

ANEJO N° 3 – EFECTOS SÍSMICOS

3. EFECTOS SÍSMICOS

ÍNDICE

1.- OBJETO Y AMBITO DE APLICACIÓN	3
2.- REQUISITOS FUNDAMENTALES.....	3
3.- CONSIDERACIÓN SÍSMICA.....	3
3.1. MUY BAJA SISMICIDAD.....	3
3.2. BAJA SISMICIDAD.....	3
4.- ACCIÓN SÍSMICA	3
4.1. FACTOR DE IMPORTANCIA	3
4.2. CONDICIONES DEL TERRENO.....	4
4.3. REGIONES SÍSMICAS.....	5
4.4. ACELERACIÓN DEL SUELO EN TERRENO TIPO A.....	6
4.5. COEFICIENTE DE AMPLIFICACIÓN TOPOGRÁFICA.....	6
5.- ESPECTRO DE RESPUESTA ELÁSTICA	6
5.1. ESPECTRO DE RESPUESTA ELÁSTICA HORIZONTAL.....	6
5.2. ESPECTRO DE RESPUESTA ELÁSTICA VERTICAL.....	8
6.- ESPECTRO DE RESPUESTA DE CÁLCULO.....	9

ANEJO Nº 3. EFECTOS SÍSMICOS

1.- OBJETO Y AMBITO DE APLICACIÓN

En el presente anejo se justifica la necesidad de considerar las acciones sísmicas en el proyecto. En caso de que sea necesario, se determina el valor de la aceleración de cálculo de acuerdo con el Eurocódigo 8: Proyecto de Estructuras Sismorresistentes, Parte 1: Reglas generales acciones sísmicas y reglas para la edificación (UNE-EN 1998-1:2018). Se aplicarán también en el presente proyecto las siguientes partes del Eurocódigo 8:

- Parte 2: Puentes UNE-EN 1998-2:2018)
- Parte 5: Cimentaciones, estructuras de contención y aspectos geotécnicos (UNE-EN 1998-5:2018)

2.- REQUISITOS FUNDAMENTALES

Los criterios recogidos en la Norma, tienen por objeto lograr que los puentes situados en zona sísmica cumplan:

- Ausencia de colapso para el sismo de diseño
- Limitaciones del daño para un sismo con una probabilidad de ser superado P_{DLR} del 10%, en 10 años, y un periodo de retorno T_{DLR} de 95 años.

3.- CONSIDERACIÓN SÍSMICA

3.1. MUY BAJA SISMICIDAD.

En casos de muy baja sismicidad, no es necesario observar las disposiciones de la norma EN 1998.

De acuerdo con el anejo nacional, se consideran zonas de muy baja sismicidad aquellas en las que se cumpla:

$$a_{gR} < 0.04 \text{ g}, \text{ siendo } g \text{ la aceleración de la gravedad}$$

3.2. BAJA SISMICIDAD.

De acuerdo con el anejo nacional, se consideran zonas de baja sismicidad aquellas en las que se cumpla:

$$a_{gS} \leq 0.1 \text{ g}, \text{ siendo } g \text{ la aceleración de la gravedad}$$

En casos de baja sismicidad pueden utilizarse, para ciertos tipos o categorías de estructuras, métodos de cálculo sismorresistente reducidos o simplificados.

En estos casos de baja sismicidad, para puentes de importancia I o II y con una longitud menor de 15m, se permite el cálculo de las acciones sísmicas asimilándolas a la fuerza estática equivalente que se corresponde con una aceleración horizontal uniforme igual a $a_g S$.

4.- ACCIÓN SÍSMICA

La acción sísmica de cálculo, A_{Ed} , se expresa en términos de:

- a) La acción sísmica de referencia A_{Ek} , asociada a una probabilidad de referencia P_{NCR} , de que sea superada en 50 años o a un periodo de retorno de referencia T_{NCR} de 475 años.
- b) El coeficiente de importancia γ_I a fin de tener en cuenta la diferenciación de fiabilidad:

$$A_{Ed} = \gamma_I A_{Ek}$$

4.1. FACTOR DE IMPORTANCIA

Los puentes deben clasificarse en clases de importancia en función de las consecuencias de su fallo para la vida humana, de una importancia para el mantenimiento de las comunicaciones, especialmente en el periodo inmediatamente posterior al terremoto, y de las consecuencias económicas del colapso.

De acuerdo con el anexo nacional, las categorías de los puentes atendiendo a criterios de afección y acciones sísmicas, se deben definir de acuerdo con el uso al que se destine la estructura y con los daños que puede ocasionar su destrucción. Exclusivamente a estos efectos se distinguen las siguientes categorías:

- i. Clase de importancia I: Puentes de importancia moderada

Se incluyen aquellos puentes que, a juicio de la autoridad competente, tengan una probabilidad despreciable de que su destrucción pueda ocasionar víctimas, interrumpir un servicio primario u ocasionar daños económicos significativos a terceros.

- ii. Clase de importancia II: Puentes de importancia normal

Son 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, todo ello a juicio de la autoridad competente.

- iii. Clase de importancia III: Puentes de importancia especial

Son aquéllos cuya destrucción puede interrumpir un servicio imprescindible tras el terremoto o dar lugar a efectos catastróficos, todo ello a juicio de la autoridad competente.

Los factores de importancia para puentes según el anexo nacional son los siguientes:

IMPORTANCIA DEL PUENTE	FACTOR DE IMPORTANCIA γ_i
Moderada	Lo fija la autoridad competente
Normal	1.0
Especial	1.3

En el caso que nos ocupa, se considera un factor de importancia de 1.30.

4.2. CONDICIONES DEL TERRENO.

Para tener en cuenta la influencia de las condiciones locales del terreno sobre la acción sísmica pueden utilizarse los tipos de terreno A, B, C, D y E descritos mediante los perfiles estratigráficos y parámetros indicados en la tabla AN.1 (Tabla 3.1) – Tipos de terreno del anexo nacional y detallados 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.

El terreno se clasifica en función de su capacidad de amplificar el movimiento sísmico que se produzca en la roca, lo que depende del espesor de los suelos superficiales y de la velocidad media de propagación de las ondas sísmicas transversales. El terreno puede ser homogéneo o estar formado por varias capas de los siguientes tipos (de I a IV):

- Capa de terreno tipo I: Roca compacta o suelo cementado, con velocidad de propagación de las ondas elásticas transversales $v_s > 800$ m/s.
- Capa de terreno tipo II: Roca muy alterada o muy fracturada, suelos granulares densos o suelos cohesivos duros, con velocidad de propagación de las ondas elásticas transversales $800 \text{ m/s} \geq v_s > 360$ m/s.
- Capa de terreno tipo III: Suelo granular de compacidad media o suelo cohesivo de consistencia firme a muy firme, con velocidad de propagación de las ondas elásticas transversales $360 \text{ m/s} \geq v_s > 180$ m/s.
- Capa de terreno tipo IV: Suelo granular suelto o suelo cohesivo blando, con velocidad de propagación de las ondas elásticas transversales $v_s \leq 180$ m/s.

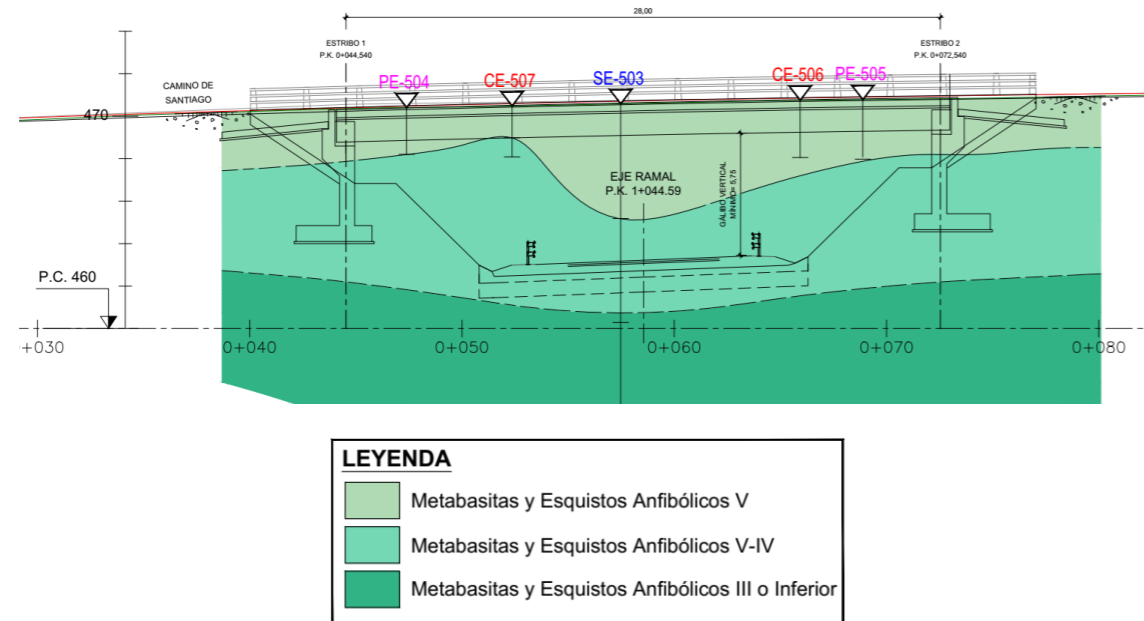
La velocidad media de la onda de corte $v_{s,30}$ debería calcularse de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$v_{s,30} = \frac{30}{\sum_{i=1,N} \frac{h_i}{v_i}}$$

donde h_i y v_i representan el espesor (en metros) y la velocidad de la onda de corte (a un nivel de deformación de 10-5 o menor) de la i -ésima formación o capa, de un total de N , existente en los 30 m superiores.

En emplazamientos con condiciones del terreno que respondan a uno de los dos tipos especiales de terreno, S1 o S2, se requiere llevar a cabo estudios específicos a fin de definir la acción sísmica.

En base al perfil del terreno mostrado en el plano Perfiles Geológico – Geotécnico del Paso Superior incluido en el anejo de cimentación de estructuras, el perfil de suelo bajo los apoyos de estribos sería 2,0m – 2,5m suelo de alteración (grado V-IV) sobre roca con grado de alteración (III-II). Por lo que el tipo de terreno a considerar en el Paso Superior sería tipo A.



A continuación se muestra un extracto de la tabla de valores de a_{gR} y del coeficiente de contribución correspondiente a la longitud y latitud en la que se ubica el presente proyecto:

Long	Lat	K	a_{gR}	Long	Lat	K	a_{gR}	Long	Lat	K	a_{gR}	Long	Lat	K	a_{gR}
-3,0	42,5	1,0	0,039	3,3	42,5	1,0	0,102	-0,8	42,6	1,0	0,093	-6,3	42,7	1,0	0,038
-2,9	42,5	1,0	0,041	3,4	42,5	1,0	0,091	-0,7	42,6	1,0	0,091	-2,9	42,7	1,0	0,039
-2,8	42,5	1,0	0,044	3,5	42,5	1,0	0,077	-0,6	42,6	1,0	0,092	-2,8	42,7	1,0	0,042
-2,7	42,5	1,0	0,048	3,6	42,5	1,0	0,065	-0,5	42,6	1,0	0,095	-2,7	42,7	1,0	0,045
-2,6	42,5	1,0	0,052	3,7	42,5	1,0	0,054	-0,4	42,6	1,0	0,098	-2,6	42,7	1,0	0,047
-2,5	42,5	1,0	0,057	-9,6	42,6	1,0	0,044	-0,3	42,6	1,0	0,101	-2,5	42,7	1,0	0,051
-2,4	42,5	1,0	0,062	-9,5	42,6	1,0	0,048	-0,2	42,6	1,0	0,103	-2,4	42,7	1,0	0,056
-2,3	42,5	1,0	0,066	-9,4	42,6	1,0	0,050	-0,1	42,6	1,0	0,106	-2,3	42,7	1,0	0,063
-2,2	42,5	1,0	0,067	-9,3	42,6	1,0	0,053	0,0	42,6	1,0	0,109	-2,2	42,7	1,0	0,069
-2,1	42,5	1,0	0,068	-9,2	42,6	1,0	0,056	0,1	42,6	1,0	0,112	-2,1	42,7	1,0	0,074
-2,0	42,5	1,0	0,069	-9,1	42,6	1,0	0,059	0,2	42,6	1,0	0,116	-2,0	42,7	1,0	0,078
-1,9	42,5	1,0	0,069	-9,0	42,6	1,0	0,061	0,3	42,6	1,0	0,122	-1,9	42,7	1,0	0,081
-1,8	42,5	1,0	0,070	-8,9	42,6	1,0	0,063	0,4	42,6	1,0	0,131	-1,8	42,7	1,0	0,085
-1,7	42,5	1,0	0,071	-8,8	42,6	1,0	0,064	0,5	42,6	1,0	0,138	-1,7	42,7	1,0	0,087
-1,6	42,5	1,0	0,072	-8,7	42,6	1,0	0,065	0,6	42,6	1,0	0,142	-1,6	42,7	1,0	0,087
-1,5	42,5	1,0	0,073	-8,6	42,6	1,0	0,066	0,7	42,6	1,0	0,143	-1,5	42,7	1,0	0,088
-1,4	42,7	1,0	0,089	-6,5	42,8	1,0	0,038	-8,4	42,9	1,0	0,056	-9,1	43,0	1,0	0,050
-1,3	42,7	1,0	0,091	-6,4	42,8	1,0	0,037	-8,3	42,9	1,0	0,056	-9,0	43,0	1,0	0,051
-1,2	42,7	1,0	0,094	-3,0	42,8	1,0	0,037	-8,2	42,9	1,0	0,055	-8,9	43,0	1,0	0,052
-1,1	42,7	1,0	0,096	-2,9	42,8	1,0	0,040	-8,1	42,9	1,0	0,055	-8,8	43,0	1,0	0,053
-1,0	42,7	1,0	0,100	-2,8	42,8	1,0	0,042	-8,0	42,9	1,0	0,055	-8,7	43,0	1,0	0,053
-0,9	42,7	1,0	0,104	-2,7	42,8	1,0	0,044	-7,9	42,9	1,0	0,055	-8,6	43,0	1,0	0,054
-0,8	42,7	1,0	0,108	-2,6	42,8	1,0	0,047	-7,8	42,9	1,0	0,056	-8,5	43,0	1,0	0,054
-0,7	42,7	1,0	0,112	-2,5	42,8	1,0	0,050	-7,7	42,9	1,0	0,057	-8,4	43,0	1,0	0,054
-0,6	42,7	1,0	0,115	-2,4	42,8	1,0	0,054	-7,6	42,9	1,0	0,058	-8,3	43,0	1,0	0,054
-0,5	42,7	1,0	0,119	-2,3	42,8	1,0	0,060	-7,5	42,9	1,0	0,059	-8,2	43,0	1,0	0,054
-0,4	42,7	1,0	0,125	-2,2	42,8	1,0	0,068	-7,4	42,9	1,0	0,060	-8,1	43,0	1,0	0,054
-0,3	42,7	1,0	0,130	-2,1	42,8	1,0	0,076	-7,3	42,9	1,0	0,063	-8,0	43,0	1,0	0,054
-0,2	42,7	1,0	0,133	-2,0	42,8	1,0	0,082	-7,2	42,9	1,0	0,061	-7,9	43,0	1,0	0,054
-0,1	42,7	1,0	0,137	-1,9	42,8	1,0	0,086	-7,1	42,9	1,0	0,058	-7,8	43,0	1,0	0,055
0,0	42,7	1,0	0,142	-1,8	42,8	1,0	0,089	-7,0	42,9	1,0	0,055	-7,7	43,0	1,0	0,056
0,1	42,7	1,0	0,148	-1,7	42,8	1,0	0,091	-6,9	42,9	1,0	0,050	-7,6	43,0	1,0	0,057
0,2	42,7	1,0	0,153	-1,6	42,8	1,0	0,092	-6,8	42,9	1,0	0,045	-7,5	43,0	1,0	0,058
0,3	42,7	1,0	0,154	-1,5	42,8	1,0	0,093	-6,7	42,9	1,0	0,041	-7,4	43,0	1,0	0,059
0,4	42,7	1,0	0,152	-1,4	42,8	1,0	0,095	-6,6	42,9	1,0	0,039	-7,3	43,0	1,0	0,060
0,5	42,7	1,0	0,150	-1,3	42,8	1,0	0,097	-6,5	42,9	1,0	0,036	-7,2	43,0	1,0	0,059
0,6	42,7	1,0	0,147	-1,2	42,8	1,0	0,101	-3,0	42,9	1,0	0,038	-7,1	43,0	1,0	0,056
0,7	42,7	1,0	0,146	-1,1	42,8	1,0	0,105	-2,9	42,9	1,0	0,040	-7,0	43,0	1,0	0,052
0,8	42,7	1,0	0,142	-1,0	42,8	1,0	0,110	-2,8	42,9	1,0	0,042	-6,9	43,0	1,0	0,047
0,9	42,7	1,0	0,138	-0,9	42,8	1,0	0,117	-2,7	42,9	1,0	0,044	-6,8	43,0	1,0	0,042
1,0	42,7	1,0	0,135	-0,8	42,8	1,0	0,126	-2,6	42,9	1,0	0,047	-6,7	43,0	1,0	0,039

4.3. REGIONES SÍSMICAS

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 Gorringe-Herradura.

En el Anexo Nacional se incluye una tabla con los valores de a_{gR} y del coeficiente de contribución K en función de la longitud y latitud en la que se encuentre la estructura en estudio.

En el presente proyecto se toma como referencia las localidades de Melide y Palas de Rei situadas en las siguientes latitudes y longitudes:

Melide: Latitud: 42.9, Longitud: -8.0

Palas de Rei: Latitud: 42.9, Longitud: -7.9

Entrando en la tabla con estos valores se obtiene:

$K=1.0$

$a_{gR}= 0.055$

4.4. ACCELERACIÓN DEL SUELO EN TERRENO TIPO A

El valor de cálculo de la aceleración del suelo en un terreno tipo A, a_g , es igual a a_{gR} veces el factor de importancia:

$$a_g = \gamma_I a_{gR}$$

Como $\gamma_I = 1.3$ y $a_{gR} = 0.055g$

$$a_g = 0.0715g$$

4.5. COEFICIENTE DE AMPLIFICACIÓN TOPOGRÁFICA.

Para estructuras importante ($\gamma_I > 1.0$) deberían tenerse en cuenta los efectos de amplificación topográfica.

De acuerdo con el anexo A (Informativo) *Coefficiente de amplificación topográfica*, estos coeficientes se utilizan para comprobar la estabilidad de taludes y deberán aplicarse preferentemente en el caso de taludes que formen parte de irregularidades topográficas como crestas y acantilados de gran longitud y altura mayor de 30m. El presente paso superior no se encuentra situado en ningún accidente topográfico de estas características, por lo que se considera un coeficiente de amplificación topográfica $S_T = 1.00$.

5.- ESPECTRO DE RESPUESTA ELÁSTICA

El movimiento sísmico de un punto dado de la superficie se representa por un espectro de respuesta elástica de la aceleración del suelo, llamado espectro de respuesta elástica.

5.1. ESPECTRO DE RESPUESTA ELÁSTICA HORIZONTAL

El espectro de respuesta elástica $S_e(T)$ se define por las siguientes ecuaciones:

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

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

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

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

$S_e(T)$: espectro de respuesta elástica

T: periodo de vibración de un sistema lineal con un grado de libertad.

a_g : valor de cálculo de la aceleración del suelo en un terreno tipo A ($a_g = \gamma_I a_{gR}$)

T_B : límite inferior del periodo del tramo de aceleración espectral constante

T_C : límite superior del periodo del tramo de aceleración espectral constante

T_D : valor que define el comienzo del tramo de respuesta de desplazamiento constante del espectro

S: coeficiente del suelo

η : coeficiente de corrección del amortiguamiento con valor de referencia $\eta=1$, para un amortiguamiento viscoso del 5%.

El valor del coeficiente de corrección del amortiguamiento puede determinarse por la ecuación:

$$\eta = \sqrt{10 / (5 + \xi)} \geq 0,55$$

Donde ξ es el valor del cociente de amortiguamiento viscoso de la estructura expresado como porcentaje.

De acuerdo con el Anejo Nacional, los valores de los parámetros que describen el espectro elástico son los siguientes:

Suelo tipo	S	T_B (s)	T_C (s)	T_D (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
	$0,1 g < a_g \leq 0,4 g$: $S = 2,33 - 3,33 \frac{a_g}{g}$			
	$a_g > 0,4 g$: $S = 1$			

Donde

$$C = (800/v_{s30})^{0.465}$$

Con v_{s30} en m/s y K coeficiente de distribución definido en el apartado 4.3 Regiones sísmicas.

En nuestro caso, estamos en un suelo tipo A por lo que los parámetros del espectro elástico tienen los siguientes valores:

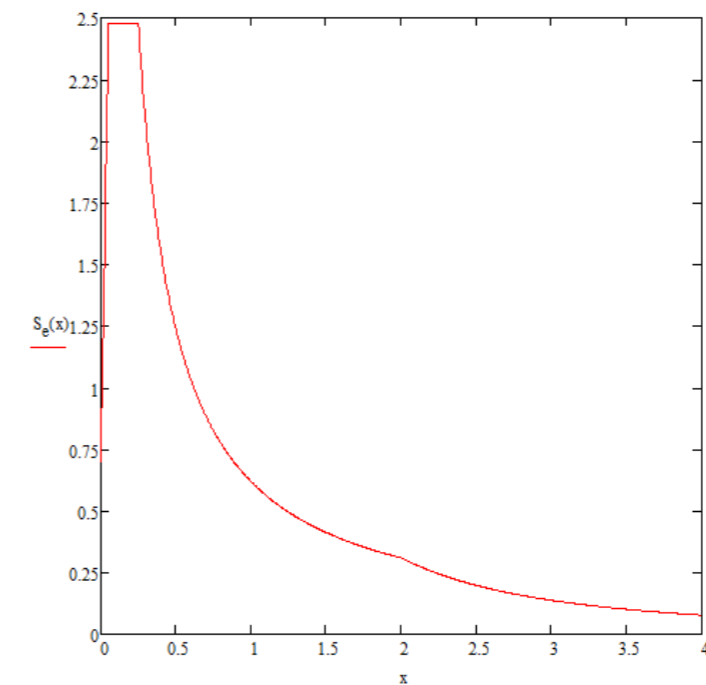
$$S = 1$$

$$T_B = 0.05$$

$$T_C = 0.25$$

$$T_D = 2.0$$

La forma del espectro de respuesta elástica será:



5.2. ESPECTRO DE RESPUESTA ELÁSTICA VERTICAL.

La componente vertical de la acción sísmica debe representarse por un espectro de respuesta elástica que se deduce utilizando las siguientes ecuaciones:

$$0 \leq T \leq T_B : S_{ve}(T) = a_{vg} \cdot \left[1 + \frac{T}{T_B} \cdot (\eta \cdot 3,0 - 1) \right]$$

$$T_B \leq T \leq T_C : S_{ve}(T) = a_{vg} \cdot \eta \cdot 3,0$$

$$T_C \leq T \leq T_D : S_{ve}(T) = a_{vg} \cdot \eta \cdot 3,0 \left[\frac{T_C}{T} \right]$$

$$T_D \leq T \leq 4s : S_{ve}(T) = a_{vg} \cdot \eta \cdot 3,0 \left[\frac{T_C \cdot T_D}{T^2} \right]$$

De acuerdo con el anejo nacional, los parámetros que describen el espectro elástico de respuesta vertical son los siguientes:

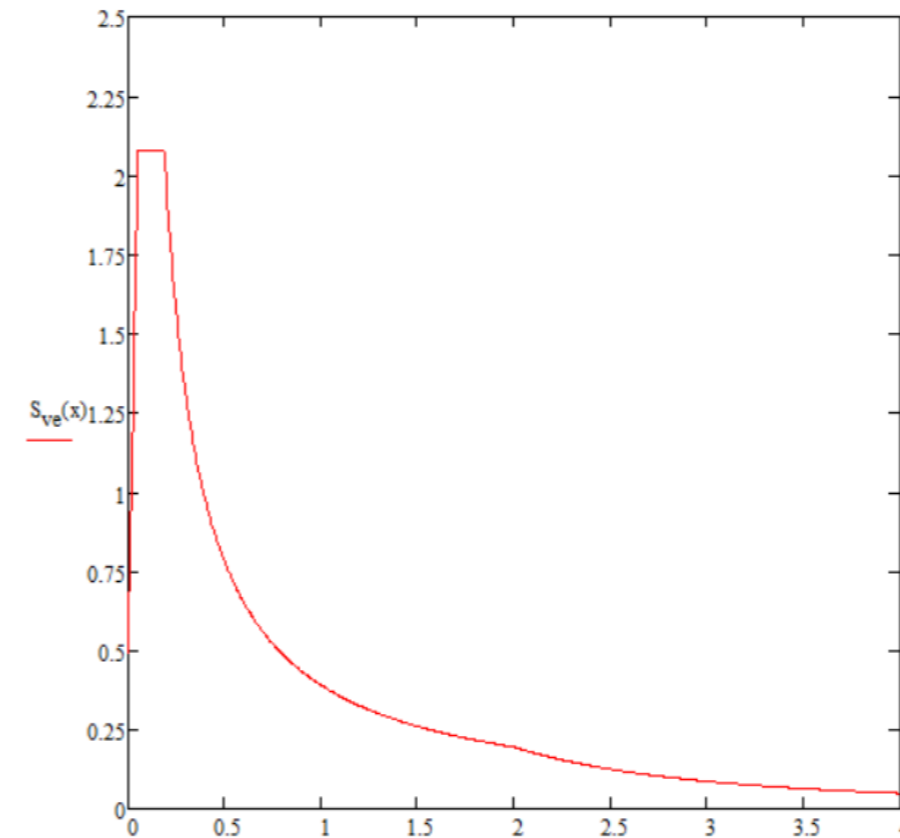
Tabla AN.3 (Tabla 3.4) – Valores de los parámetros que describen el espectro elástico de respuesta vertical

a_{vg} / a_g	T_{vB} / T_B	T_{vC} / T_C	T_{vD} / T_D
0,7	1,0	0,75	1,0

Los valores de estos parámetros son:

$a_{vg} = 0,7 \cdot a_g$	$a_{vg} = 0,491 \frac{m}{s^2}$
$T_{vB} = 1,00 T_B$	$T_{vB} = 0,05$
$T_{vC} = 0,75 T_C$	$T_{vC} = 0,188$
$T_{vD} = 1,00 T_D$	$T_{vD} = 2$

El espectro elástico vertical será:



6.- ESPECTRO DE RESPUESTA DE CÁLCULO.

En el caso de estructuras con aislamiento sísmico, como es el caso de la única estructura del presente proyecto, de acuerdo con el apartado 7.4.1 Espectro de cálculo de la norma UNE-EN 1998-2:2018, no debe ser inferior al espectro de respuesta elástica.

Por lo tanto, los espectros de cálculo del paso superior de Camino de Santiago serán igual a los espectros de respuesta elástica definidos en el apartado anterior.