\omega \dot{u} + \omega^2 u = 0$$

Si ζ es pequeño, la relación entre los valores absolutos máximos de aceleración total y desplazamiento puede considerarse:

$$|\ddot{u}^T|_{\text{máx}} \approx \omega^2 |u|_{\text{máx}}$$

es decir:

$$S_a \approx PS_a$$

El promediado de las curvas obtenidas para numerosos acelerogramas de excitación, que se normalizan mediante división por la aceleración máxima del suelo a , ha permitido descubrir unas reglas, generalmente admitidas, sobre la forma de los espectros. Estas son las que se utilizan habitualmente en las normas. Se admite que el espectro de respuesta tiene tres ramas principales en cada una de las cuales la aceleración, la pseudovelocidad o el desplazamiento de la estructura son constantes y múltiplos de los correspondientes valores máximos de aceleración, velocidad y desplazamiento del suelo.

En consecuencia, según se indica en la figura C.3.2 (página siguiente), se admite que tras un periodo T_B el espectro de aceleraciones cae proporcionalmente a la inversa del periodo y a partir de T_C a la inversa de su cuadrado.

Para $T = 0$ se tiene un sistema tan rígido que sufre una aceleración máxima igual a la aceleración máxima del suelo a .

C.3.4. Aceleración sísmica horizontal de cálculo

Según se establece en el articulado, la aceleración horizontal correspondiente a un periodo de retorno P_R se puede obtener en cada punto del territorio, de forma aproximada, multiplicando por el factor γ_H la aceleración que se deduce del mapa de la figura 3.1 para dicho emplazamiento. Así, para el sismo básico, definido en el apartado 2.2.1, el valor de este factor es $\gamma_H = 1$. Para el sismo frecuente, cuyo periodo de retorno es de 100 años, según se establece en el apartado 2.2.3, resulta aproximadamente un valor de este factor modificador $\gamma_H = 0,53$. En el caso del sismo de construcción, el factor γ_H se obtendría de la expresión (3.3) con un valor del periodo de retorno no menor de 5 veces la duración de la etapa constructiva. Por ejemplo, para una etapa constructiva que durase un año, se podría considerar un periodo de retorno de 5 años, con lo que resultaría $\gamma_H \geq 0,16$. Se define como periodo de retorno P_R de un terremoto al inverso de la probabilidad anual de que éste sea superado. Si L es la vida útil de la estructura, la expresión que relaciona la probabilidad de superación de un terremoto a lo largo de esa vida útil con el periodo de retorno del mismo es la siguiente:

$$\phi = 1 - \left(1 - \frac{1}{P_R}\right)^L$$

Cuando $P_R \gg L$ resulta $\phi \cong L/P_R$.

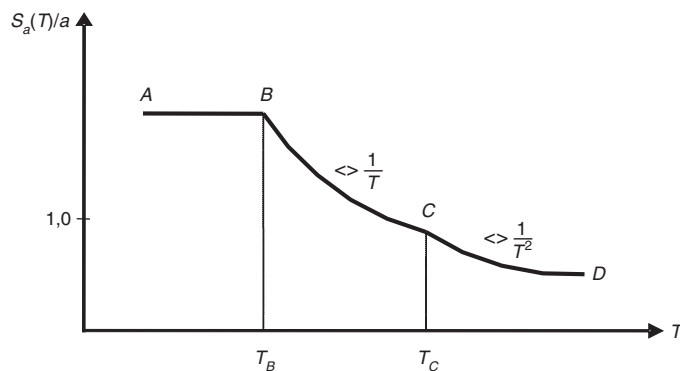


Figura C.3.2

La introducción del factor de importancia para obtener la aceleración de cálculo tiene como objetivo establecer una diferenciación en la fiabilidad de las estructuras, de forma que, en aquellos puentes que se consideren de importancia especial, la probabilidad de que se presente el terremoto de cálculo sea menor. Como la vida útil definida para los puentes es de 100 años, teniendo en cuenta la expresión anterior, la forma de reducir la probabilidad de excedencia es aumentar el período de retorno, lo que se consigue mediante la multiplicación de la aceleración básica por el factor de importancia.

Según lo expuesto, el factor de importancia γ_I y el factor modificador γ_{II} , aunque con motivaciones diferentes, suponen ambos una modificación del período de retorno de la aceleración sísmica de cálculo respecto a la aceleración sísmica básica, que corresponde a un período de retorno aproximado de 500 años.

Si se considera $\gamma_{II} = 1$, el producto $S \cdot a_b$ es la aceleración correspondiente al sismo básico, definido en el apartado 2.2.1, y el producto $S \cdot \gamma_I \cdot a_b$ es la aceleración correspondiente al sismo último de cálculo, definido en el apartado 2.2.2. Si se considera $\gamma_{II} = 0,53$, el producto $S \cdot \gamma_{II} \cdot a_b$ es la aceleración correspondiente al sismo frecuente, definido en el apartado 2.2.3, y el producto $S \cdot \gamma_I \cdot \gamma_{II} \cdot a_b$ es la aceleración correspondiente al sismo frecuente de cálculo, definido en el apartado 2.2.4.

Respecto al coeficiente S , debido a que los valores de a_b se asocian a un terreno aproximadamente tipo II, introduce una corrección en la aceleración sísmica, para que resulte menor cuando el terreno es bueno y para que resulte mayor cuando el terreno es blando (Tabla C.3.2).

TABLA C 3.2
Valores del coeficiente S

$\rho \cdot a_b$	$C = 1,0$	$C = 1,3$	$C = 1,6$	$C = 1,8$
$\leq 0,10$ g	0,80	1,04	1,28	1,44
0,15 g	0,83	1,03	1,23	1,37
0,20 g	0,87	1,03	1,19	1,29
0,25 g	0,90	1,02	1,14	1,22
0,30 g	0,93	1,01	1,09	1,15
0,35 g	0,97	1,01	1,05	1,07
$\geq 0,40$ g	1,00	1,00	1,00	1,00

C.3.5. Espectros de respuesta elástica

C.3.5.1. Espectros de aceleraciones

C.3.5.1.1. Componentes horizontales

El espectro de respuesta elástica representa la respuesta de una estructura de un grado de libertad cuando en su base se aplica un movimiento sísmico definido por una aceleración determinada. Esta respuesta depende del propio movimiento sísmico y del periodo propio y el amortiguamiento de la estructura. La consideración completa de todos los factores que influyen en la forma del espectro de respuesta es muy compleja. Para la definición del espectro recogido en esta Norma, se han tenido en cuenta los aspectos indicados a continuación.

El movimiento vibratorio causado por los terremotos procedentes de la denominada zona Azores-Gibraltar introduce algunas diferencias con el debido al resto de los terremotos peninsulares, ya que los primeros son de mayor magnitud y se sienten en el suroeste español, a gran distancia de la fuente sísmica, mientras que los segundos son de menor magnitud y sus principales efectos se producen a una distancia relativamente reducida de la fuente sísmica. La influencia de uno u otro tipo de sismicidad se ha tenido en cuenta por medio del coeficiente K . Sus valores se han calculado admitiendo que, para la misma aceleración a , los valores de T_B y las ordenadas del espectro entre T_B y T_C son 1,5 veces mayores en los terremotos con origen en la fuente sismogénica de Azores-Gibraltar que en los terremotos provenientes de las restantes zonas sismogénicas (continentales y marítimas colindantes). Los valores de K resultantes para el territorio español están comprendidos entre 1,0 y 1,3.

La existencia de suelos blandos condiciona la forma del espectro de respuesta desplazando T_B y T_C hacia periodos más altos y amplificando las ordenadas espectrales para periodos mayores de T_B . Esto se ha tenido en cuenta mediante la participación implícita del coeficiente del terreno C en la definición del espectro. La categoría del terremoto de proyecto también influye en la forma del espectro de respuesta. El sismo básico corresponde a un periodo de retorno mayor, por lo que su magnitud es superior a la del sismo frecuente o de construcción. Las diferencias se reflejan mediante valores mayores de T_B y T_C y de las ordenadas espectrales para periodos superiores a T_B .

C.3.5.1.2. Componente vertical

Los movimientos verticales máximos durante la vibración sísmica suelen ser menores que los horizontales (entre el 50% y el 100%). La proporción entre ambos depende del tipo de movimiento en la falla que produce el terremoto, de la distancia entre la fuente sísmica y el punto de observación y de las condiciones locales en éste. En el articulado se admite como simplificación un valor del 70%, a falta de estudios más detallados.

C.3.5.1.3. Espectro de desplazamientos

El espectro envolvente podrá obtenerse utilizando el valor de T_A correspondiente al mínimo C_k y los valores de T_B , T_C y S correspondientes al máximo C_k , siendo C_k el coeficiente de terreno en la vertical del apoyo k .

C.3.5.2. Espectros de desplazamientos

En la figura C3.3, se muestra la forma del espectro de desplazamientos.

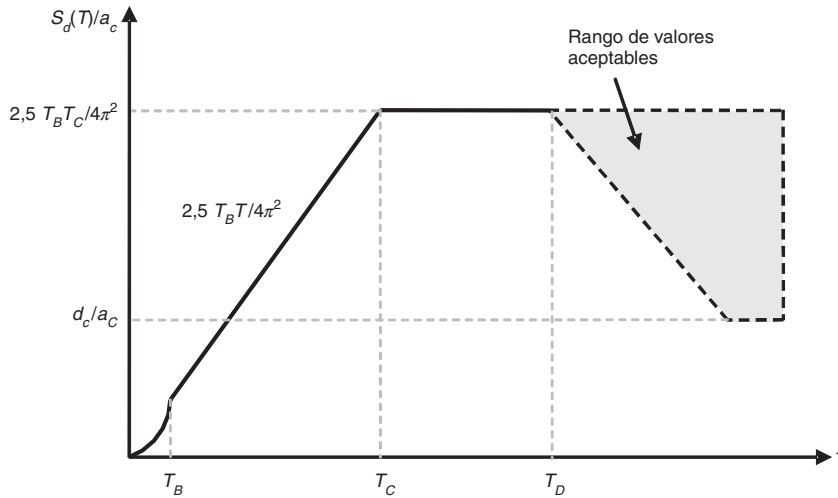


Figura C.3.3 Forma del espectro de respuesta de desplazamientos para un índice de amortiguamiento $\zeta = 5\%$

C.3.6. Velocidad y desplazamiento máximos del terreno

Las expresiones 3.9 se refieren a la relación entre desplazamiento, velocidad y aceleración máxima del terreno.

Como se ha dicho en el comentario al apartado 3.3, suele considerarse que los diferentes tramos del espectro de respuesta están asociados a unas determinadas condiciones del movimiento del suelo. Así, en la rama AB del espectro se admite que la aceleración S_a es constante y proporcional a la aceleración del suelo, de acuerdo con la expresión:

$$S_a = 2,5 a_c$$

En la rama BC del espectro, se admite que la pseudovelocidad PS_v es constante y proporcional a la velocidad del suelo v_c :

$$PS_v = k_1 0,2 T_B \cdot a_c$$

Teniendo en cuenta que en esta rama el espectro de pseudoaceleración PS_a es proporcional a $1/T$:

$$PS_v = \frac{PS_a}{\omega} = \frac{1}{\omega} 2,5 a_c \frac{T_B}{T} = \frac{2,5}{2\pi} a_c \cdot T_B$$

Igualando ambas expresiones, resulta:

$$k_1 \approx 2$$

Es decir, se está admitiendo que, en la rama del espectro dominada por la velocidad, se cumple:

$$PS_v = 2v_c$$

Por otro lado, también se acepta que, en la rama CD del espectro, el desplazamiento S_d es constante y proporcional al desplazamiento del suelo d_c :

$$S_d = k_2 \cdot d_c = k_2 \cdot 0,025 T_B \cdot T_C \cdot a_c$$

Teniendo en cuenta que en esta rama el espectro de pseudoaceleración PS_a es proporcional a $1/T^2$:

$$S_d = \frac{PS_a}{\omega^2} = \frac{1}{\omega^2} 2,5 a_c \frac{T_B \cdot T_C}{T^2} = \frac{2,5}{4\pi^2} a_c \cdot T_B \cdot T_C$$

Igualando ambas expresiones, resulta:

$$k_2 \approx 2,5$$

Es decir, se está admitiendo que, en la rama del espectro dominada por el desplazamiento, se cumple:

$$S_d = 2,5 d_c$$

C.3.7. Acelerogramas

Entre los acelerogramas registrados, los más adecuados son los que proceden de terremotos de similar magnitud que el sismo de cálculo, de mecanismo focal equivalente, con epicentro situado a distancia parecida del sitio y que han sido registrados en un terreno análogo.

En la práctica, es difícil el cumplimiento de estas condiciones, principalmente porque los terremotos de cálculo prescritos en esta Norma proceden de un análisis probabilístico, de forma que en cada ordenada espectral hay contribución de terremotos de diferente origen. En el sudoeste peninsular es particularmente significativa la influencia de los dos tipos de fuente sísmica (los terremotos peninsulares y de las áreas marinas adyacentes y los de la zona sismogénica de Azores-Gibraltar), que han requerido la introducción del coeficiente de contribución K en la formulación del espectro de respuesta (apartado 3.5.1). Asimismo, la información disponible sobre los mecanismos focales de los terremotos de cálculo es limitada.

En general, es necesario un estudio específico para cada emplazamiento y para cada categoría de terremoto, en el que se definan los rangos de valores de la magnitud y de la distancia epicentral de los terremotos que más contribuyen a la peligrosidad sísmica, entre los que deberían elegirse las utilizables en el cálculo.

En todo caso, es importante que el terreno de los sitios de registro sea equivalente al del emplazamiento de cálculo.

Para obviar la dificultad de encontrar acelerogramas catalogados, adecuadamente representativos del sismo de cálculo y para cubrir la variabilidad que les es inherente, se considera aceptable elegirlos entre los procedentes de terremotos cuya magnitud esté comprendida entre 0,25 unidades menos que la menor y 0,25 unidades más que la mayor del rango estimado para el sismo de cálculo y cuya distancia epicentral esté comprendida entre la mitad de la menor y el doble de la mayor de las estimadas como más probables para el sismo de cálculo, siempre que se escalen con un factor multiplicador constante en el tiempo y el mismo para todos los acelerogramas del par o del trío, para conseguir la compatibilidad con el espectro de respuesta.

Es posible que la peligrosidad sísmica de un cierto emplazamiento, en el rango de periodos de interés, se vea influida en forma equiparable por terremotos muy diferentes (sobre todo en el sudoeste peninsular). En este caso, se deberían utilizar para el cálculo los acelerogramas del terremoto de mayor magnitud y mayor distancia epicentral.

A falta del estudio específico antes citado, la magnitud de los sismos de cálculo puede estimarse de forma aproximada en los valores que se indican en la tabla C.3.3.

TABLA C.3.3.

Estimación de la magnitud M de los terremotos de cálculo

	Sismo básico	Sismo frecuente
Canarias, Baleares, Galicia, Barcelona y Tarragona	$M = 5,0-6,5$	
Andalucía (puntos con $K = 1,0$) y Pirineos	$M = 6,0-7,5$	$M = 5,0-6,5$
Sudoeste peninsular (puntos con $K > 1,0$)		
Terremotos peninsulares y marinos adyacentes	$M = 6,0-7,5$	$M = 5,0-6,5$
Terremotos de la zona Azores-Gibraltar	$M > 8,0$	$M = 7,0-8,0$

La distancia epicentral típica para los terremotos peninsulares y de áreas marinas adyacentes puede considerarse de unas decenas de kilómetros, mientras que en el sudoeste español, para los terremotos con origen en la zona de Azores-Gibraltar, puede estimarse en 300-400 km.

Se recomienda que, salvo justificación específica, la duración significativa (tiempo entre el 5% y el 95% de la intensidad Arias) no sea menor que los siguientes valores:

TABLA C.3.4.

Duración significativa mínima (en segundos)

	Sismo básico	Sismo frecuente
Canarias, Baleares, Galicia, Barcelona y Tarragona	10 s	
Andalucía (puntos con $K = 1,0$) y Pirineos	20 s	10 s
Sudoeste peninsular (puntos con $K > 1,0$)		
Terremotos peninsulares y marinos adyacentes	20 s	10 s
Terremotos de la zona Azores-Gibraltar	60 s	30 s

La compatibilidad de cada acelerograma con el espectro de respuesta elástica definido en el apartado 3.5.1 se comprobará con el siguiente procedimiento:

- Se calculan las ordenadas espectrales para un amortiguamiento del 5%. Asimismo se calcula el espectro alisado formado por tramos similares a los descritos en el comentario al apartado 3.5.1, los principales de los cuales son el de aceleración espectral constante (independiente de T), el de aceleración inversamente proporcional a T y el de aceleración inversamente proporcional a T^2 .
- Se calculan los periodos mínimo, T_{\min} , y máximo, T_{\max} , del conjunto de modos en que se moviliza el 90% de la masa de la estructura.
- Se comprueba que, entre $0,8 T_{\min}$ y $1,2 T_{\max}$, las ordenadas espectrales no son menores del 90% de las ordenadas del espectro definido en el apartado 3.5.1, y las del espectro alisado no son menores que las de dicho espectro.

La modulación de la amplitud a lo largo del registro deberá ser compatible con la duración de los intervalos entre la primera y la última vez que se supera 0,05 g y 0,10 g , que deberán ser objeto de un estudio específico en cada caso.

Para cubrir las incertidumbres existentes, se definirán diferentes conjuntos coherentes de acelerogramas. Todos ellos deberán cumplir las condiciones exigidas en los párrafos anteriores, aunque podrán diferir en el resto del espectro de respuesta y en la modulación de amplitudes en el tiempo.

Se consideran conjuntos coherentes de acelerogramas aquéllos que sean representativos de las dos o tres componentes del movimiento en un mismo punto como, por ejemplo, los dos o tres acelerogramas ortogonales registrados simultáneamente en un mismo acelerómetro.

C.3.8. Variabilidad espacial

Se habla de variabilidad espacial cuando el movimiento sísmico en los diferentes apoyos del puente es diferente, hasta el punto de que la acción sísmica no se pueda modelizar de forma única para toda la estructura. No existe, hasta el momento, una formulación aceptada de forma general para cuantificar estos aspectos.

En el caso de que las cimentaciones de una misma estructura se encuentren sobre terrenos con características muy diferentes, se considera aceptable adoptar un espectro promedio, de acuerdo con el apartado 3.5.1.3.

En general, la variabilidad espacial introducida por discontinuidades topográficas debe ser tenida en cuenta sólo si se prevé que su presencia pueda dar lugar a una variación importante de las características del movimiento sísmico.

En el caso de que la longitud del puente sea superior a 600 m, la variabilidad espacial debe considerarse siempre, debido a la pérdida de coherencia del movimiento con la distancia por su continua modificación causada por reflexiones y refracciones de las ondas internas. En este caso, una forma simplificada de estimar los efectos de la variabilidad espacial de la acción sísmica es mediante el método de los desplazamientos estáticos relativos entre apoyos, que se resume a continuación:

- a) Se elige un apoyo de referencia y se calculan las distancias L_i desde él hasta los demás apoyos.
- b) Se calcula un desplazamiento longitudinal relativo entre el apoyo i y el de referencia mediante la expresión:

$$d_i = L_i \cdot v_c / v_p \leq 2 d_c$$

donde:

L_i distancia entre el apoyo i y el de referencia

v_c, d_c velocidad y desplazamiento horizontales máximos del terreno, según el apartado 3.6. Si el terreno del apoyo de referencia y del apoyo i no es el mismo, se tomarán los valores de v_c y d_c correspondientes al terreno más desfavorable

v_p velocidad de propagación de las ondas longitudinales (en capas profundas del terreno) entre el apoyo i y el de referencia. A falta de un estudio específico se puede adoptar un valor de 2000 m/s

- c) El valor de cálculo de los efectos de las acciones correspondientes a la combinación sísmica se obtendrá mediante la expresión:

$$E_d = \sqrt{E_{ds}^2 + E_i^2}$$

donde:

E_{ds} valor de cálculo de los efectos de las acciones sin considerar el desfase de movimientos entre apoyos.

E_i efectos producidos por el vector de desplazamientos relativo entre apoyos $[d_i]$ formado con los valores definidos en b), obtenidos mediante un cálculo estático.