

ÍNDICE

4. ANEJO Nº4. EFECTOS SÍSMICOS	3
4.1. INTRODUCCIÓN	3
4.2. CONTEXTO SÍSMICO	3
4.2.1. Normas Sismorresistentes. Ámbito de aplicación	4
4.2.2. Riesgo sísmico en la zona de estudio	5
4.2.3. Acciones sísmicas	6
4.3. ACELERACIÓN SÍSMICA EN LA ZONA DE PROYECTO	7
4.3.1. Viaductos y obras de paso	7
4.3.2. Resto de estructuras y obras de tierra	9

4. ANEJO Nº4. EFECTOS SÍSMICOS

4.1. INTRODUCCIÓN

El presente documento tiene como objetivo determinar las aceleraciones sísmicas básica y de cálculo, junto al espectro elástico del terreno para cumplir con las especificaciones de la Normativa de construcción sismorresistente: Parte general y edificación (NCSR-02) y Norma de Construcción sismorresistente: Puentes (NCSP-07), aplicadas al **Proyecto de Construcción del Aumento de Capacidad de la Carretera N-II. Tramo: Variante de Figueres - Pont de Molins**. PP.KK. Aproximados del 748+800 al 757+040.

4.2. CONTEXTO SÍSMICO

Catalunya y en general la parte Occidental del Mediterráneo corresponde a una zona de colisión entre las placas tectónicas de Europa y de África. La tasa de convergencia es moderada y por tanto, los sismos que se producen son de poca frecuencia y baja intensidad.

En la siguiente figura se muestra un mapa de Catalunya en el que se han representado por colores las diferentes zonas sísmicas en función de la intensidad máxima de los sismos:

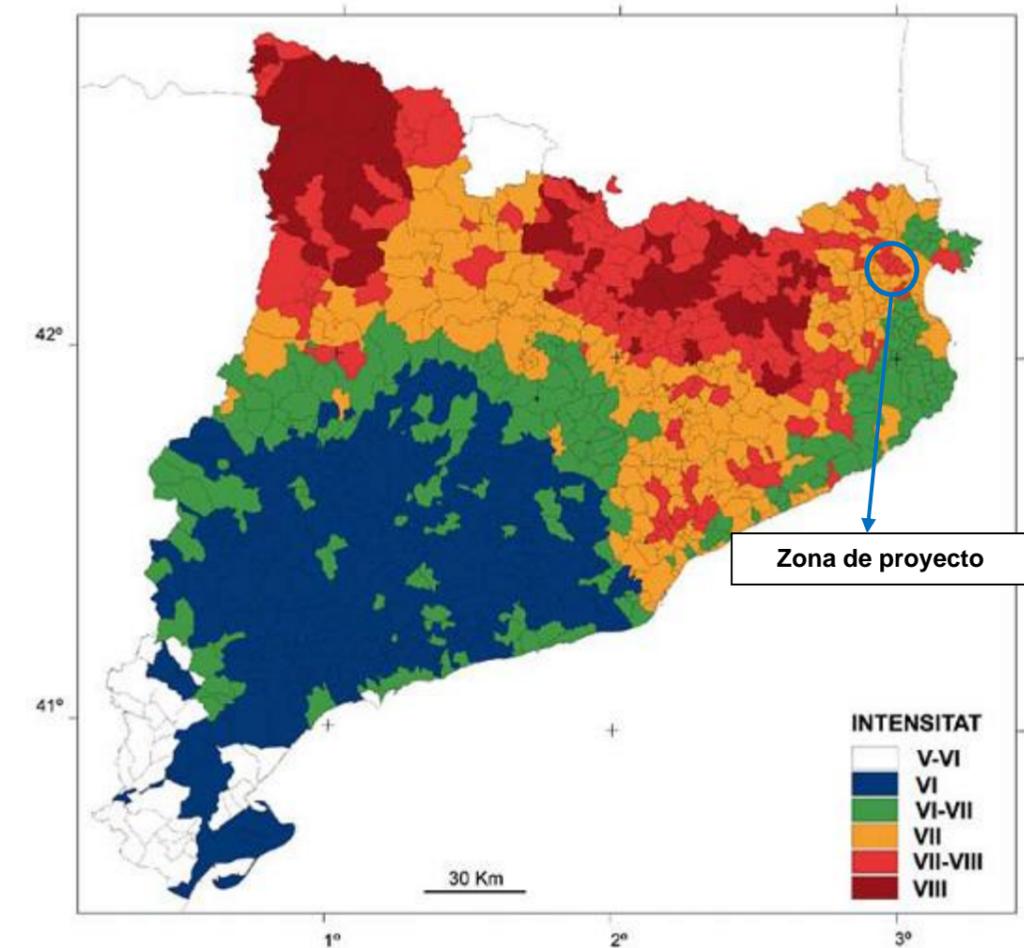


Figura 1. Zonas Sísmicas de Cataluña en función de la intensidad máxima de un sismo.

Se trata de una zona donde es difícil correlacionar la ocurrencia de sismos con fallas activas conocidas, por lo que la definición del contexto sísmico de Catalunya se apoya en gran parte en registros históricos y el estudio de los parámetros geológicos más representativos de la región.

El terremoto de mayor intensidad cercano a la zona circundante de Figueres se sitúa con epicentro en la zona de la Selva, Garrotxa y Ripollés. Fue causante de numerosas víctimas y daños en los años 1427-28. Llegó a una intensidad de VIII-IX en la escala MSK (medida del tamaño del seísmo basada en los efectos que produce). Esta intensidad corresponde al nivel donde comienzan a presentarse daños severos en las construcciones, incluso la destrucción de algunas de ellas, así como apertura de grietas en el terreno.

Se dispone por parte del Instituto Geológico de Catalunya de un mapa de zonas sísmicas donde se indica la peligrosidad asociada a este fenómeno en las inmediaciones del sector en estudio. Para cada término municipal, este mapa muestra, en base a un análisis probabilístico, la intensidad máxima a la que podría ocurrir un sismo con un periodo de retorno de 500 años, teniendo en cuenta los registros históricos y las características generales que presenta el terreno en estos sitios.

En la figura siguiente se muestra un mapa de la región norte de Catalunya con la distribución geográfica de los terremotos históricos de la zona según su magnitud.

La magnitud máxima registrada en toda la zona ha sido de IX, cerca de Olot, a unos 40 km al oeste del área de proyecto.

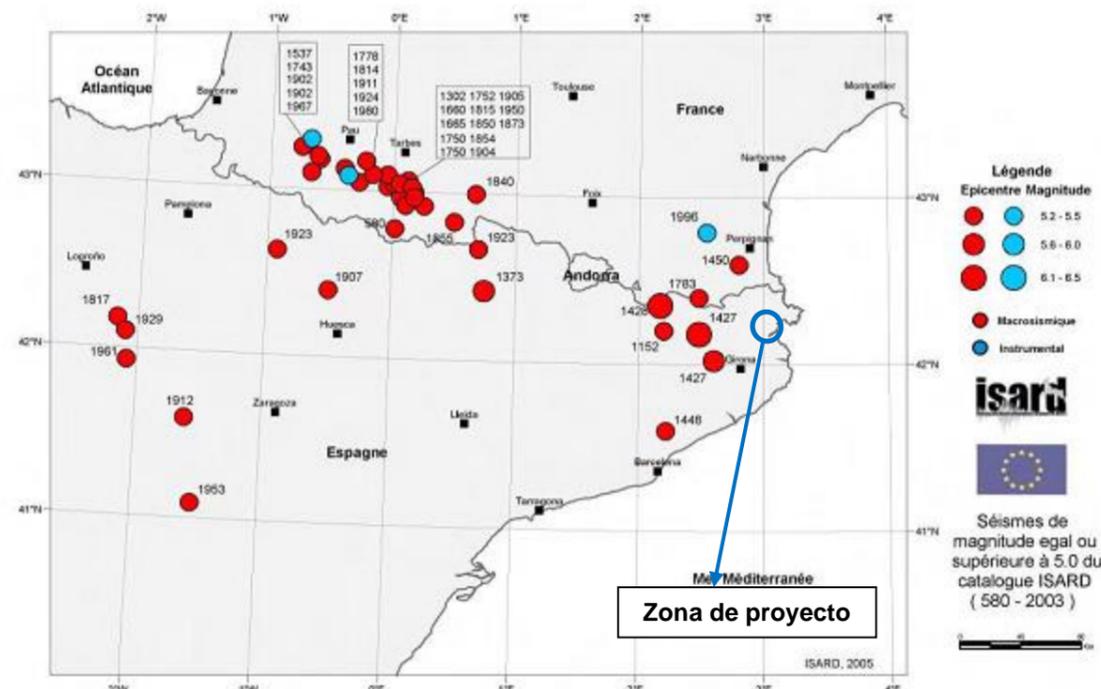


Figura 2. Sismicidad de Catalunya 580-2003 para una magnitud mayor que 5,0 (en rojo: magnitud estimada, en azul: magnitud medida). Proyecto ISARD.

4.2.1. Normas Sismorresistentes. Ámbito de aplicación

4.2.1.1 Norma de Construcción Sismorresistente NCSR-02

Esta norma de construcción sismorresistente tiene como objetivo proporcionar los criterios que han de seguirse dentro del territorio español para la consideración de la acción sísmica a todos los proyectos y obras de construcción relativos a edificación, y, en lo que corresponda, a los demás tipos de construcciones, en tanto no se aprueben para los mismos normas o disposiciones específicas con prescripciones de contenido sismorresistente.

Esta norma será de aplicación tanto para las obras de tierra (rellenos y desmontes) así como para los muros y obras de drenaje.

A efectos de esta norma y de acuerdo con el uso a que se destinan, con los daños que puede ocasionar su destrucción, las construcciones afectadas se clasifican en:

- **Importancia moderada:** Aquellas con probabilidad despreciable de que su destrucción por el terremoto pueda ocasionar víctimas, interrumpir un servicio primario, o producir daños económicos significativos a terceros.
- **Importancia normal:** Son aquellas que su destrucción por un sismo puede ocasionar víctimas, interrumpir un servicio primario o producir daños económicos significativos a terceros. El factor de importancia del puente γ_I toma un valor de 1,0.
- **Importancia especial:** Son aquellas en las que su destrucción por un sismo puede interrumpir un servicio imprescindible o tener efectos catastróficos. En este grupo se incluyen las construcciones que así se consideren en el plan urbanístico y documentos públicos análogos así como reglamentos más específicos y al menos en las siguientes construcciones: Hospitales y otros centros sanitarios, edificios o instalaciones de comunicaciones, centros de organización de funciones en casos de desastre, edificios de bomberos, policías y otros grupos de protección, instalaciones básicas para poblaciones tales como servicios de agua o gas, estructuras de vías de comunicación tales como puentes, muros de categoría especial en las normativas específicas, edificios y estructuras vitales para los medios de transporte, edificios e instalaciones industriales con riesgo de accidentes con sustancias peligrosas, centrales nucleares y térmicas, presas y monumentos históricos o de interés cultural. El factor de importancia del puente γ_I toma un valor de 1,3.

La aplicación de esta norma es obligatoria en el ámbito de aplicación establecido excepto en:

- Construcciones de importancia moderada
- Edificaciones de importancia normal o especial en el caso de que la aceleración sísmica básica ab sea inferior a 0.04g, siendo g la aceleración de la gravedad.
- En las construcciones de importancia normal con pórticos bien arriostrados entre sí en todas las direcciones cuando la aceleración sísmica básica sea inferior a 0.08g. No obstante, la norma será de aplicación en los edificios de más de siete plantas si la aceleración sísmica de cálculo, ac, es igual o mayor de 0.08.g.

Si la aceleración sísmica básica es igual o superior a 0.04.g deberán tenerse en cuenta los efectos de los sismos en terrenos potencialmente inestables.

4.2.1.2 Norma de Construcción Sismorresistente: Puentes NCSP-07

Esta norma de construcción sismorresistente, publicada en el Real Decreto 637/2007, de 18 de Mayo, por el que se aprueba la Norma de Construcción Sismorresistente: Puentes (NCSP-07), es de aplicación a todos los proyectos y obras de nueva construcción de puentes que formen parte de la red de carreteras del Estado o de la red ferroviaria de interés general.

A efectos de esta norma y de acuerdo con el uso a que se destina, según la IAP-11 los daños que pueden ocasionarse en un puente se clasifican según su importancia en:

- **Importancia moderada:** Se pueden incluir en esta categoría aquellos puentes o estructuras en los que la consideración de la acción sísmica no sea económicamente justificable, siempre que no sean críticos para el mantenimiento de las comunicaciones. En general, los puentes de la red de carreteras del Estado no se considerarán incluidos en esta categoría, salvo que se justifique adecuadamente y se autorice de forma expresa por la Dirección General de Carreteras. Para los puentes de importancia moderada, se tomará un factor de importancia de valor $\gamma_I = 0$.
- **Importancia normal:** Son aquellos puentes cuya destrucción puede interrumpir un servicio necesario para la colectividad o producir importantes pérdidas económicas sin que, en ningún caso, se trate de un servicio imprescindible o pueda dar lugar a efectos catastróficos. Se incluyen en este grupo, en general, todos los puentes de la red de carreteras del Estado que no estén incluidos en la categoría de puentes de importancia especial. En concreto, son puentes de importancia normal, los pasos superiores, los pasos inferiores (marcos, pórticos o bóvedas), los falsos túneles, las pasarelas y las pequeñas obras de paso pertenecientes a la red de alta capacidad, salvo que ocurra alguna de las circunstancias citadas para la importancia especial. Para los puentes de importancia normal, se tomará un factor de importancia de valor $\gamma_I = 1,0$.
- **Importancia especial:** Son aquellos puentes cuya destrucción puede interrumpir un servicio imprescindible después de haber ocurrido un terremoto, o aumentar los daños del mismo por efectos catastróficos. Se considerarán incluidos en este grupo los que así estime la autoridad competente y, al menos, los siguientes:
 - Puentes situados en calzadas principales de la red de alta capacidad (autovías y autopistas) y en las carreteras convencionales y vías de servicio cuya IMD sea superior a 7.000 vehículos/día.
 - Puentes que soportan líneas de servicios básicos (conducciones eléctricas, de agua, etc...)
 - Puentes situados en los accesos principales a núcleos urbanos y puentes urbanos situados en arterias o vías principales.
 - Puentes situados en vías (incluyendo los pasos superiores e inferiores sobre las mismas) que den acceso a los siguientes tipos de instalaciones:
 - Hospitales y centros sanitarios
 - Edificios para personal y equipos de ayuda, como cuarteles de bomberos, policía, fuerzas armadas y parques de maquinaria
 - Instalaciones básicas de las poblaciones como depósitos de agua, gas, combustibles, estaciones de bombeo, redes de distribución, centrales eléctricas y centros de transformación.
 - Puertos y aeropuertos de interés general del Estado
 - Edificios e instalaciones básicas de comunicaciones: radio, televisión, centrales telefónicas y telegráficas.
 - Edificaciones donde esté previsto albergar los centros de organización y coordinación en caso de terremoto destructivo.
 - Parques de maquinaria o almacenes que alojen instrumental o maquinaria imprescindible para la ayuda inmediata.
 - Grandes presas e instalaciones básicas.
 - Edificios donde existan acumuladas materias tóxicas, inflamables o explosivas.
 - Centrales nucleares o instalaciones donde se procesan materiales radioactivos.

Para los puentes de importancia especial, se tomará un factor de importancia de valor $\gamma_I = 1,3$.

Todas las obras de paso situadas en la calzada de la N-II quedan englobadas en el caso de "Puentes situados en calzadas principales de la red de alta capacidad (autovías y autopistas) y en las carreteras convencionales y vías de servicio cuya IMD sea superior a 7.000 vehículos/día", por lo que se considerarán de importancia especial.

De acuerdo con la norma sísmica NCSP-07, no será necesaria la consideración de las acciones sísmicas cuando la aceleración sísmica horizontal básica del emplazamiento a_b cumpla:

$$a_b < 0,04 \cdot g$$

Tampoco será necesaria la consideración de las acciones sísmicas en las situaciones en que la aceleración sísmica horizontal de cálculo a_c cumpla:

$$a_c < 0,04 \cdot g$$

4.2.2. Riesgo sísmico en la zona de estudio

La peligrosidad sísmica se define mediante el mapa de peligrosidad sísmica publicado en el capítulo 2 del B.O.E. nº 244 del viernes 11 de octubre de 2002, y que se muestra a continuación en la siguiente figura:

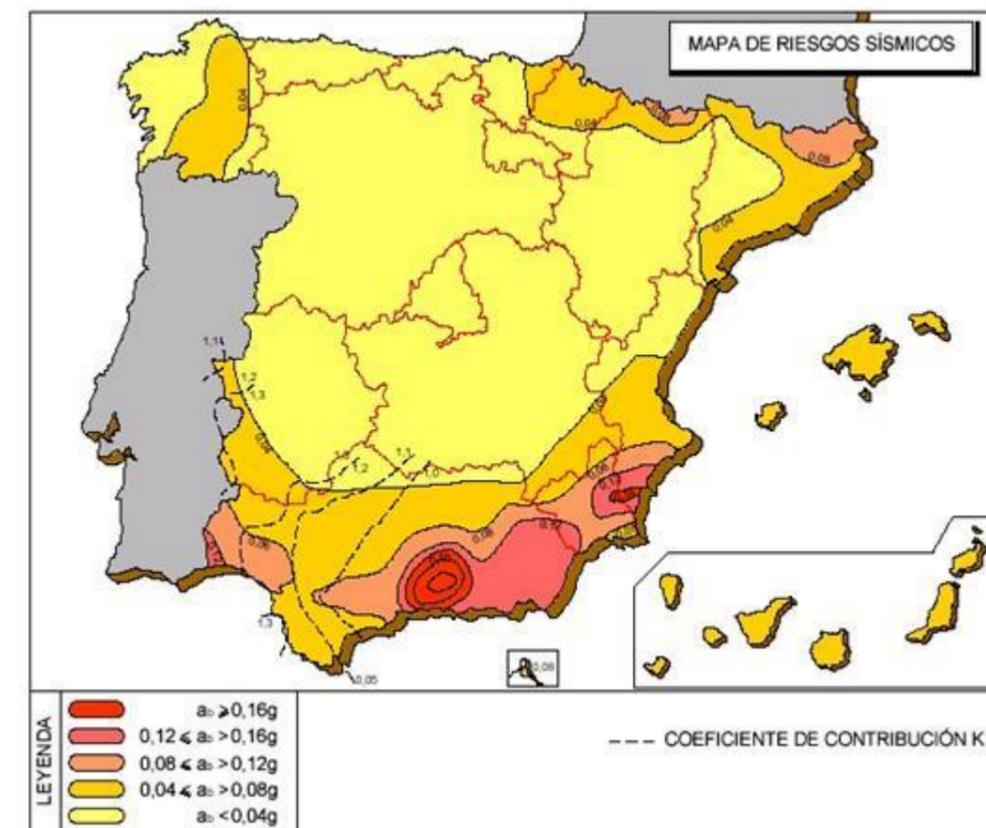


Figura 3. Mapa de peligrosidad sísmica básica (NCSE-02).

Este mapa muestra, expresando en relación con el valor de la gravedad, g, la aceleración sísmica básica (a_b) y el coeficiente de distribución (K) que tienen en cuenta la influencia de los diferentes tipos de sismos esperados en la peligrosidad sísmica de cada punto.

4.2.3. Acciones sísmicas

El objetivo del cálculo sismorresistente es verificar la seguridad de las construcciones ante las acciones sísmicas que puedan actuar en ellas durante su período de vida útil.

Ambas normas establecen el análisis de la estructura mediante espectros de respuesta como método de referencia para el cálculo sísmico.

4.2.3.1 Aceleración sísmica horizontal de cálculo

La aceleración sísmica de cálculo se obtiene a partir de la siguiente expresión:

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

Donde:

a_b : Aceleración sísmica básica, según la Norma de Construcción Sismorresistente NCSE-02, cuyo mapa sísmico se ha incluido en la anterior figura.

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

γ_I : Factor de importancia. Es función de la importancia del puente. Adopta un valor de 1,0 para puentes de importancia normal y de 1,3 para puentes de importancia especial.

γ_{II} : Factor multiplicador 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 ese estudio, de forma aproximada puede suponerse: $\gamma_{II} = (P_R / 500)^{0.4}$ por lo que, para el caso de estudio, γ_{II} adopta un valor de 1.

S: Coeficiente de amplificación del terreno, que se obtiene de las siguientes expresiones en función del valor de $\rho \cdot a_b$:

- Si $\rho \cdot a_b \leq 0.1g$
$$S = \frac{C}{1.25}$$
- Si $0.1g < \rho \cdot a_b < 0.4g$
$$S = \frac{C}{1.25} + 3.33 \left(\rho \frac{a_b}{g} - 0.1 \right) \left(1 - \frac{C}{1.25} \right)$$
- Si $\rho \cdot a_b \geq 0.4g$
$$S = 1$$

donde:

C: Coeficiente del terreno. Depende de las propiedades geotécnicas del terreno de cimentación.

4.2.3.2 Clasificación del terreno. Coeficiente del terreno

En la Norma de Construcción Sismorresistente los terrenos se clasifican en:

- Terreno tipo I: Roca compacta, suelo cimentado 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, suelos granulares densos o cohesivos duros. Velocidad de propagación de las ondas elásticas transversales o de cizalla: $400 \text{ m/s} < v_s < 750 \text{ m/s}$.
- Terreno tipo III: Suelo granular de compacidad media, o suelo cohesivo de consistencia alta a muy alta. Velocidad de propagación de las ondas elásticas transversales o de cizalla: $200 \text{ m/s} < v_s < 400 \text{ m/s}$.
- Terreno tipo IV: Suelo granular de compacidad baja, o suelo cohesivo de consistencia media a baja. Velocidad de propagación de las ondas elásticas transversales o de cizalla: $v_s < 200 \text{ m/s}$.

A cada tipología de terreno se le asigna un valor del coeficiente del terreno C, indicado en la siguiente tabla:

Tipo de Terreno	Coeficiente C
I	1.0
II	1.3
III	1.6
IV	2.0

Tabla 1. Valor del coeficiente C.

Para obtener el valor del coeficiente C de cálculo se determinarán los espesores e_1, e_2, e_3 y e_4 de los terrenos tipo I, II, III y IV respectivamente, existentes en los 30 primeros metros bajo la superficie.

Se adoptará como valor de C el valor medio obtenido al ponderar los coeficientes C_i de cada estrato con su espesor e_i mediante la expresión:

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

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.

4.2.3.3 Espectro de respuesta elástica

La Norma también establece un espectro normalizado de respuesta elástica en la superficie libre del terreno (ver figura), por aceleraciones horizontales, correspondiente a un oscilador lineal simple con una amortiguación de referencia del 5% respecto al crítico, definido por los siguientes valores:

$$0 \leq T \leq T_A: \quad S_a(T) = \left[1 + \frac{T}{T_A} (2.5 v - 1) \right] a_c$$

$$T_A \leq T \leq T_B: \quad S_a(T) = 2.5 v a_c$$

$$T_B \leq T \leq T_C: \quad S_a(T) = 2.5 v \frac{T_B}{T} a_c$$

$$T_C \leq T: \quad S_a(T) = 2.5 v \frac{T_B T_C}{T^2} a_c$$

Donde:

Sa (T): Espectro de respuesta elástica de aceleraciones.

ac: Aceleración sísmica de cálculo.

v: Factor de corrección dependiendo de la amortiguación de la estructura definido por $(5/\zeta)^{0,4} \geq 0,55$, donde ζ es el índice de amortiguamiento definido según el tipo de estructura.

Tipo de estructura	Sismo frecuente	Sísmo último
Acero	2	4
Hormigón pretensado		
Mixtas		
Hormigón Armado	3	5

Tabla 2. Valor del índice de amortiguación según tipo de estructura

T_A, T_B T_C: Periodos característicos del espectro de respuesta, de valores:

Sismo frecuente	Sísmo último
$T_A = K \cdot C / 10$	$T_A = K \cdot C / 20$
$T_B = K \cdot C / 2.5$	$T_B = K \cdot C / 5$
$T_C = K \cdot (2 + C)$	$T_C = K \cdot (1 + 0.5C)$

Tabla 3. Períodos característicos.

K Coeficiente de contribución.

C Coeficiente del terreno

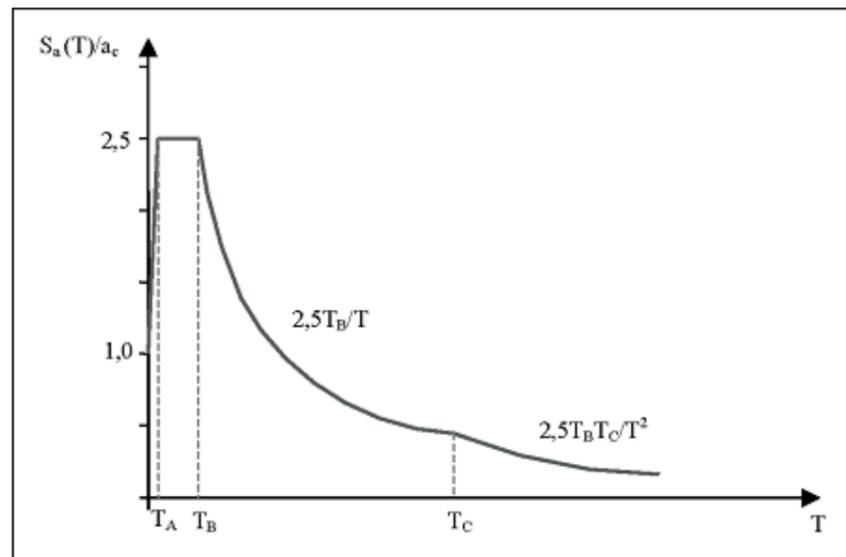


Figura 4. Espectro normalizado de respuesta elástica.

4.3. ACELERACIÓN SÍSMICA EN LA ZONA DE PROYECTO

4.3.1. Viaductos y obras de paso

Para las estructuras tipo puente, es de aplicación el artículo 2 del Real Decreto 637/2007 para todos los proyectos y obras de nueva construcción de puentes que forman parte de la red de carreteras del Estado o de la red ferroviaria de interés general.

En la zona de proyecto la normativa especifica los siguientes valores para la aceleración básica y por el coeficiente K de contribución:

$$a_b=0,09g$$

$$K=1,0$$

Las estructuras se consideran como construcciones de importancia especial por lo que el coeficiente adimensional de riesgo para un periodo de retorno de 500 años tomará el siguiente valor:

$$\rho=1,3$$

Para calcular el coeficiente C del terreno se ha dividido el trazado en cuatro tramos con perfiles geológico tipo del terreno, para las zonas en las que se proyectan las estructuras, algo diferenciados.

Considerando los 30 metros superficiales de terreno la siguiente tabla muestra la distribución de materiales según el perfil geotécnico del trazado obtenido y el coeficiente del terreno asociado a dicho perfil:

PK Inicial	PK Final	Espesor de cada tipo de terreno			
		TIPO I Roca compacta, suelo cimentado o granular muy denso.	TIPO II Roca muy fracturada, suelos granulares densos o cohesivos duros	TIPO III Granular de comp. media, o cohesivo de consist. alta a muy alta	TIPO IV Granular de comp. baja, o cohesivo de consist. media a baja
0+000	1+100	0	20	10	0
1+100	2+000	0	25	5	0
2+000	4+500	0	12	18	0
4+500	8+600	0	13	12	5

Tabla 4. Valores para estimar el coeficiente C según el perfil del terreno y PK.

De esta manera, los coeficientes de terreno (C), coeficientes de ampliación (S) y aceleraciones de cálculo (Ac) toman los siguientes valores:

PK Inicial	PK Final	Coef. del terreno C	Coef. de ampliación S	Aceleración de cálculo Ac - (m/s ²)
0+000	1+100	1,40	1,12	1,28
1+100	2+000	1,35	1,08	1,24
2+000	4+500	1,48	1,18	1,36
4+500	8+600	1,54	1,23	1,41

Tabla 5. Aceleraciones de cálculo según el perfil del terreno y PK.

Obteniendo una **aceleración de cálculo** máxima de **a_c = 1,41 m/s²**

Siguiendo los cálculos establecidos en la norma, se calculan los periodos característicos del espectro de respuesta para esta situación pésima:

Sismo último	Sismo frecuente
T _A = 0,154	T _A = 0,077
T _B = 0,615	T _B = 0,307
T _C = 3,537	T _C = 1,768

Tabla 6. Períodos característicos.

Obteniendo los siguientes espectros normalizados para estructuras de hormigón pretensado y mixtas (índice de amortiguamiento de 2 y 4 para sismo frecuente y último respectivamente):

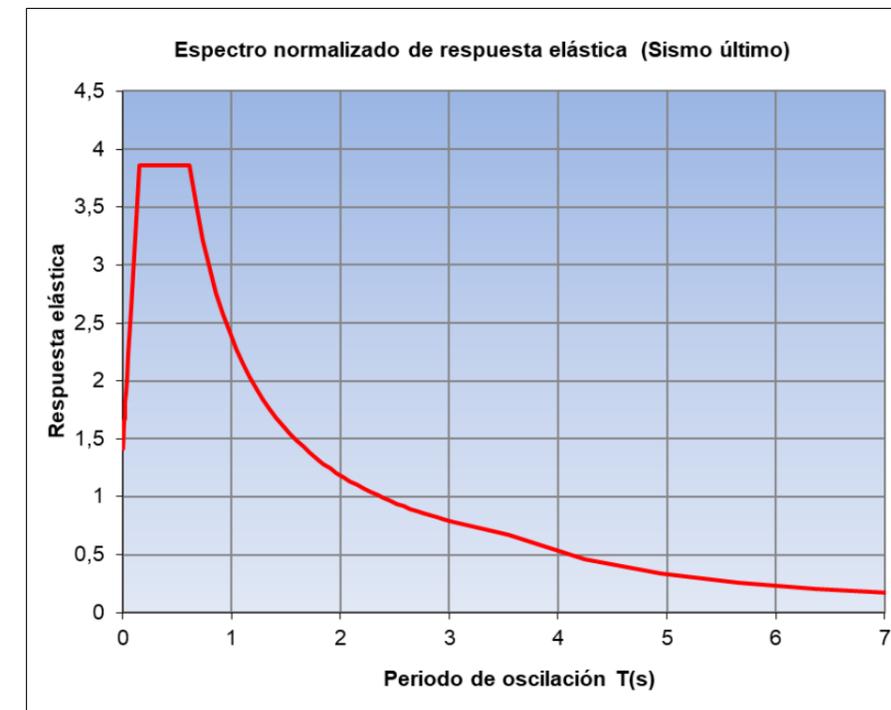


Figura 5. Espectro normalizado de respuesta elástica para el sismo frecuente (puentes de hormigón pretensado y mixtas).

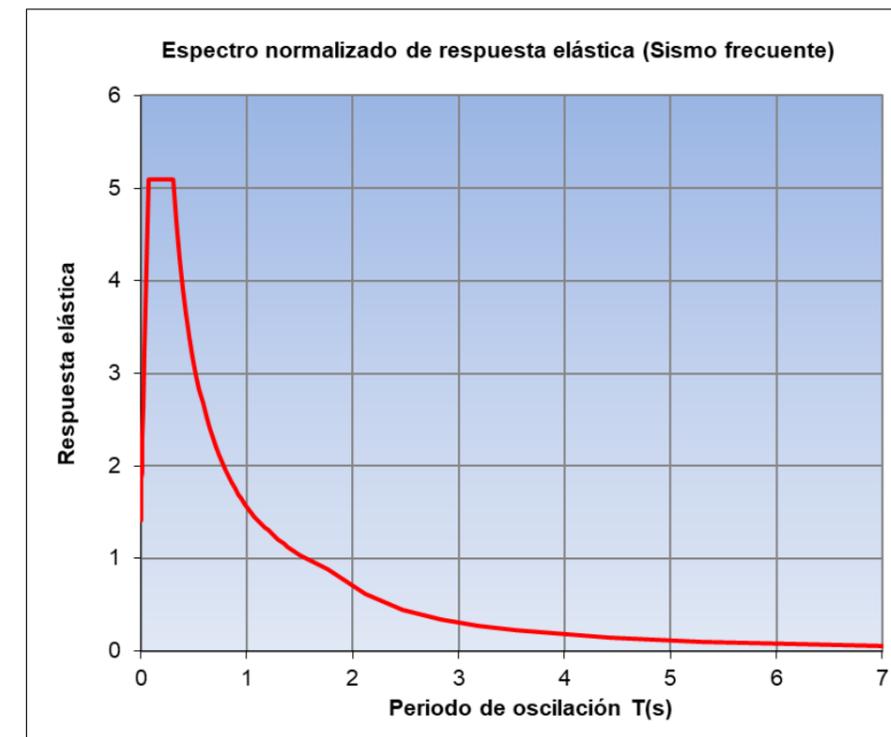


Figura 6. Espectro normalizado de respuesta elástica para el sismo último (puentes de hormigón pretensado y mixtas).

Obteniendo los siguientes espectros normalizados para estructuras de hormigón armado (índice de amortiguamiento de 3 y 5 para sismo frecuente y último respectivamente):

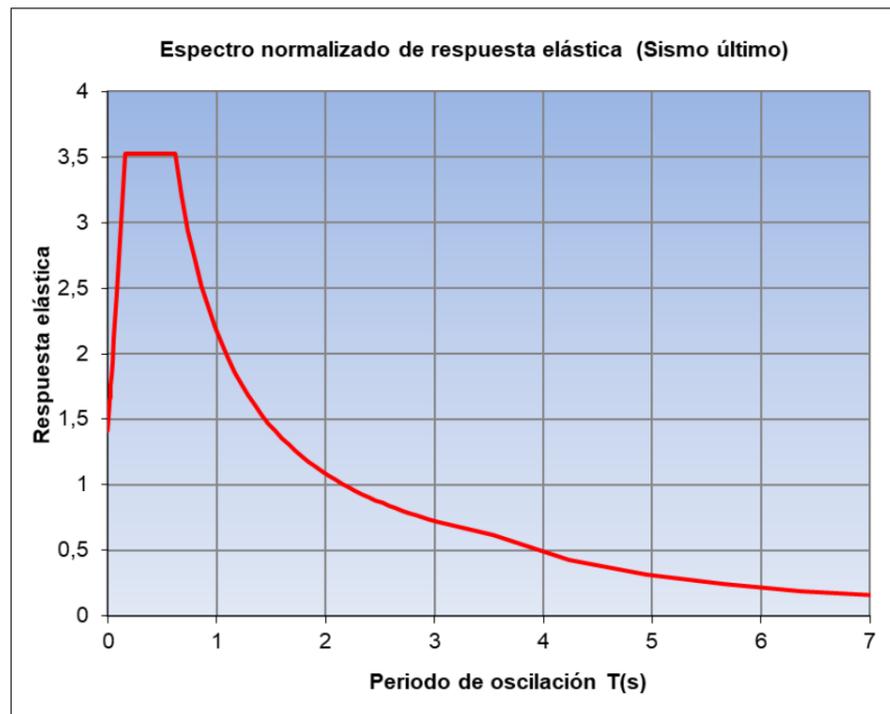


Figura 7. Espectro normalizado de respuesta elástica para el sismo frecuente (hormigón armado).

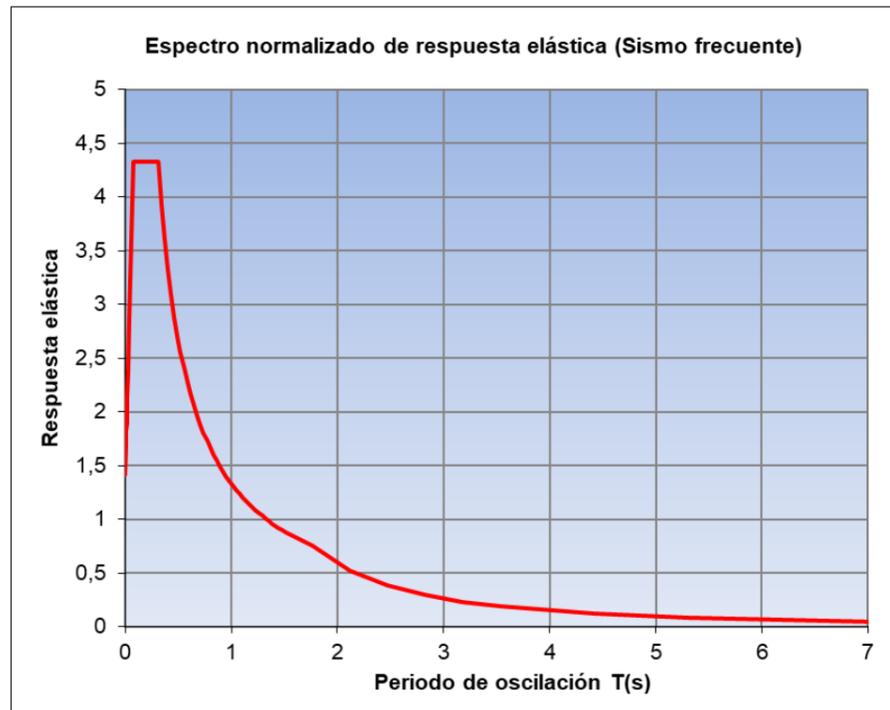


Figura 8. Espectro normalizado de respuesta elástica para el sismo último (hormigón armado).

4.3.2. Resto de estructuras y obras de tierra

Para el resto de las estructuras (muros de contención) y obras de tierra es de aplicación el artículo 2 del Real Decreto 997/2002.

En la zona de proyecto la normativa especifica los siguientes valores para la aceleración básica y por el coeficiente K de contribución:

$$a_b = 0,09g$$

$$K = 1,0$$

La actuación por ejecutar se considera como de importancia normal por lo que el coeficiente adimensional de riesgo toma el valor de 1,0:

$$\gamma_1 = 1,0$$

Para calcular el coeficiente C del terreno se ha dividido el trazado en cuatro tramos con perfiles geológico tipo del terreno, para las zonas en las que se proyectan las estructuras, algo diferenciados.

Considerando los 30 metros superficiales de terreno la siguiente tabla muestra la distribución de materiales según el perfil geotécnico del trazado obtenido y el coeficiente del terreno asociado a dicho perfil:

PK Inicial	PK Final	Espesor de cada tipo de terreno			
		TIPO I Roca compacta, suelo cimentado o granular muy denso.	TIPO II Roca muy fracturada, suelos granulares densos o cohesivos duros	TIPO III Granular de comp. media, o cohesivo de consist. alta a muy alta	TIPO IV Granular de comp. baja, o cohesivo de consist. media a baja
0+000	1+100	0	20	10	0
1+100	2+000	0	25	5	0
2+000	4+500	0	12	18	0
4+500	8+600	0	13	12	5

Tabla 7. Valores para estimar el coeficiente C según el perfil del terreno y PK.

De esta manera, los coeficientes de terreno (C), coeficientes de ampliación (S) y aceleraciones de cálculo (Ac) toman los siguientes valores:

PK Inicial	PK Final	Coef. del terreno C	Coef. de ampliación S	Aceleración de cálculo Ac - (m/s ²)
0+000	1+100	1,40	1,12	0,99
1+100	2+000	1,35	1,08	0,96
2+000	4+500	1,48	1,19	1,05
4+500	8+600	1,54	1,24	1,09

Tabla 8. Aceleraciones de cálculo según el perfil del terreno y PK.

Obteniendo una **aceleración de cálculo** máxima de $a_c = 1,09 \text{ m/s}^2$

Siguiendo los cálculos establecidos en la norma, se calculan los periodos característicos del espectro de respuesta:

Periodos de oscilación
$T_A = 0,154$
$T_B = 0,615$

Tabla 9. *Períodos característicos.*

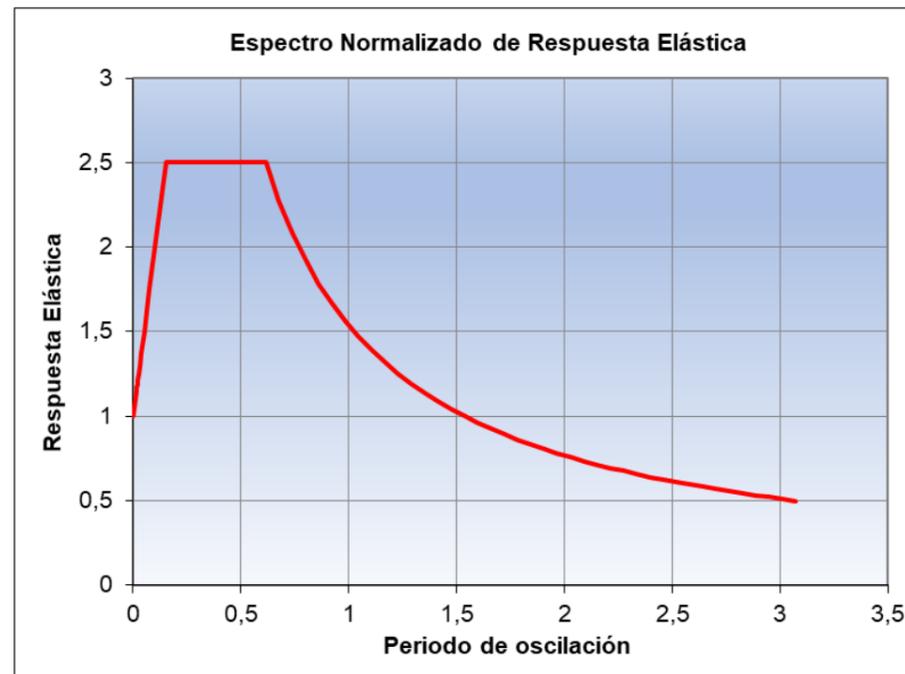


Figura 9. *Espectro normalizado de respuesta elástica.*