

DOCUMENTO N° 1. MEMORIA Y ANEJOS  
**ANEJO 8. EFECTOS SÍSMICOS**



## INDICE

1	INTRODUCCIÓN.....	5
2	CÁLCULO DE LA ACCIÓN SÍSMICA DE ACUERDO A UNE-EN 1998-1:2018 .....	5
	2.1 SISMICIDAD DE LA ZONA DE ESTUDIO .....	5
	2.2 CONSIDERACIÓN DE LA ACCIÓN SÍSMICA. ESPECTRO ELÁSTICO DE RESPUESTA HORIZONTAL.....	5
3	CÁLCULO DE LA ACCIÓN SÍSMICA DE ACUERDO A NCSE-02 Y NCSP-07 .....	6
	3.1 SISMICIDAD DE LA ZONA DE ESTUDIO .....	6
	3.2 CONSIDERACIÓN DE LA ACCIÓN SÍSMICA. ESPECTRO ELÁSTICO DE RESPUESTA HORIZONTAL.....	8
4	CONCLUSIÓN.....	8



## 1 INTRODUCCIÓN

En este Anejo se justifica que de acuerdo con el Eurocódigo 8: Proyectos de estructuras sísmorresistentes, Parte 1: Reglas generales, acciones sísmicas y reglas para edificación (UNE-EN 1998-1:2018), es necesario considerar las acciones sísmicas en el proyecto.

Además, se determina el valor de la acción sísmica de acuerdo a la Norma de Construcción Sísmorresistente: Parte general y edificación (NCSE-02) y la Norma de Construcción Sísmorresistente: Puentes (NCSP-07) de obligado cumplimiento.

## 2 CÁLCULO DE LA ACCIÓN SÍSMICA DE ACUERDO A UNE-EN 1998-1:2018

### 2.1 SISMICIDAD DE LA ZONA DE ESTUDIO

Según se indica en UNE-EN 1998-1:2018, la peligrosidad sísmica se define por medio de los siguientes parámetros:

- La aceleración horizontal en terreno tipo A,  $a_{gR}$ .
- El coeficiente de contribución K, que tiene en cuenta la distinta contribución de la sismicidad de la península y de las áreas marinas adyacentes y de la más lejana, de la parte de la zona Azores-Gibraltar situada en Goringe-Herradura.

El valor de  $a_{gR}$  y K en un punto P del territorio, se toma igual a el valor que se indica en apartado AN.5 del Anejo Nacional de UNE-EN 1998-1:2018, para las coordenadas geodésicas del emplazamiento de la estructura. Para el Puente del Centenario se pueden considerar las siguientes coordenadas geodésicas:

- Latitud 37°20'56.76" N (37,349°)
- Longitud 5°59'34.8" W (5,993°)

Según la tabla indicada en el AN.5, el valor de  $a_{gR}$  y K puede tomarse como 0.091 y 1.10 respectivamente.

Para tener en cuenta la influencia de las condiciones locales del terreno sobre la acción sísmica se utilizan los tipos de terreno A, B, C, D y E descritos mediante los perfiles estratigráficos indicados en la tabla a continuación:

Tipo de terreno medio	$v_{s,30}$ (m/s)	Descripción
A	> 800	Roca compacta o suelo cementado aflorante o con una capa de suelo superficial de espesor menor de 5 m.
B	360 - 800	En las decenas de metros más superficiales, predominio de suelos granulares densos o suelos cohesivos duros o presencia de capas delgadas de suelos granulares sueltos o cohesivos blandos.
C	180 - 360	En las decenas de metros más superficiales, predominio de suelos granulares de compacidad media o suelos cohesivos de consistencia firme o muy firme o presencia de capas de bastante espesor de suelos granulares sueltos o cohesivos blandos.
D	< 180	En las decenas de metros más superficiales, predominio de capas de gran espesor de suelos granulares sueltos o cohesivos blandos.
S1	< 100	Suelos consistiendo, o conteniendo, una capa de al menos 10 m de espesor, de arcillas o limos blandos, de alta plasticidad (IP > 40) y con alto contenido de humedad.
S2		Suelos formados por arenas licuables o arcillas susceptibles, u otro perfil de suelos no contenido en los tipos A-D o S1.

En la norma UNE-EN 1998-1:2018, la determinación del tipo de terreno equivalente se realiza una media ponderada de los parámetros del terreno en 30 m más superficiales del perfil del suelo.

Para este análisis, se puede considerar un valor medio de la velocidad de propagación de las ondas S en los 30 m superiores del perfil del suelo,  $v_{s,30}$ , igual a 1000 m/s para las margas, 800 m/s para las gravas, 180 para las arcillas y limos y 100 para los rellenos.

De acuerdo con lo indicado en el Anejo 12 Estudio Geotécnico, se pueden establecer los siguientes tipos de terreno en los 30 metros bajo la cota de los encepados de pilas 12 a 16:

Tabla 1. Potencia de estratos en los 30 m bajo pilas 12 a 16

PILA	POTENCIA DE ESTRATO (m)			
	13	14	15	16
RELLENO	2.0	3.5	2.0	0.4
ARCILLAS	14.3	12.0	13.5	14.7
LIMOS	3.8	2.4	0.0	3.9
GRAVAS	10.7	6.6	6.0	3.1
MARGAS	0.0	5.5	8.5	7.9

Realizando una media ponderada en función de la potencia de los estratos bajo las cimentaciones de cada una de las pilas se obtiene un valor de  $v_{s,30}$  igual a:

- Pila 13 390 m/s
- Pila 14 457 m/s
- Pila 15 531 m/s
- Pila 16 459 m/s

Por lo tanto, para la determinación de los parámetros sísmicos del Puente del Centenario, se puede considerar un tipo de terreno tipo B.

De acuerdo a la norma UNE-EN 1998-2:2018, Eurocódigo 8: Proyecto de estructuras Sísmorresistentes, Parte 2: Puentes; el Puente del Centenario puede considerarse como un puente de Clase de importancia II: *Puentes de importancia normal*. Esta clase de puente se corresponde con aquéllos cuya destrucción puede ocasionar víctimas o interrumpir un servicio necesario para la colectividad o producir importantes pérdidas económicas, siempre que no se trate de un servicio imprescindible, ni pueda dar lugar a efectos catastróficos. A los puentes de Clase de importancia II le corresponde un coeficiente de importancia,  $\gamma_I$ , igual a 1.0.

Por tanto, el valor de la aceleración de cálculo en un terreno de referencia tipo A, correspondiente a la categoría de importancia del puente, será igual a:

$$a_g = \gamma_I a_{gR} = 1,0 \cdot 0,091g = 0,091g$$

### 2.2 CONSIDERACIÓN DE LA ACCIÓN SÍSMICA. ESPECTRO ELÁSTICO DE RESPUESTA HORIZONTAL

A partir de la aceleración de cálculo, el tipo terreno y del coeficiente K de contribución, se puede determinar el espectro elástico de respuesta establecidos en la norma UNE-EN 1998-1:2018.

Según se especifica en el Anejo Nacional AN.2, los parámetros que describen el espectro  $S$ ,  $T_B$ ,  $T_C$  y  $T_D$  se pueden determinar a partir de lo indicado en la siguiente tabla para cada tipo de suelo:

Suelo tipo	S	T <sub>B</sub> (s)	T <sub>C</sub> (s)	T <sub>D</sub> (s)
A	1	$\frac{T_c}{5}$	$\frac{K}{4}$	2,0
B	$a_g \leq 0,1 g$ : $S = C$	$\frac{T_c}{5}$	$\frac{KC}{4}$	2,0
C	$0,1 g < a_g \leq 0,4 g$ : $S = C + 3,33 \left( \frac{a_g}{g} - 0,1 \right) (1,0 - C)$			
	$a_g > 0,4 g$ : $S = 1$			
D	$a_g \leq 0,1 g$ : $S = 2$	$\frac{T_c}{5}$	$\frac{K}{2}$	2,0
	$0,1 g < a_g \leq 0,4 g$ : $S = 2,33 - 3,33 \frac{a_g}{g}$			
	$a_g > 0,4 g$ : $S = 1$			

Para un terreno tipo B los parámetros que describen el espectro horizontal resultan:

- $S = 1,29$
- $T_B = 0,07$  s.
- $T_C = 0,36$  s.
- $T_D = 2,00$  s.

Para las componentes horizontales de la acción sísmica, el espectro de respuesta elástica  $S_e(T)$  se define por las siguientes ecuaciones (3.2.2.2, UNE-EN 1998-1:2018):

$$0 \leq T \leq T_B : S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \left[ 1 + \frac{T}{T_B} \cdot (\eta \cdot 2,5 - 1) \right]$$

$$T_B \leq T \leq T_C : S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5$$

$$T_C \leq T \leq T_D : S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5 \left[ \frac{T_C}{T} \right]$$

$$T_D \leq T \leq 4s : S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5 \left[ \frac{T_C T_D}{T^2} \right]$$

Donde:

- $S_e(T)$  es el espectro de respuesta elástica;
- $T$  es el periodo de vibración de un sistema lineal con un grado de libertad;
- $a_g$  es el valor de cálculo de la aceleración del suelo en un terreno tipo A;
- $T_B$  es el límite inferior del periodo del tramo de aceleración espectral constante;
- $T_C$  es el límite superior del periodo del tramo de aceleración espectral constante;
- $T_D$  es el valor que define el comienzo del tramo de respuesta de desplazamiento constante del espectro;
- $S$  es el coeficiente de suelo;
- $\eta$  es el coeficiente de corrección del amortiguamiento con valor de referencia  $\eta = 1$ , para un amortiguamiento viscoso del 5%

Para  $T = 0$  la aceleración espectral dada por este espectro es igual al valor de cálculo de la aceleración del suelo en un terreno de referencia tipo A, multiplicada por el coeficiente de suelo  $S$ .

Dicho valor resulta:  $1,29 \times 0,091g = 0,117g$

El espectro elástico horizontal de diseño se incluye a continuación:

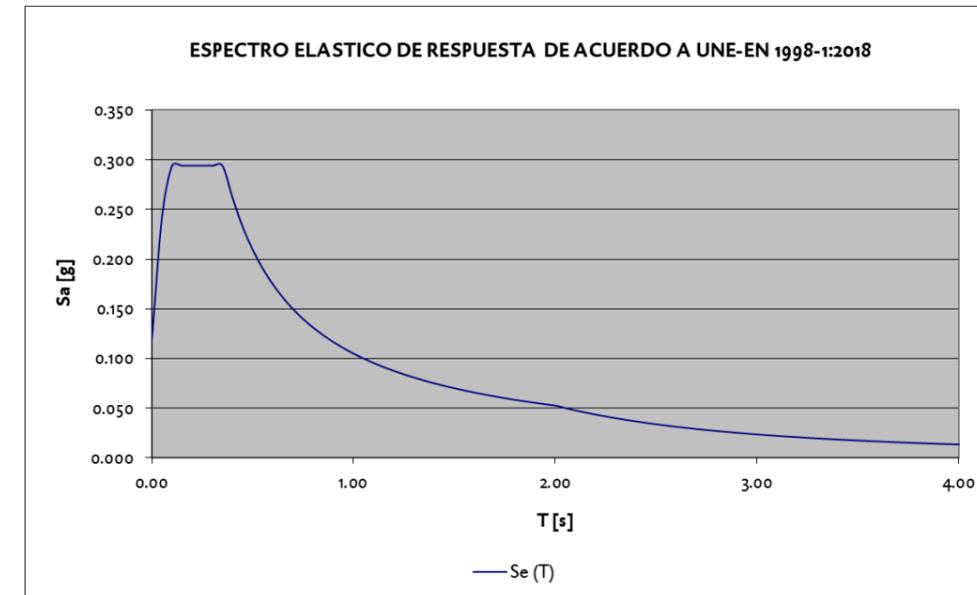


Figura 1. Espectro elástico de respuesta de acuerdo a UNE-EN 1998-1:2018

### 3 CÁLCULO DE LA ACCIÓN SÍSMICA DE ACUERDO A NCSE-02 Y NCSP-07

#### 3.1 SISMICIDAD DE LA ZONA DE ESTUDIO

Según se indica en la Norma de Construcción Sismorresistente: Parte general y edificación (NCSE-02) y la Norma de Construcción Sismorresistente: Puentes (NCSP-07), la aceleración básica ( $a_b$ ), para un periodo de retorno de 500 años, en el ámbito del estudio es de 0,07-g, siendo  $g$  la aceleración de la gravedad (9,80 m/s<sup>2</sup>). Además, en Sevilla el coeficiente de contribución de la falla Azores-Gibraltar es de  $k=1.1$ .

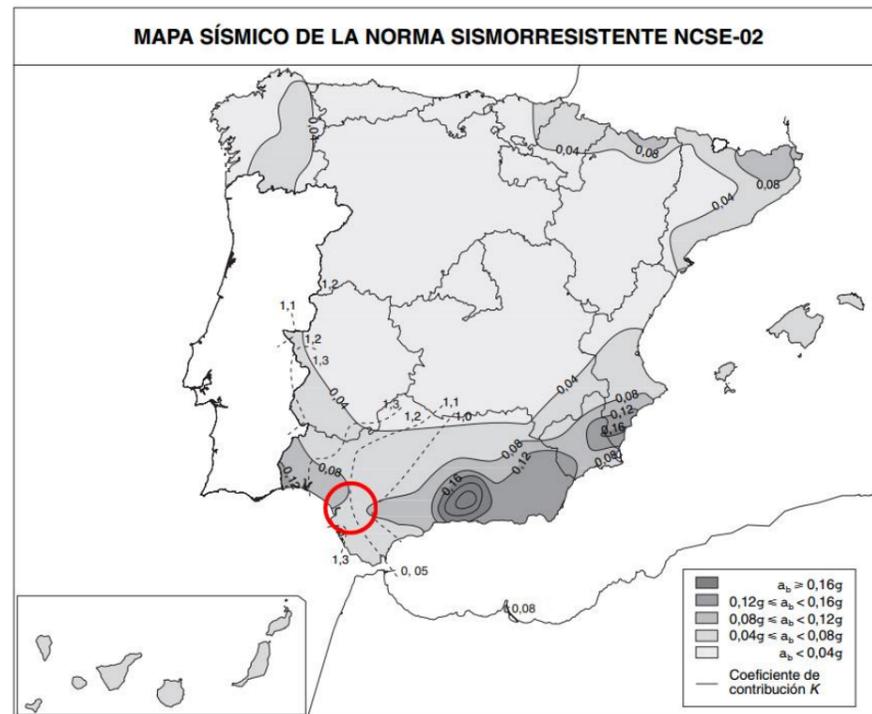


Figura 2. Mapa nacional de peligrosidad sísmica con indicación de la zona de estudio

La aceleración sísmica horizontal de cálculo se define como el producto

$$a_c = S \cdot \rho \cdot a_b$$

Siendo  $\rho$  un coeficiente adimensional de riesgo, que para construcciones de importancia normal adopta el valor de 1,0, y para obras de importancia especial toma del valor de 1,3; S un coeficiente de amplificación del terreno que, dado que  $\rho \cdot a_b$  sería menor que 0,1 g, se define como:

$$S = \frac{C}{1,25}$$

Donde C es un coeficiente que depende de las características geotécnicas del terreno de cimentación hasta una profundidad de 30 m, pudiendo calcularse con la expresión:

$$C = \frac{\sum C_i \cdot e_i}{30}$$

El coeficiente C toma los valores de la siguiente tabla para los terrenos normalizados:

- 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 compactación 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.

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

Para caracterizar los terrenos de cimentación los Comentarios de la Subcomisión Permanente de Normas Sismorresistentes, proponen la siguiente tabla.

Características usuales de los diferentes tipos de terreno

Tipo de terreno	Descripción	$v_s$ [m/s]	$v_p$ [m/s]	Terrenos granulares		Terrenos cohesivos $q_c$ [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 compactación 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				

De acuerdo con los citados comentarios, en el caso de cimentaciones profundas, 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 superficiales (lo que supone implícitamente que los pilotes acompañan completamente al terreno en su movimiento durante el terremoto). Es decir que se puede prescindirse de la influencia de las capas de terreno existentes por encima del plano de apoyo para la determinación del coeficiente C

En el caso del Puente del Centenario se pueden establecer los siguientes tipos de terreno en los 30 metros bajo la cota de encepado, de acuerdo con lo indicado en el Anejo 12 Estudio Geotécnico:

- 15 m de terreno tipo IV; C=2,0
- 5 m de terreno tipo I; C= 1,0
- 3 m de terreno tipo III; C=1,6
- 7 m de terreno tipo II; C=1,3

En cuanto a la influencia del tipo de terreno en la definición del espectro de diseño, según los planos de proyecto se tiene que los 15 metros más superficiales están formados de un terreno no competente, que será considerado como tipo IV. Bajo este estrato se tienen un estrato de gravas y arenas, que para los efectos de este informe se ha considerado, conservadoramente, como tipo III. Así, se ha tomado un coeficiente del tipo de terreno conservador de 1.80.

Finalmente, la aceleración de cálculo será igual a:

$$a_c = S \cdot \rho \cdot a_b = 1,304 \cdot 1,3 \cdot 1,0 \cdot 0,07g = 0,119g$$

Este valor resulta igual al valor calculado de acuerdo al Eurocódigo 8.

### 3.2 CONSIDERACIÓN DE LA ACCIÓN SÍSMICA. ESPECTRO ELÁSTICO DE RESPUESTA HORIZONTAL

De acuerdo a NCSP-0, se definen tres espectros, el correspondiente al sismo frecuente, al sismo último y al sismo de construcción.

- Parámetros básicos del sismo:  
 $a_b = 0.07g$        $k = 1.1$        $C = 1.8$        $\gamma_{II} = 1.3$
- Parámetros para el sismo frecuente  
 $T_r = 100$  años       $\rightarrow$        $\gamma_{II} = 0.525$   
 $a_c = 0.069g$   
 $\zeta = 3\%$        $\rightarrow$        $\nu = 1.23$

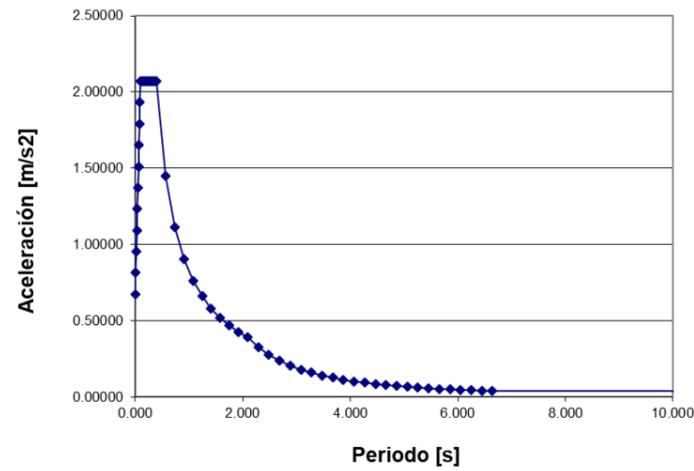


Figura 3 Espectro sismo frecuente

- Parámetros para el sismo último  
 $T_r = 500$  años       $\rightarrow$        $\gamma_{II} = 1.00$   
 $a_c = 0.131g$   
 $\zeta = 5\%$        $\rightarrow$        $\nu = 1.00$

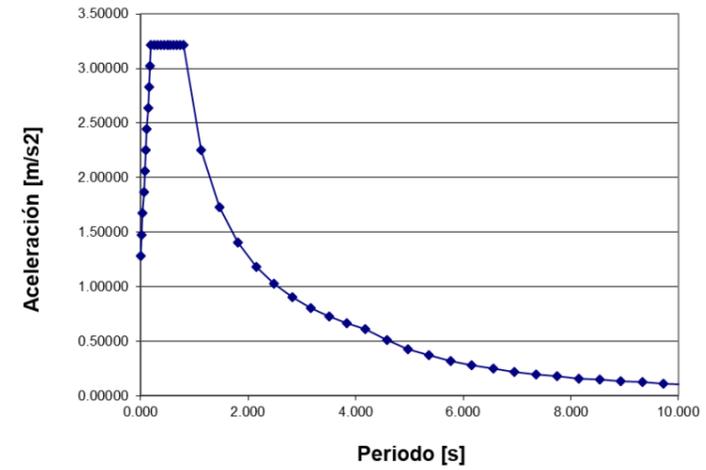


Figura 4 Espectro sismo último

- Parámetros para el sismo de construcción  
 $T_r = 25$  años       $\rightarrow$        $\gamma_{II} = 0.30$   
 $a_c = 0.040g$   
 $\zeta = 3\%$        $\rightarrow$        $\nu = 1.23$  (se mantiene el amortiguamiento del sismo frecuente)

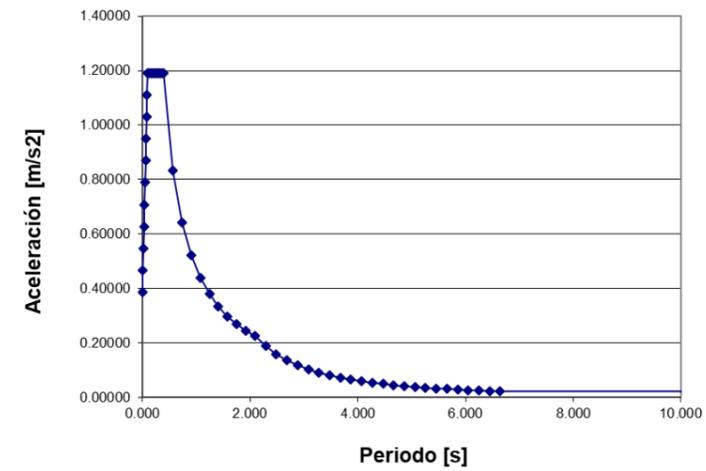


Figura 5 Espectro sismo de construcción

## 4 CONCLUSIÓN

A la vista de los resultados obtenidos se puede establecer que el valor de la acción sísmica de cálculo determinada a partir del UNE-EN 1998-1:2018 supone un nivel de seguridad análogo al calculado de acuerdo a la NSCP-07, de obligado cumplimiento.